

GS. TS. NGUYỄN VIỆT TRUNG
ThS. PHẠM HỮU SƠN - ThS. VŨ VĂN TOẢN

CƠ SỞ **THIẾT KẾ CHỐNG GIÓ** **ĐỐI VỚI CẦU DÂY NHỊP LỚN**



NHÀ XUẤT BẢN XÂY DỰNG



GS. TS. NGUYỄN VIỆT TRUNG
ThS. PHẠM HỮU SƠN - ThS. VŨ VĂN TOÀN

CƠ SỞ THIẾT KẾ CHỐNG GIÓ ĐỐI VỚI CẦU DÂY NHỊP LỚN

NHÀ XUẤT BẢN XÂY DỰNG
HÀ NỘI - 2006

LỜI NÓI ĐẦU

Tính ưu việt của kết cấu cầu dây nói chung ngày càng được khẳng định không chỉ về mặt kiến trúc mỹ quan hay khả năng vượt nhịp lớn mà cả về mặt công nghệ thi công. Tuy nhiên, ở Việt Nam hiện nay việc xây dựng cầu dây nhịp lớn vẫn còn khá mới mẻ; Với đặc điểm vị trí địa lý của nước ta nằm trong vùng hay có bão thì việc xét đến ảnh hưởng của gió khi thiết kế kết cấu cầu là rất cần thiết. Để góp phần giải quyết yêu cầu của thực tiễn thiết kế và thi công cầu dây, cuốn sách "**Cơ sở thiết kế chống gió đối với cầu dây nhịp lớn**" được biên soạn dựa trên sự tham khảo các tài liệu nghiên cứu và tiêu chuẩn của một số nước ngoài, kinh nghiệm tính toán chống gió cho các cầu dây văng và cầu dây võng đặc biệt ở Việt Nam đã được thực hiện bởi các tư vấn Nhật Bản, Trung Quốc và Việt Nam. Nội dung chính của cuốn sách là đưa ra những hướng dẫn cơ bản về thiết kế chống gió cho các cầu dây võng và cầu dây văng (xét cả các giai đoạn thi công và giai đoạn khai thác cầu). Tuy nhiên phương pháp xem xét thiết kế tải trọng gió động học cũng có thể tham khảo để dùng chung cho cả các loại cầu đường bộ có nhịp lớn hơn 200m và thuộc dạng kết cấu cứng như cầu khung, cầu dầm, cầu vòm.

Sách được biên soạn lần đầu tiên chắc không tránh khỏi thiếu sót, tác giả mong nhận được nhiều ý kiến đóng góp của bạn đọc để cuốn sách được hoàn thiện hơn trong lần tái bản. Mọi ý kiến xin gửi về Nhà xuất bản Xây dựng 37 Lê Đại Hành Hà Nội hoặc trực tiếp cho tác giả theo địa chỉ email: viettrungng@yahoo.com.

Nhà xuất bản và các tác giả xin chân thành cảm ơn và tiếp thu mọi ý kiến đóng góp và phê bình.

Tác giả

Chương 1

CƠ SỞ LÝ THUYẾT VỀ TÍNH TOÁN CHỐNG GIÓ CHO CẦU DÂY

MỞ ĐẦU

Tính ưu việt của kết cấu cầu dây nói chung (gồm cả cầu dây văng và cầu dây võng) ngày càng được khẳng định không chỉ về mặt kiến trúc mỹ quan hay khả năng vượt nhịp lớn mà cả về mặt công nghệ thi công. Tuy nhiên, ở Việt Nam hiện nay việc xây dựng cầu dây nhịp lớn vẫn còn khá mới mẻ. Đã có một số dự án trong nước hay hợp tác với nước ngoài thiết kế và thi công cầu dây đang được triển khai, góp phần cho việc ra đời những công trình cầu dây hiện đại đầu tiên ở Việt Nam như các cầu: Mỹ Thuận, Kiên, Bãi Cháy, Bình, Rạch Miễu, Cần Thơ, Thuận Phước.

Việt Nam nằm trong vùng hay có bão, việc xét đến ảnh hưởng của gió khi thiết kế kết cấu cầu là rất cần thiết. Do đó trong "Tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN 272-05" có quy định tải trọng gió dùng trong thiết kế, mà chủ yếu chỉ mới quy định về xét tác dụng tĩnh học của gió. Ngoài ra, đối với những loại kết cấu cầu thanh mảnh như cầu dây võng, cầu dây văng, do chúng dễ bị dao động khi có gió nên trong Tiêu chuẩn thiết kế cũng yêu cầu cần phải nghiên cứu tác dụng động học của gió.

Như vậy trong "Tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN 272-05" chỉ đưa ra phương pháp xét tác dụng tĩnh học của gió, chưa đưa ra phương pháp nghiên cứu và cách tính toán cụ thể về xét tác dụng động học của gió đối với kết cấu cầu.

Việc nghiên cứu tính toán chống gió động học cho cầu dây ở nước ta hiện nay đồng thời được tiến hành theo 2 hướng:

Hướng thứ 1: Các Tư vấn thiết kế và Tư vấn thẩm tra Việt Nam do nhu cầu sản xuất đã tìm hiểu và áp dụng các kinh nghiệm, các Tiêu chuẩn tạm thời của nước ngoài để giải các bài toán cụ thể phục vụ ngay cho các dự án cầu dây. Trong quá trình thiết kế và thẩm tra thường có hợp tác với các Tư vấn quốc tế có nhiều kinh nghiệm như Nhật Bản, Trung Quốc, CHLB Đức, v.v... để thẩm tra đồ án, thực hiện các thí nghiệm trong hầm gió nhằm đảm bảo thỏa mãn yêu cầu thiết kế an toàn.

Hướng thứ 2: Các đơn vị nghiên cứu như Viện Khoa học công nghệ - Giao thông vận tải, Đại học Giao thông vận tải, Đại học Xây dựng, một số nghiên cứu sinh đã và đang tiến hành các nghiên cứu sâu về một số bài toán cụ thể như bài toán về Flutter, về thiết bị giảm chấn, về dao động, v.v... Tuy nhiên do điều kiện thí nghiệm Hầm gió ở trong

nước có khó khăn và thiếu thiết bị phù hợp nên chưa có những kết quả cụ thể có thể áp dụng ngay vào công tác thiết kế. Nói chung vào thời điểm hiện nay (năm 2006), trình độ nghiên cứu về lĩnh vực này ở nước ta còn rất yếu, trước mắt chưa thể có ứng dụng thực tế đáng kể.

Tuy nhiên thực tiễn thiết kế cầu dây ở nước ta đòi hỏi phải có một Tài liệu hướng dẫn tính toán chống gió động học cho cầu dây để áp dụng thống nhất cả nước trong giai đoạn tính toán sơ bộ, hoặc tính toán cho những cầu nhịp không quá 150m, trước khi có thể tiến hành các thí nghiệm Hầm gió, là loại hình thí nghiệm cao cấp đòi hỏi nhiều kinh phí và thời gian (có thể phải thuê nước ngoài thực hiện).

Để bước đầu góp phần giải quyết yêu cầu nói trên của thực tiễn thiết kế và thi công cầu dây, dựa trên sự tham khảo các tài liệu nghiên cứu và Tiêu chuẩn của các nước ngoài, kinh nghiệm tính toán chống gió cho các cầu dây văng và cầu dây võng đặc biệt ở Việt Nam đã được thực hiện bởi các Tư vấn Nhật Bản, Trung Quốc và Việt Nam, trong sách này sẽ trình bày những cơ sở về phương pháp suy luận và phương pháp nghiên cứu khi thiết kế chống gió động học. Ngoài ra cũng chỉ ra phương pháp xem xét khi suy luận tải trọng gió để quy định tải trọng gió trong Tiêu chuẩn thiết kế cầu được áp dụng một cách thích hợp.

Nội dung chính của cuốn sách này là đưa ra những hướng dẫn cơ bản về thiết kế chống gió cho các cầu dây võng và cầu dây văng (xét cả các giai đoạn thi công và giai đoạn khai thác cầu). Tuy nhiên phương pháp xem xét thiết kế tải trọng gió động học trình bày ở sách này có nhiều phần có thể tham khảo để dùng chung cho cả các loại cầu đường bộ có nhịp lớn hơn 200m và thuộc dạng kết cấu cứng như cầu khung, cầu dầm, cầu vòm.

Các yếu tố ảnh hưởng đến tính chống gió của cầu được phân biệt rõ ràng như đặc điểm của gió, đặc điểm khí lực học trong cầu và đặc điểm kết cấu cầu.

Để suy luận tính chống gió của cầu, phải điều tra các đặc điểm của gió tại địa điểm thi công cầu qua các việc như quan trắc gió, phải nắm được các đặc điểm khí động lực học của cầu qua các việc như thí nghiệm Hầm gió, thực hiện phân tích chi tiết kết cấu bằng những phương pháp chính xác nhất. Theo các phương pháp này, các cầu dây nhịp lớn ở Việt Nam và trên thế giới đã được tiến hành nghiên cứu tính chống gió. Mặt khác đến nay việc điều tra nghiên cứu liên quan đến tính chống gió đã được thực hiện rất nhiều và đã thu được nhiều kết quả. Dựa trên các kết quả này, để tiến hành thiết kế chống gió có hiệu quả hơn, sách đưa ra một vài công thức suy luận và các giá trị khuyến nghị. Việc quy định công thức suy luận hay giá trị khuyến nghị của các Tiêu chuẩn nước ngoài được tham chiếu ở đây đều dựa trên các tài liệu quan trắc và tài liệu thí nghiệm sẵn có và xét đến độ an toàn. Do đó có thể dùng các công thức suy luận hay các giá trị khuyến nghị này để tiến hành đánh giá tính chống gió cho các cầu nói chung, trừ các cầu có kích thước và hình dạng khác biệt rõ rệt so với các cầu đã có.

Tuy nhiên, đối với trường hợp tính chống gió được kết luận là không tốt qua các nghiên cứu dựa trên công thức suy luận và giá trị khuyến nghị, nhưng kết quả nghiên cứu chi tiết dựa trên các thí nghiệm như thí nghiệm Hầm gió lại đưa ra kết luận ngược

lại là tính chống gió tốt thì sẽ phải mời Hội đồng gồm các Chuyên gia kỹ sư giàu kinh nghiệm của Việt Nam và nước ngoài để xem xét.

Khi gió tác động lên kết cấu cầu, kết cấu nhịp cầu sẽ có những ứng xử tương ứng. Sự kết hợp của tác động gió và các ứng xử của kết cấu nhịp sẽ làm phát sinh các lực khí động mà về lý thuyết có thể phân chia theo 3 phương bao gồm: phương của dòng gió, phương vuông góc với dòng gió và phương góc xoay.

Kết cấu nhịp cầu sẽ có các ứng xử theo 2 dạng cơ bản là:

- Dạng ứng xử thứ 1:

+ Xuất hiện dao động cưỡng bức của kết cấu nhịp do các xoáy khí (hiện tượng *Vortex-Shedding*);

+ Xuất hiện dao động rung lắc ngẫu nhiên (hiện tượng *Buffeting, Gust*) với biên độ giới hạn và không xảy ra tương tác giữa kết cấu nhịp cầu với dòng khí;

+ Ngoài ra còn có dao động do mưa gió gây ra đối với bó cáp chủ (*Rain-Wind induced vibration*) và dao động gập (*Wake induced vibration*).

- Dạng ứng xử thứ 2:

Khi xảy ra tương tác giữa kết cấu nhịp với dòng khí, sẽ xuất hiện các lực tự kích, bổ sung thêm năng lượng làm tăng rất nhanh biên độ dao động của kết cấu nhịp một cách không giới hạn và dẫn đến mất ổn định kết cấu nhịp. Đó là:

+ Dao động tiến triển nhanh (hiện tượng *Gallop*);

+ Dao động tròn tròn (hiện tượng *Flutter*).

Trình tự bài toán thiết kế chống gió động học cho kết cấu nhịp cầu như sau:

(1) **Bước 1:** Khi thiết kế chống gió động học, trước tiên phải suy luận được các đặc trưng của gió ở khu vực xây dựng cầu, sau đó tiến hành các kiểm toán thiết kế và thi công đảm, thiết kế các kết cấu có độ mảnh lớn. Đối với việc xác định các đặc trưng của gió, phải tính được tốc độ gió tiêu chuẩn thiết kế và cường độ hỗn loạn của luồng khí.

(2) **Bước 2:** Tiếp theo, phải đánh giá tính cần thiết của việc thiết kế chống gió động học, nếu thấy là cần thiết thì phải tiến hành kiểm tra theo các công thức kiểm tra. Nếu thoả mãn các công thức kiểm tra này thì tiến hành thiết kế chống gió động học chi tiết.

(3) **Bước 3:** Nếu thấy rằng việc thiết kế chống gió động học là cần thiết thì phải tính ra được các thông số cần thiết cho việc thiết kế chống gió động học thích hợp với nội dung đánh giá, sử dụng các thông số này để đánh giá tính chống gió động học của phương án thiết kế. Cần xem xét tất cả các giai đoạn thi công và giai đoạn khai thác bất lợi nhất. Nếu thoả mãn các điều kiện thì việc thiết kế chống gió động học cho cầu có thể kết thúc.

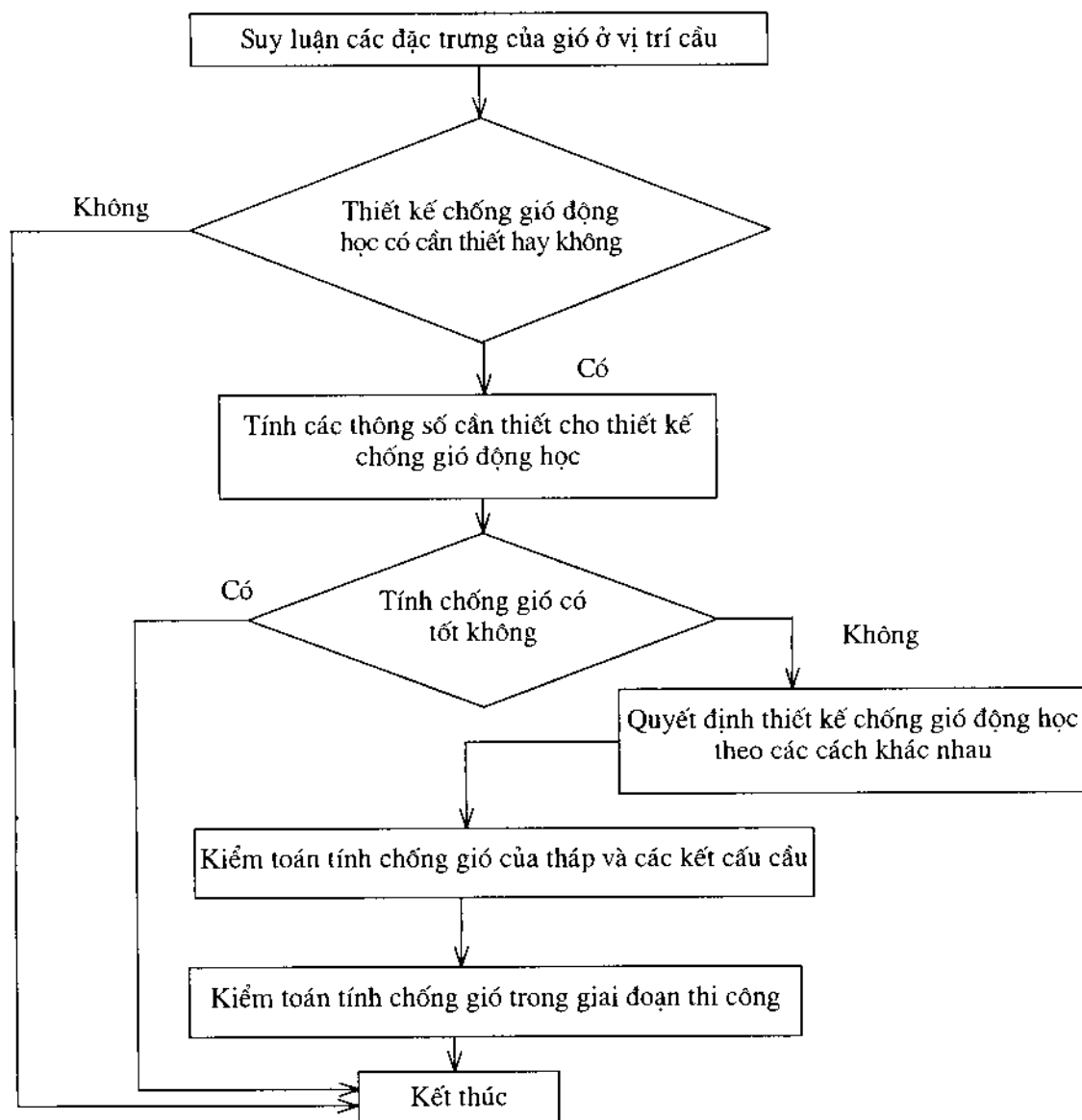
(4) **Bước 4:** Khi thiết kế chống gió động học cho toàn cầu xong, tiếp theo phải xét đến tính chống gió của riêng tháp cầu hay của riêng bộ phận kết cấu nào có độ mảnh lớn và trong giai đoạn thi công, đưa ra các biện pháp giảm chấn hoặc biện pháp tăng cường kết cấu thích hợp nếu cần thiết. Khi các công việc này thực hiện xong thì được coi là hoàn thành việc thiết kế chống gió động học.

Việc thiết kế chống gió động học cho cầu dựa trên các quan niệm sau: Trước tiên, đối với dao động xoáy (*Vortex-Shedding*), điều kiện kiểm tra là:

- Các đặc trưng biên độ dao động không lớn hơn giá trị nhất định,
- Cần thiết kế cấu tạo kết cấu nhịp sao cho nếu tốc độ gió hay biên độ dao động xuất hiện lớn lên rất nhiều thì cũng vẫn không sinh ra các vấn đề về mặt an toàn khai thác cầu và về ứng suất.

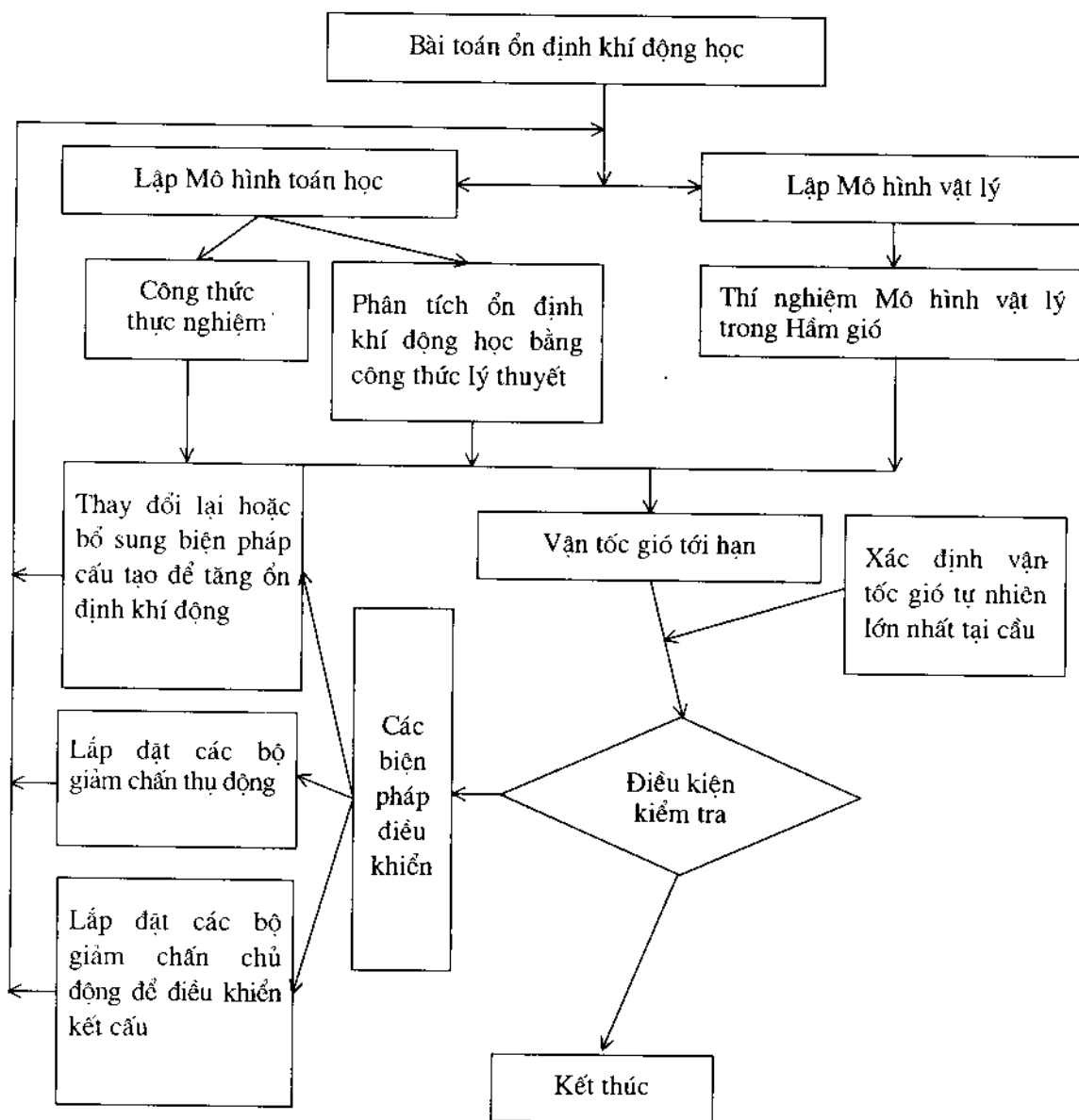
Mặt khác dao động phát tán khi vượt quá tốc độ quy định, có nguy cơ là biên độ dao động sẽ phát triển đột ngột đến một độ lớn nào đó có thể gây nguy hiểm làm hỏng cầu, cho nên phải thiết kế cấu tạo kết cấu nhịp sao cho không phát sinh ra dao động này tại tốc độ gió nhỏ hơn tốc độ gió lớn nhất dự đoán trong thời hạn tuổi thọ khai thác cầu.

Trình tự nói trên được thể hiện rõ trên sơ đồ hình 1.1:



Hình 1.1: Biểu đồ trình tự chung các bước thiết kế chống gió động học

Nói chung quá trình giải bài toán ổn định khí động của cầu dây sau khi cầu đã được đánh giá là phải nghiên cứu về ổn định khí động học và được thể hiện bằng sơ đồ 1.2:



Hình 1.2: Biểu đồ nội dung các bước thiết kế chống gió động học

Bài toán động học của cầu dây xét ở đây chủ yếu là bài toán ảnh hưởng của gió đối với công trình cầu - một trong các vấn đề khó khăn đối với các kỹ sư, chuyên gia thiết kế cầu của Việt Nam. Đây là một vấn đề phức tạp đòi hỏi phải có sự đầu tư nghiên cứu kỹ càng, tốn kém. Một nguyên nhân gây nên sự tốn kém đó là các phương tiện và dụng cụ thí nghiệm quá đắt tiền. Trong phạm vi sách này sẽ chỉ hạn chế đề cập tới lý thuyết cơ bản về gió và biện pháp tính toán ảnh hưởng của gió động đối với cầu theo con đường

nửa thực nghiệm mà không theo con đường lý thuyết nhằm mục đích ứng dụng thực tế trong thiết kế cầu. Giải pháp này đã được chọn khi thiết kế các cầu dây nhíp lớn trên thế giới cũng như ở Việt Nam. Trong sách cũng trình bày một số ví dụ tính toán đối với tải trọng gió trong các cầu dây ở các nước và Việt Nam.

1.1. KHÁI NIỆM CHUNG VỀ TẢI TRỌNG GIÓ

Công trình cầu thường được xây dựng ở nơi trống trải và chịu gió mạnh. Tải trọng gió tác dụng lên cầu phụ thuộc vào kiểu cầu (ví dụ cầu bản, cầu giàn, cầu dầm, cầu vòm, cầu dây, v.v...) cũng như phụ thuộc tốc độ gió, hướng gió, kích thước và hình dạng cầu, các điều kiện địa hình, vùng khí hậu nơi có cầu, v.v... Nói chung, các tác động của gió lên cầu thường được xét theo các đề mục sau:

- Các áp lực gió tĩnh;
- Tác dụng động học của dòng gió thổi;
- Ảnh hưởng của các công trình lân cận làm thay đổi hướng gió và các đặc trưng của dòng gió.

Khi tính toán ảnh hưởng của gió lên các kết cấu nhíp cầu kiểu thông thường, người thiết kế có thể chỉ quan tâm đến áp lực gió tĩnh. Nhưng trong tính toán cầu dây văng và cầu dây văng, các hiện tượng mất ổn định khí động học cần phải được chú ý nhiều hơn. Thường thì áp lực gió tĩnh có thể gây biến dạng cho kết cấu nhíp cầu, còn tác dụng động học của gió thì làm cho kết cấu nhíp cầu bị rung hoặc dao động mạnh. Các cầu dây văng cũng như cầu dây văng đều rất nhạy cảm với tác động của gió, khiến cho kết cấu nhíp dao động theo nhiều dạng thức khác nhau ở tần số thấp và có thể dẫn đến hậu quả phá huỷ cầu. Nếu có 2 cầu đặt quá gần nhau còn có thể xảy ra hiệu ứng Bernoulli khi dòng gió thổi qua khe hở giữa 2 cầu và gây nguy hiểm cho cả 2 cầu đó.

Áp lực gió tĩnh lên cầu được tính toán theo các nguyên lý quen thuộc của Cơ học chất lỏng. Theo lý thuyết Bernoulli thì khi có dòng chất lỏng lý tưởng tác dụng lên vật thể, mức độ tăng áp lực tĩnh sẽ bằng mức độ giảm áp lực động. Cường độ áp lực gió được tính theo phương trình sau [1, 6]:

$$p = 0,5C_p V^2 \quad (1-1)$$

trong đó:

p - áp lực gió (kN/m^2)

ρ - mật độ không khí ($\text{kN.s}^2/\text{m}^4$)

V - tốc độ gió (m/s)

C - hệ số hình dạng, lấy tùy thuộc hình dạng của vật thể cản dòng gió

Trị số của C là khá nhỏ đối với các cấu kiện hẹp và có dạng bề mặt trơn thoát gió (mặt cắt dạng lưu tuyến) và sẽ là trị số lớn đối với cấu kiện to rộng và hình dạng thoát

gió không êm thuận (mặt cắt dạng tày). Hợp lực của lực gió tác dụng lên vật thể cản gió bao gồm thành phần lực nâng theo phương thẳng đứng và lực theo hướng của dòng gió.

1.1.1. Sự biến đổi của tốc độ gió theo chiều cao và theo mức độ gồ ghề của địa hình

Gió có thể coi là sự chuyển động nhiễu loạn của không khí. Chuyển động này có đặc điểm là không quy luật và luôn thay đổi theo thời gian cũng như theo không gian. Trong tính toán công trình thường dùng giá trị trung bình danh định của tốc độ gió. Nếu thành phần xung bằng 0 thì chuyển động dòng gió được coi là êm đều (gió bình quân).

Sự khác nhau giữa tốc độ trung bình và tốc độ thật của gió chính là do thành phần xung của tốc độ, nó gây ra hiện tượng động học trong công trình. Hầu hết các nước đều có các nghiên cứu khảo sát về khí tượng và vẽ được bản đồ tốc độ gió trên khắp lãnh thổ ở cao độ 10 m so với mặt đất. Bản đồ gió theo lãnh thổ của Việt Nam đã được Trung tâm quốc gia khí tượng thủy văn cung cấp.

Áp lực gió lên công trình đặc trưng bởi cột áp lực gió, xác định theo tốc độ gió với xác suất xảy ra trung bình 1 lần trong 5 năm. Áp lực gió tính toán còn được lấy phụ thuộc vào dạng công trình. Trong các Tiêu chuẩn thiết kế công trình của nhiều nước thường xét tốc độ gió lớn nhất trong vòng 100 năm để thiết kế công trình cho an toàn.

Sự thay đổi tốc độ gió theo chiều cao phụ thuộc vào điều kiện địa hình, địa phương. Các tài liệu kinh điển trên thế giới [1, 6] thường đề nghị một quan hệ sau để xác định tốc độ gió V_h ở chiều cao h thông qua giá trị tốc độ V_n ở chiều cao chuẩn $h_n = 10$ m.

$$V_h = V_n(h/h_n)^\alpha \quad (1-2)$$

Chỉ số lũy thừa α được lấy tùy theo điều kiện địa phương như sau:

- Nơi mặt nước thoáng: 0,12
- Nơi không có rừng, thoáng: 0,16 (ví dụ ở cầu Rạch Miễu, tỉnh Tiền Giang)
- Nơi có rừng: 0,28
- Trong thành phố: 0,40

Tốc độ gió V_h là trị số trung bình trong một khoảng thời gian nào đó. Đối với công trình thì tốc độ này cần phải được hiệu chỉnh tăng lên do sự nhiễu loạn chuyển động của dòng gió, do lốc và v.v... Khi đó, dọc theo công trình tốc độ gió tại các điểm là:

$$V_{h,L} = a_g \cdot V_h$$

trong đó:

- a_g - hệ số hiệu chỉnh, được xác định tùy theo bảng 1.1 tương ứng với các chiều dài L_M của công trình và cao độ (hay chiều cao) của nó

Bảng 1.1: Hệ số hiệu chỉnh a_g

H (m)	Hệ số a_g tương ứng với chiều dài L_M của công trình (m)									
110	11,4	11,30	11,24	11,21	11,18	11,16	11,14	11,12	11,10	11,09
330	11,24	11,19	11,16	11,13	11,12	11,10	11,09	11,08	11,08	11,07
550	11,20	11,15	11,13	11,11	11,10	11,09	11,08	11,07	11,06	11,06
770	11,17	11,13	11,11	11,10	11,09	11,08	11,07	11,06	11,06	11,05
1100	11,14	11,11	11,10	11,08	11,08	11,07	11,06	11,05	11,05	11,05

Tương tự, đối với công trình cao thì tốc độ gió tính toán là:

$$V_{hH} = a_H \cdot V_h$$

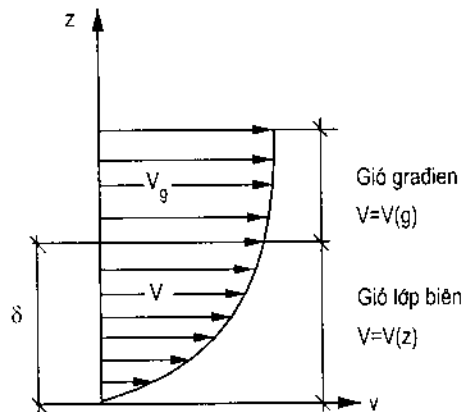
trong đó:

a_H - hệ số hiệu chỉnh, phụ thuộc vào chiều cao H của công trình như trong bảng 1.2:

Bảng 1.2: Hệ số hiệu chỉnh a_H

H (m)	330	440	660	880	1100	1120	1140	1160	1180	2200	2220	2240
a_H	11,50	11,43	11,32	11,26	11,22	11,19	11,17	11,16	11,14	11,13	11,12	11,11

Nói chung, tốc độ gió tăng từ giá trị bằng 0 ở cao độ sát mặt đất cho đến một trị số cực đại nào đó ở chiều cao chừng 0,5 - 1,0 km so với mặt đất. Bề mặt gồ ghề của địa hình sẽ cản trở sự di chuyển của dòng gió. Hiệu ứng này giảm dần theo chiều cao và đến một độ cao δ nào đó thì coi như không còn ảnh hưởng nữa. Độ cao đó gọi là lớp biên của khí quyển tự do. Phần khí quyển ở bên trên lớp biên đó gọi là khí quyển tự do. Độ cao lớp biên cũng còn gọi là *độ cao gradient* và tốc độ gió ở độ cao đó gọi là *tốc độ gradient*. Tốc độ này sẽ không thay đổi theo độ cao nữa.

**Hình 1.3:** Biểu đồ biến đổi tốc độ gió theo độ cao so với mặt đất

Ngoài công thức (1-2) đã nói trên, đối với tốc độ gió còn một quan hệ toán học khác theo dạng hàm Logarit đã được tác giả Liu đề ra từ năm 1991:

trong đó:

với: τ - cường độ gió ở mặt đất

k - hằng số Karman, lấy gần đúng bằng 0,4 dựa trên các thí nghiệm trong Hầm gió và trong khí quyển.

The figure consists of three separate graphs, each showing a wind profile (Gió Gradien) over a different terrain. The vertical axis for all graphs is height (Cao độ z) in meters (m) and feet (ft). The horizontal axis represents wind speed in m/s.

- Left Graph (City):** The terrain is represented by a series of buildings of varying heights. The wind profile curve starts at the ground level and rises steeply, passing through the buildings. The wind speed values at different heights are: 32 m/s at 0 m, 42 m/s at 100 m, 61 m/s at 200 m, 77 m/s at 300 m, 89 m/s at 400 m, and 100 m/s at 500 m.
- Middle Graph (Flat Area):** The terrain is flat with a few small structures. The wind profile curve starts at the ground level and rises more gradually than in the city. The wind speed values at different heights are: 49 m/s at 0 m, 59 m/s at 100 m, 76 m/s at 200 m, 90 m/s at 300 m, and 100 m/s at 400 m.
- Right Graph (Water):** The terrain is a body of water with a sailboat. The wind profile curve starts at the water level and rises very gradually. The wind speed values at different heights are: 70 m/s at 0 m, 79 m/s at 100 m, 91 m/s at 200 m, and 100 m/s at 300 m.

Đối với một kết cấu không quá cao so với mặt đất thì có thể chấp nhận dùng tốc độ gió trên bề mặt để tham khảo suy ra tốc độ gió cho tính toán kết cấu. Điều này đúng với đa số các cầu ở vùng nông thôn. Tuy nhiên có một số bộ phận kết cấu cầu như cột tháp

của các cầu dây là khá cao so với mặt đất. Khi đó không thể dùng tốc độ gió bề mặt là tốc độ gió khống chế cho thiết kế toàn bộ cầu. Sự tăng tốc độ gió theo chiều cao có thể trở thành một yếu tố quan trọng cần xét kỹ trong lúc thiết kế cầu dây. Phần nhô lên quá cao của cầu phải được thiết kế với tốc độ gió cao hơn so với tốc độ gió được dùng để thiết kế những phần thấp hơn của cầu.

1.1.2. Ví dụ đối với cầu Rạch Miễu - tỉnh Tiền Giang

* Tốc độ gió tại Trạm khí tượng Mỹ Tho, tỉnh Tiền Giang:

Vận tốc gió lớn nhất bình quân 10 phút tại chiều cao 10 m cho chu kỳ 100 năm:

$$V_{10,10} = 15 \text{ m/s}$$

Tốc độ gió trận lớn nhất trong khoảng 1-3 giây tại chiều cao 10m cho chu kỳ 100 năm:

$$V_{g,10} = 28 \text{ m/s}$$

* Để thiên về an toàn, tốc độ gió thiết kế sẽ được lấy theo Tiêu chuẩn Châu Âu (Euro Code 1) Phần 2-4 theo vùng II với các *tốc độ gió cơ bản* như sau:

$$+ V_{10,10} = 30 \text{ m/s (giai đoạn khai thác)}$$

$$+ V_{10,10} = 27 \text{ m/s (giai đoạn thi công)}$$

Nếu dựa theo Tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN 272-05 của Việt Nam thì quá trình tính sẽ như sau: Tại vị trí cầu Rạch Miễu ở tỉnh Tiền Giang, địa hình xung quanh khu vực xây dựng cầu có thể được phân loại là loại II, nên được lấy số mũ α của phương trình gió là 0,16; tốc độ gió cơ bản, tốc độ gió lớn nhất hàng năm tại độ cao 10 m với chu kỳ 100 năm, trong địa hình tại khu vực xây dựng cầu được đề nghị lấy giá trị 30,0 m/s ở giai đoạn sử dụng (V_{10}) và bằng 27 m/s ở giai đoạn xây dựng (V_{10}^5). Như vậy cả hai cách tính đều tương tự nhau.

Tư vấn TEDI đã tính "*tốc độ gió thiết kế*" của cầu Rạch Miễu như sau:

Cao độ mặt cầu thiết kế của nhịp giữa cầu Rạch Miễu là 42,757m. Thông thường, mực nước cao nhất và thấp nhất lần lượt là 1,670m, 1,730m và -2,080m. Như vậy chênh cao từ mặt cầu đến mặt nước là 44,8m, và tốc độ gió thiết kế thông thường tại cao độ mặt cầu với giai đoạn khai thác (V_d) được định nghĩa như sau:

$$V_d = V_{10} (44,8 / 10)^{0,16} = 1,271 \times 30 = 38,1 \text{ m/s}$$

Đối với giai đoạn thi công, tốc độ gió thiết kế ở cao độ mặt cầu là V_d^5 lấy bằng 0,9 lần trị số tương ứng của giai đoạn khai thác, tương ứng với chu kỳ lặp lại 25 năm, nghĩa là:

$$V_d = 0,9 \times V_d^5 = 0,9 \times 38,1 = 34,3 \text{ m/s}$$

1.1.3. Một số ví dụ khác

Một số dự án cầu dây ở Việt Nam đã lấy các tốc độ gió như trong bảng 1.3.

Bảng 1.3: Tốc độ gió được xét khi tính toán một số cầu dây ở Việt Nam

Tên cầu dây văng	Tốc độ gió cơ bản $V_{10, 10}$ (m/s)	Tốc độ gió ở cao độ mặt cầu $V_{10, MC}$ (m/s)	Tốc độ gió ở cao độ đỉnh tháp $V_{10, DY}$ (m/s)
Mỹ Thuận	33		
Cần Thơ	40		
Rạch Miễu	30	38,1	
Bính	30		
Bãi Cháy	40	47	50
Kiên	45	47	50

1.2. MỤC ĐÍCH VÀ PHƯƠNG PHÁP THIẾT KẾ CHỐNG GIÓ

Mục đích thiết kế chống gió trước hết là bảo đảm trong giai đoạn thi công cũng như trong giai đoạn khai thác sau khi xây dựng xong, cầu chịu được tác dụng tĩnh của tải trọng gió tối đa và tác dụng động do dao động gió gây ra.

Vì gió tự nhiên gây ra các loại gió tạo ra dao động, nên trong thiết kế chống gió đòi hỏi có độ an toàn đầy đủ giữa tốc độ gió tới hạn gây dao động nguy hiểm so với tốc độ gió thiết kế nhằm đảm bảo sự ổn định chống gió trong các giai đoạn thi công, đồng thời đòi hỏi biên độ dao động lớn nhất của dao động xoáy (hiện tượng *Vortex-Shedding*) và dao động rung lắc (hiện tượng *Buffeting, Gust*) nằm trong phạm vi chấp nhận được, tránh cho kết cấu bị mỏi, người qua cầu khó chịu, hoặc chạy xe trên cầu mất an toàn v.v...

Nếu phương án thiết kế cầu ban đầu không đáp ứng được yêu cầu chống gió động học thì việc sửa đổi thiết kế hoặc dùng các giải pháp khí động học hoặc giải pháp cơ học để nâng cao tính ổn định chống gió của kết cấu nhịp cầu hoặc để giảm biên độ dao động của gió gây ra dao động.

Các đặc tính luồng gió rối trong không trung và đặc tính khí động học của mặt cắt ngang kết cấu nhịp cầu ở vật thể dạng tùy ý không theo quy tắc nào và rất phức tạp, nên hiện nay chưa có cách nào để xây dựng một mô hình toán học miêu tả một cách đầy đủ tác dụng tương hỗ giữa gió và kết cấu, mà chỉ thường dùng các mô hình nửa toán học, nửa thực nghiệm hoặc hoàn toàn thực nghiệm để tìm lời giải gần đúng. Vì vậy, thí nghiệm trong hầm gió là một biện pháp quan trọng không thể thiếu trong việc thiết kế chống gió cho cầu.

Trong các giai đoạn thiết kế cầu khác nhau, có thể tùy tình hình mà sử dụng các phương pháp thiết kế chống gió và các thí nghiệm Hàm gió có độ chính xác khác nhau.

Đối với cầu lớn nói chung, ở giai đoạn thiết kế sơ bộ, có thể dùng các công thức gần đúng để đánh giá nội lực tải trọng gió tĩnh và đặc tính động lực kết cấu trong các phương án. Sau khi đã xác định phương án, sẽ thông qua việc thí nghiệm Hàm gió của các mô hình phân đoạn kết cấu để đo các tham số, kiểm tra việc chống gió và phân tích các loại dao động.

Đối với các cầu quan trọng, ngay trong giai đoạn thiết kế sơ bộ, cần dựa trên kết quả thí nghiệm mẫu mô phỏng phân đoạn kết cấu trong Hàm gió để làm căn cứ chọn tiết diện dầm chủ. Trong giai đoạn thiết kế kỹ thuật, lại đi sâu phân tích dao động gió và kiểm tra các đặc tính chống gió một cách tỉ mỉ đối với phương án mặt cắt kết cấu nhịp đã chọn và xác nhận lại kết quả phân tích bằng các thí nghiệm trong Hàm gió với mô hình 3D toàn cầu.

1.3. CÁC YẾU TỐ QUAN TRỌNG TRONG THIẾT KẾ CHỐNG GIÓ

1.3.1. Các tham số đặc tính của gió

Qua việc điều tra, thu thập số liệu có thể biết được các đặc trưng của các tham số sẽ dùng trong tính toán chống gió tại vị trí cầu và dùng phương pháp chính xác để xác định các tham số hợp lý sử dụng trong thiết kế chống gió. Cần đặc biệt chú ý đến địa hình địa mạo, hướng gió đặc thù tại địa điểm xây dựng cầu để có sự hiệu chỉnh cần thiết đối với các trị số đã lấy theo Tiêu chuẩn.

1.3.2. Đặc trưng động lực học của kết cấu cầu

Việc phân tích đặc trưng động lực học của kết cấu cầu là cơ sở để phân tích dao động do gió. Cần dùng mô hình lực hợp lý và chú ý xử lý chính xác các điều kiện biên. Cần so sánh kết quả tính toán với những cấu tương tự đã xây dựng (tốt nhất là có số liệu đo đặc thực tế để kiểm tra lại tính hợp lý, độ chính xác của nó), trong đó đặc biệt phán đoán chính xác dao động uốn thẳng đứng, uốn ngang, xoắn đối xứng và xoắn phản đối xứng của dầm chủ ở hai bước tính toán đầu.

1.3.3. Tải trọng gió đối với cầu

Tải trọng gió đối với cầu gồm hai phần là tải trọng gió tĩnh và tải trọng gió động. Tải trọng gió tĩnh gồm lực cản, lực nâng và mômen lực. Tải trọng gió động gồm lực quán tính của kết cấu do chấn động của gió gây ra. Vì cần một thời gian kéo dài nhất định để gây ra dao động nên có thể lấy tốc độ gió (bình quân) trong khoảng thời gian dài làm tốc độ gió thiết kế gây ra dao động.

1.3.4. Tốc độ gió tới hạn gây dao động tròn trành (*Flutter*)

Tốc độ gió tới hạn gây dao động tròn trành là tốc độ gió bắt đầu làm cho cầu phát sinh dao động tròn trành. Khi tốc độ gió bên ngoài thấp hơn tốc độ gió tới hạn thì dao động yếu đi. Để đề phòng dao động nguy hiểm làm hư hỏng cầu cần bảo đảm sao cho tốc độ gió tới hạn gây dao động tròn trành (*Flutter*) cao hơn tốc độ gió chuẩn thiết kế có thể xuất hiện ở nơi vị trí cầu và có xét đến hệ số an toàn nhất định.

1.3.5. Ảnh hưởng của dao động rung lắc (*Gust, Buffeting*)

Dao động rung lắc là dao động cường bức biến đổi dưới tác dụng của luồng gió rối. Ảnh hưởng của dao động rung lắc tùy thuộc vào đặc tính động lực của cầu, đặc tính khí động của mặt cắt đầm chủ và đặc tính luồng gió rối.

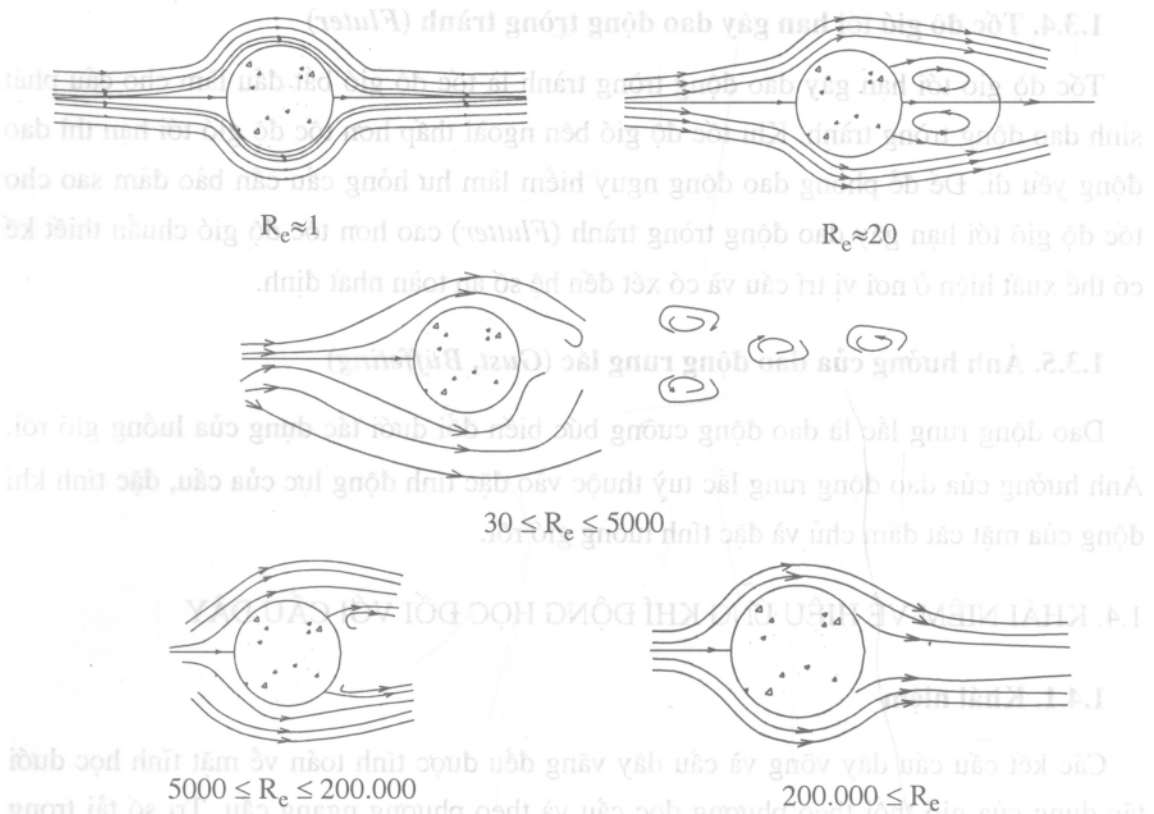
1.4. KHÁI NIỆM VỀ HIỆU ỨNG KHÍ ĐỘNG HỌC ĐỐI VỚI CẦU DÂY

1.4.1. Khái niệm

Các kết cấu cầu dây văng và cầu dây văng đều được tính toán về mặt tĩnh học dưới tác dụng của gió thổi theo phương dọc cầu và theo phương ngang cầu. Trị số tải trọng gió được lấy tương ứng với tốc độ gió trung bình trong khu vực cầu. Tuy nhiên các cầu này còn chịu ảnh hưởng rất lớn của các hiệu ứng khí động lực. Cho đến nay chưa có phương pháp giải tích thuần túy nào đủ chính xác để tính được tác dụng khí động học của dòng gió lên kết cấu cầu, các tính toán chỉ mang tính dự báo gần đúng. Để nghiên cứu các ảnh hưởng đó chỉ có thể căn cứ vào các thí nghiệm trên mô hình kết cấu cầu trong hầm gió và các thí nghiệm hiện trường trên các kết cấu cầu thực tế rồi rút kinh nghiệm và kết hợp với các nghiên cứu tính toán lý thuyết mà hoàn chỉnh dần lý thuyết tính toán dự báo.

Mục đích của các thí nghiệm trong Hầm gió là lựa chọn các đặc trưng độ cứng và đặc trưng hình học của kết cấu công trình sao cho loại trừ được nguy cơ phát triển các dao động nguy hiểm dưới tác động gió với cường độ dự kiến có thể sẽ xuất hiện trong khu vực xây dựng cầu trong thời gian khai thác cầu (ví dụ 100 năm).

Khi dòng khí thổi qua một vật cản (ví dụ đó là kết cấu cầu hay ô tô, máy bay, tên lửa, v.v...) sẽ phát sinh các xoáy khí lần lượt ở hai bên trái và phải ngay sát phía sau kết cấu đó. Các xoáy khí này có thể khiến cho vật thể đang cản dòng khí bị rung động. Tần số phát sinh các xoáy khí phụ thuộc vào hình dạng và kích thước của vật cản gió, tốc độ gió.



Hình 1.5: Sơ đồ xuất hiện các xoáy khí phía sau vật thể hình tròn

(R_e là hệ số Reynold)

Hiện tượng phát sinh các xoáy khí sau vật cản được Th. Von Karman nghiên cứu từ đầu thế kỷ XIX và dòng khí thổi cùng với sự xuất hiện các xoáy khí được mang tên ông. Hiện tượng dao động của kết cấu theo phương thẳng đứng (nâng lên - hạ xuống) do tác dụng này gọi là dao động *Karman*.

Tần số của lực nâng hạ do gió bằng tần số xuất hiện các xoáy khí sau vật cản (hình 1.6). Kết quả nghiên cứu cho thấy tần số này phụ thuộc vào hình dạng, kích thước của vật cản và tốc độ của luồng gió tác động. Mối tương quan giữa tần số dao động Karman với vận tốc của dòng khí và đặc trưng hình dạng kích thước của vật cản thể hiện qua tham số Reynold (R_e) và Strouhal (S) như sau [6]:

$$R_e = \frac{V \cdot B}{\nu} \quad (1-4)$$

trong đó:

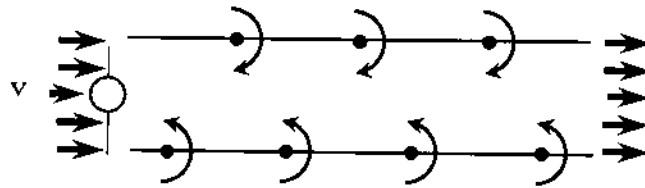
V - tốc độ gió (m/s)

B - chiều rộng cầu (m)

ν - độ nhớt của dòng khí (có thể lấy bằng $0,15 \text{ cm}^2/\text{s}$)

f - tần số phát sinh xoáy khí ở phía sau vật thể (kết cấu nhịp)

h - chiều cao của vật thể cản gió, (chiều dây kết cấu nhịp), đơn vị đo là m



Hình 1.6: Tần số xuất hiện xoáy khí sau vật cản

Mối quan hệ giữa tốc độ gió V , kích thước đặc trưng của vật cản có chiều cao h trong hướng vuông góc với dòng gió (chiều cao hình chiếu vật thể lên mặt phẳng đứng) và tần số phát sinh ω của xoáy khí được thể hiện trong công thức tính trị số Strouhal như sau:

$$S = fh / V \quad (1-5)$$

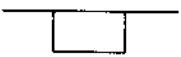
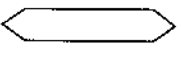
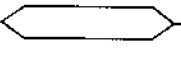
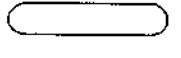
Số Strouhal này phụ thuộc hình dạng vật thể hoặc kết cấu đang cản gió. Ví dụ một hình trụ tròn đường kính d sẽ có số Strouhal bằng 0,22 và rút ra:

$$f = 0,22 \cdot V / d$$

Nếu tần số f trùng hoặc là bội số của tần số dao động riêng của kết cấu, đặc biệt là tần số dao động riêng uốn, thì có nguy cơ xảy ra cộng hưởng.

Mức độ nguy hiểm do khả năng xảy ra cộng hưởng có chiều hướng gia tăng khi chiều rộng cầu hẹp, chiều cao chắn gió của dầm lớn và tần số f cao.

Bảng 1.4: Số Strouhal của các dạng mặt cắt cầu

TT	Hình dạng mặt cắt	S_t	T_h	$\frac{1}{T_h}$
1	2	3	4	5
1		0,12~0,14	0,102~0,256 (0,67)	6
2		0,11~0,19	0,033~0,226 (0,115)	8,9
3		-	0,101~0,153 (0,119)	8,4
4		-	0,070~0,103 (0,085)	11,2
5		-	0,055~0,138 (0,086)	11,6

1	2	3	4	5
6		0,05~0,13		
7		0,11	-	
8		0,17~0,19	0,045~0,200 (0,138)	7,25
9		0,16	-	
10		0,15	-	

Trong Bảng 1.5 ghi các giá trị của số Strouhal tương ứng với các dạng mặt cắt ngang kết cấu nhịp cầu khác nhau và hệ số Reynold khác nhau.

Bảng 1.5: Số Strouhal và Reynold của các mặt cắt điển hình

	S_t							S_t	
	R_e	<30	50	500	10^3				
	S_t	0	0,13	0,20	0,21			→	0,13
	R_e	10^4	10^5	10^6	10^7			←	0,24
	S_t	0,20	0,19	0,21	0,23			↗	0,13
								→	0,14
								←	0,13
								→	0,14
								↑	0,12
	R_e	40	200	10^3				→	0,14
	S_t	0,13	0,17	0,15				↑	0,14
	R_e	10^4	10^5						
	S_t	0,14	0,13						

1.4.2. Xét ví dụ về trạng thái của vật thể trụ tròn nằm trong dòng gió thổi

Trên hình 1.6 đã giới thiệu các trạng thái của vùng xoáy khí dòng gió thổi ngang bao quanh một vật hình trụ tròn (một hình dạng không thuận) có thể đại diện cho tình huống gió thổi ngang qua mặt kết cấu dầm cầu. Điều đặc biệt là các xoáy khí lớn sinh ra từ phía trên và phía dưới ở đằng sau vật trụ tròn theo kiểu có chu kỳ nhất định. Chúng phân bố thành 2 hàng ngay sau vật thể trụ tròn và được gọi là vệt xoáy Karman. Vệt xoáy này dao động và gây ra áp lực lắc giật lên xuống thất thường đối với vật thể trụ tròn. Áp lực đó mang đặc tính động (biến đổi theo thời gian). Tần số của lực lắc giật này bằng tần số phát sinh các xoáy khí và tỷ lệ thuận với tốc độ gió. Trạng thái khí động học phụ thuộc trị số Reynold (R_e).

Sau đây chúng ta xét tỷ mỉ hơn về tình huống nói trên:

- Khi $R_e < 10$ thì dòng khí thổi êm đềm.
- Khi R_e tăng dần lên, phía sau hình trụ tròn xuất hiện 2 xoáy khí cố định, chúng lớn dần lên rồi sau đó tách khỏi dòng gió chính khi $R_e = 40$.
- Khi $R_e \geq 50$ bắt đầu xuất hiện nhiều xoáy khí lần lượt và sắp xếp thành hai dòng xoáy khí ở phía sau vật thể. Trạng thái này tiếp tục cho đến khi $R_e = 150$.
- Khoảng giá trị của R_e ở giữa 150 và 300 là khoảng giá trị chuyển tiếp, dòng xoáy khí thẳng trở thành dòng các xoáy khí nhiễu loạn và các xoáy khí được phát sinh ra một cách hỗn loạn không quy luật.
- Khi $R_e \geq 300$ các xoáy khí lại phát sinh theo chu kỳ và tình trạng này tiếp tục cho đến khi $R_e = 2 \cdot 10^5$.
- Khi giá trị R_e tăng hơn nữa thì các xoáy khí lại phát sinh hỗn loạn cho đến khi $R_e = 5 \cdot 10^6$.
- Khi $R_e > 5 \cdot 10^6$ lại một lần nữa các xoáy khí được phát sinh theo chu kỳ từ phía sau hình trụ tròn.

Đối với một hình trụ tròn đứng yên thì tần số xuất hiện các xoáy khí được xác định bằng số Strouhal (lưu ý: $S = 0,20$ khi $11800 < R_e < 19100$).

Đặc điểm kích thích của các xoáy khí đối với vật thể hình trụ tròn mềm là sự xuất hiện các dao động mạnh theo hướng ngang với hướng gió trong một khoảng biến đổi nhất định của tốc độ gió.

Thí nghiệm cho thấy rằng hình trụ tròn dao động theo hướng dọc và hướng ngang với biên độ ngẫu nhiên và pha ngẫu nhiên và với tần số gần bằng tần số dao động tự nhiên. Khi tốc độ gió tăng lên thì biên độ dao động cũng tăng theo. Điều này đặc trưng cho chế độ chuyển động êm cũng như chuyển động nhiễu loạn, nghĩa là khi $R_e > R_e^*$ thì dao động ngang giảm, trong đó R_e^* là số Reynoldd tương ứng với sự mất sức chịu và giảm sức cản bên hông.

Quan sát các thí nghiệm cho thấy ứng với một tốc độ gió nhất định thì tần số phát sinh các xoáy khí trở nên gần trùng với tần số dao động riêng của hình trụ tròn nằm trong dòng gió và biên độ dao động của hình trụ này tăng lên đột ngột. Như vậy khi đó đã xảy ra cộng hưởng gió, tương ứng với tốc độ gió tới hạn và mất khả năng giảm chấn của vật thể hình trụ tròn.

1.4.3. Xét ví dụ về trạng thái của bản thẳng đứng nằm trong dòng gió thổi

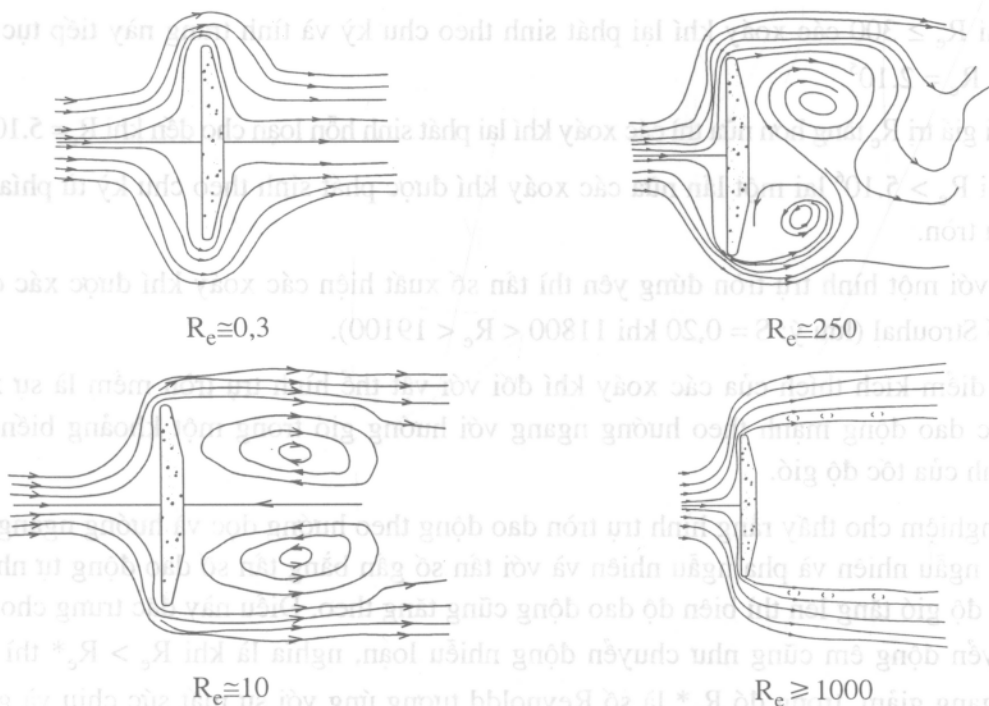
Hình 1.7 cho thấy trạng thái dòng khí thổi qua một bản đặt thẳng đứng có 2 mép vát nhọn, tương ứng với các giá trị khác nhau của số Reynold.

- Khi số Reynold còn rất nhỏ ($R_e = 0,3$) thì dòng gió lượn quanh các mép vát phía trên và phía dưới của bản rồi lại chuyển động êm thuận tiếp tục.

- Khi tốc độ gió tăng lên, trị số Reynold cũng tăng theo đến $R_e = 10$ thì dòng khí bị phân tách thành hai dòng ở phía sau mép bản và 2 xoáy khí lớn xuất hiện đối xứng tạo ra vùng xoáy ngay sát phía sau bản.

- Khi mà trị số Reynold tăng đến $R_e = 250$ thì hai xoáy khí đối xứng sau bản bị mất tính đối xứng và thay thế bằng các xoáy khí biến đổi lần lượt theo chu kỳ thành các vùng xoáy nhiều như trên hình vẽ.

- Nếu trị số Reynold tăng cao đến lớn hơn 1000 thì nói chung sẽ xuất hiện một vùng xoáy nhiễu loạn phía sau bản. Lúc này không có các xoáy khí lớn nữa mà chỉ có một chuỗi nhiều xoáy khí nhỏ ở các mép trên và mép dưới phía sau bản, xung quanh đó là dòng chảy đều êm thuận.



Hình 1.7: Mô tả các dòng khí xoáy phía sau bản thẳng đứng

1.4.4. Suy luận đối với kết cấu nhịp cầu

Đối với kết cấu nhịp cầu, tình huống phát sinh các xoáy khí cũng tương tự như đối với cánh máy bay. Quá trình biến động lên xuống thất thường của vùng xoáy khí gây ra các lực động học thẳng đứng tác dụng lên dầm cầu. Nếu tốc độ gió đạt đến mức nào đó khiến cho tần số phát sinh các xoáy khí gần xấp xỉ bằng tần số riêng của dầm cầu thì dầm cầu sẽ dao động rất mạnh với biên độ lớn đột ngột. Đó là dạng dao động uốn xảy ra trong mặt phẳng ngang với hướng gió. Khi tốc độ gió tăng lên nữa thì tần số xuất hiện các xoáy khí sẽ vượt quá tần số riêng của kết cấu khiến cho mức độ dao động của cầu lại giảm đi. Đến một tốc độ gió cao hơn nữa thì sự phát sinh các xoáy khí sẽ không theo chu kỳ nữa.

Như vậy, để đảm bảo an toàn cho kết cấu thì các kỹ sư thiết kế cầu luôn phải thiết kế sao cho tần số riêng của kết cấu nhịp cầu khác biệt nhiều so với tần số phát sinh các xoáy khí.

Do ảnh hưởng của các xoáy khí tác dụng lần lượt lên vật cản gió sẽ sinh ra một lực chu kỳ, hướng vuông góc với hướng của dòng gió. Lực này có thể viết dưới dạng quy luật điều hoà như sau:

$$P = 0,5 \rho V^2 C_S S \sin(2\pi\omega t) \quad (1-6)$$

trong đó:

ρ - mật độ không khí

V - tốc độ gió

ω - tần số góc

t - thời gian

S - diện tích hình chiếu vật cản gió lên mặt phẳng vuông góc với hướng dòng gió.

C_S - hệ số, phụ thuộc vào hình dạng vật cản gió (ví dụ đối với hình trụ tròn $C_S = 1$)

Nếu một trong các tần số riêng của kết cấu nhịp cầu trùng với tần số biến đổi của lực kích động P thì có thể xảy ra dao động cộng hưởng rất nguy hiểm. Các kết cấu cầu dầm, vòm, khung bằng BTCT thường có khối lượng rất lớn so với khối lượng của các xoáy khí cho nên những dao động như thế chỉ coi như ảnh hưởng của độ nhạy cảm với gió của kết cấu. Các dao động này không thể gây ra ứng suất lớn hoặc phá huỷ cầu. Nhưng đối với kết cấu cầu dây văng hay cầu dây văng thường có trọng lượng tương đối nhẹ và nhịp dài thì mối nguy hiểm nhất chính là các quá trình động học phức tạp, liên quan đến sự phát triển biến dạng lớn của kết cấu nhịp đang bị dao động, dẫn đến sự biến đổi theo chu kỳ của các lực khí động đang tác dụng lên kết cấu nhịp.

1.4.5. Xét trạng thái của bản phẳng nằm nghiêng góc trong dòng gió thổi

Nếu dòng gió gặp một vật cản hình bản phẳng nằm nghiêng một góc α so với hướng gió thì sẽ xuất hiện áp lực gió tác dụng lên bản phẳng đó. Thành phần của áp lực gió này

theo hướng của dòng gió được các nhà nghiên cứu hàng không gọi là "lực cản bên hông". Thành phần áp lực vuông góc với hướng gió được gọi là lực nâng (hình 1.8). Góc α được gọi là góc hướng gió. Công thức tính lực nâng là:

$$L = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_L \cdot S \quad (1-7)$$

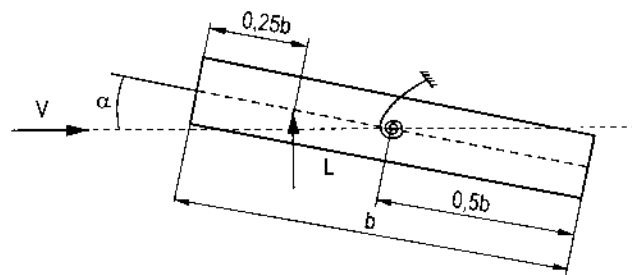
trong đó:

- ρ - mật độ không khí
- V - tốc độ gió
- C_L - hệ số lực nâng
- S - diện tích bản phẳng cản gió

Hệ số lực nâng C_L là đại lượng không thứ nguyên và theo kinh nghiệm thì phụ thuộc tuyến tính vào góc hướng gió α như sau:

$$C_L = a \cdot \alpha \quad (1-8)$$

Hệ số tỷ lệ a cũng là hằng số và gọi là độ dốc của đường cong của lực nâng. Giá trị theo kinh nghiệm của a thường xấp xỉ bằng 5. Đối với những bài toán động học cầu dây, có tác giả đề nghị lấy $a = 4$. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh rằng điểm đặt lực nâng ở tại khoảng 1/4 bề rộng bản phẳng tính từ mép trước của bản. Điểm tương ứng trên mặt cắt ngang được đặt tên là tâm khí động.



Hình 1.8: Sơ đồ hướng gió tác dụng nghiêng góc với vật thể hình bản phẳng

Trong các sơ đồ tính toán cầu dây có thể giả thiết rằng khi bị xoắn thì mặt cắt ngang kết cấu nhịp sẽ xoay quanh một trục nằm trong mặt phẳng đối xứng dọc của kết cấu nhịp. Do tâm khí động (hình 1.8) nằm lệch so với trục xoắn nên tác động của dòng khí sẽ gây ra mô men xoắn. Đối với các trị số góc α nhỏ thì mô men xoắn này có thể lấy gần đúng thông qua lực nâng. Xét đến các công thức (1-7) và (1-8) chúng ta có:

$$M_{xoắn} = \frac{bL}{4} = \frac{ba}{4} \alpha \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 S \quad (1-9)$$

Mô men xoắn rải dọc nói trên sẽ gây ra biến dạng xoắn của kết cấu nhịp. Xét mô hình đơn giản là một bản cứng được liên kết vào trục quay bằng một lò xo đàn hồi. Lò xo này sẽ tạo ra một mô men hồi phục m khi có góc quay α :

$$m = c\alpha \quad (1-10)$$

trong đó: c- trị số đặc trưng cho độ cứng của lò xo

Tuy nhiên ứng với tốc độ gió V và độ cứng c nào đó của lò xo thì trạng thái tới hạn của sơ đồ tính toán đang xét sẽ là tình huống khi giá trị của mô men hồi phục, xuất hiện do lực đàn hồi của hệ thống, cân bằng với trị số của mô men xoắn do lực khí động gây ra, nghĩa là:

$$m = M$$

$$c\alpha = \frac{ba}{4} \cdot (\rho V^2 S \alpha/2) \quad (1-11)$$

Chia phương trình (1-11) cho c sẽ có công thức như sau:

$$(1 - \frac{1}{c} \frac{ba}{4} \frac{1}{2} \cdot \rho V^2 S) \cdot \alpha = 0 \quad (1-12)$$

Bởi vì $\alpha \neq 0$ nên điều kiện xác định tốc độ, tương ứng với trạng thái tới hạn sẽ là khi thành phần trong dấu ngoặc của công thức (1- 12) dẫn tới 0.

Từ đó được:

$$V_{th} = \sqrt{\frac{8c}{ba\rho}} \quad (1-13)$$

Tốc độ này có tên gọi là tốc độ phát tán, còn hiện tượng xoắn một kết cấu đàn hồi trong dòng khí và sự xuất hiện một trạng thái cân bằng tới hạn nào đó được gọi là hiện tượng phát tán.

Có thể tổng quát hoá các kết quả nhận được đối với trường hợp xoắn một bản đàn hồi có độ cứng GJ_d và mép dọc của nó bị liên kết chống quay. Sau đây đưa ra cách giải dưới dạng ma trận với sơ đồ bản đàn hồi nói trên được chia thành các đoạn có chiều dài bằng nhau d và sử dụng các ký hiệu sau:

φ - véc tơ góc quay đối với các điểm giữa của mỗi đoạn

M - véc tơ các mô men của các lực khí động

$L = d/(GJ_d)$. C - ma trận ảnh hưởng góc quay của các đoạn bản

B - chiều rộng bản

$a = 4$

$q = 0,5 \cdot V^2$

Khi đó tương ứng với công thức (1- 9) có thể viết:

$$M = qdb^2\varphi \quad (1-14)$$

Do ý nghĩa vật lý của bài toán mà sẽ có:

$$\varphi = LM \quad (1-15)$$

Từ đó chúng ta nhận được hệ phương trình tuyến tính, tương tự về ý nghĩa với phương trình (1-9):

$$(C - \lambda E)\varphi = 0 \quad (1-16)$$

với

$$\lambda = GJ_d / (qd^2 b^2) \quad (1-17)$$

Điều kiện tồn tại nghiệm của hệ phương trình là:

$$|C - \lambda E| = 0$$

Giá trị nghiệm lớn nhất λ_1 của phương trình đặc trưng nói trên tương ứng với biểu thức (1-17) sẽ chính là tốc độ tới hạn nhỏ nhất của dòng gió. Để xác định nghiệm λ_1 này thì cách đơn giản hơn cả là dùng phương pháp lũy thừa. Đối với tốc độ phát tán (mất ổn định ngang), sẽ có:

$$V_{th} = \sqrt{\frac{2GJ_d}{d^2 \cdot b^2 \rho \lambda_1}} \quad (1-18)$$

Cần lưu ý rằng tính chất đàn hồi của sơ đồ tính toán đang xét đã được biểu thị qua ma trận L, còn tính chất khí động học của sơ đồ đã được biểu thị qua ma trận qdb^2E .

Lời giải nói trên chỉ tương ứng với điều kiện coi lực quán tính không có ảnh hưởng gì đến kết quả tính toán.

Trị số tốc độ phát tán (mất ổn định ngang) cho phép chúng ta hình dung về các nguy cơ xảy ra khi tốc độ gió cao.

1.4.6. Xét trạng thái của kết cấu nhịp cầu dây

Ma trận L cũng có thể được lập ra cho một sơ đồ kết cấu không gian đầy đủ của cầu dây văng để phản ánh được đầy đủ điều kiện về liên kết giữa dầm cứng với các dây cáp văng của cầu, cũng như phản ánh được sự phân bố lại nội lực trong các dây cáp chịu lực của cầu treo dây văng khi đặt tải không đối xứng lên kết cấu nhịp cầu này.

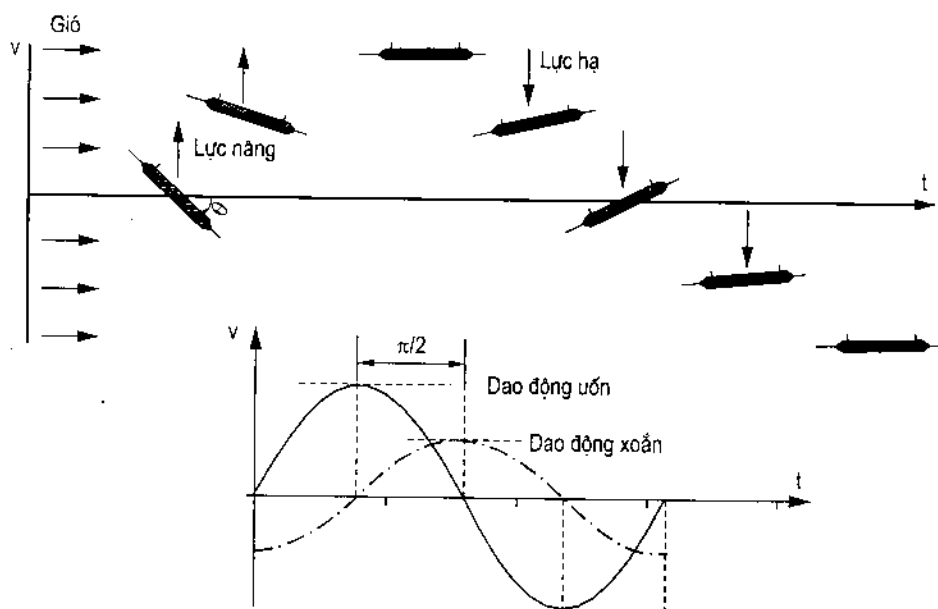
Tuy nhiên cần lưu ý rằng sự phá huỷ cầu do gió luôn xảy ra do dao động quá lớn. Như vậy lời giải đầy đủ hơn của bài toán về trạng thái nguy hiểm của cầu dây sẽ phải xét đến lực quán tính và mang đặc tính động học.

Một dạng tác động khác của gió đối với công trình cầu là dao động tự kích thích. Dao động thẳng đứng do việc hình thành các xoáy khí thuộc dạng dao động kích thích, trong trường hợp này các lực kích thích tạo ra năng lượng làm cho công trình tự dao động theo

tần số của mình gọi là hiện tượng dao động tự kích thích. Ảnh hưởng của dao động tự kích thích sinh ra hiện tượng "vẫy" của một số bộ phận công trình tương tự như trường hợp của cánh máy bay.

Hiện tượng mất ổn định khí động do cộng hưởng đồng thời của nhiều dao động có nguyên nhân liên quan tới các dao động tự kích thích dẫn tới nguy cơ phá hoại công trình gọi là hiện tượng *Flutter*. Đối với kết cấu nhịp cầu thì hiện tượng *Flutter* xuất hiện chủ yếu khi có sự cộng hưởng giữa các dao động uốn và xoắn.

Đối với các công trình cầu có nhịp lớn, kết cấu thanh mảnh như các hệ giàn thép, cầu treo dây văng hay cầu dây văng thì vấn đề ổn định khí động thường là nhân tố quyết định mức độ an toàn của công trình. Thực tế xây dựng đã chứng minh rằng phần lớn các sự cố xảy ra đối với các cầu dây trước đây đều có nguyên nhân liên quan đến hiện tượng không đủ khả năng chịu tác động của gió. Trên hình 1.9 mô tả hiện tượng *Flutter* đối với hệ dầm chính của cầu dây văng với trường hợp dao động uốn và dao động xoắn có cùng tần số và lệch pha nhau với độ lệch $\pi/2$. Tốc độ gió có ảnh hưởng trực tiếp tới khả năng xảy ra mất ổn định khí động, khi tốc độ gió đạt tới mức độ gần tới tốc độ xảy ra cộng hưởng, kích thích dao động và làm tăng biên độ dao động một cách đột ngột gây mất ổn định. Tốc độ gió nguy hiểm sẽ có trị số khác nhau phụ thuộc vào cấu tạo của từng công trình cầu cụ thể và gọi là vận tốc gió tới hạn (V_{gh}).



Hình 1.9: Hiện tượng *Flutter* đối với dầm cầu

Người ta đã nghiên cứu lý thuyết về *Flutter* của một bản liên kết đàn hồi có 2 bậc tự do trong dòng gió. Nhưng đáng tiếc là chưa có lời giải tổng quát cho các hệ thống phức

tạp hơn vì những khó khăn về mặt toán học. Hơn nữa bài toán *Flutter* còn bị phức tạp hoá thêm bởi phải xét đến ảnh hưởng giạt của các xoáy khí đối với hệ thống kết cấu nằm trong dòng gió. Dạng dao động này có tên gọi riêng là dao động *Flutter* giạt. Lý thuyết về hiện tượng này còn chưa hoàn thiện và ở nhiều nước các nghiên cứu đều đi theo con đường dùng thí nghiệm mô hình kết hợp với lời giải lý thuyết để phục vụ thiết kế ngay các cầu dây mà không đi theo đường lối nghiên cứu lý thuyết hoàn toàn.

1.5. CÁC BÀI TOÁN CƠ BẢN VỀ ĐỘNG HỌC KẾT CẤU CẦU

1.5.1. Các bài toán động học cơ bản

Các kết cấu cầu hiện đại đều có xu hướng nhẹ hơn và do đó nhạy cảm hơn với các vấn đề động học. Vì thế trong thiết kế cầu luôn phải chú ý đến việc tính toán dao động. Các dao động của kết cấu nhịp cầu có thể chia ra 2 loại:

- Loại dao động nguy hiểm về mặt cường độ (độ mỏi) đối với kết cấu;
- Loại dao động ảnh hưởng đến sức khỏe và tâm - sinh lý của người qua cầu.

Như vậy mọi tính toán động học đối với cầu đều phải vừa đảm bảo an toàn kết cấu và vừa đảm bảo sự tiện nghi trong khai thác cầu.

Vấn đề ổn định khí động của cầu cần phải được kiểm tra không chỉ đối với điều kiện khai thác mà cả với các điều kiện trong thời gian đang thi công. Chính trong lúc thi công thường xảy ra các tình huống bất lợi nhất vì các tần số dao động riêng lúc này đều thấp và tỷ số giữa tần số dao động riêng xoắn với tần số dao động riêng uốn có thể chỉ gần bằng 1 (rất nguy hiểm). Đặc biệt đó là tình huống khi đang thi công cầu treo dây văng. Do vậy phải quan tâm kỹ đến việc tính toán ổn định khí động học của cầu này.

Các dao động khí đàn hồi, hấp thụ năng lượng của dòng khí có thể chuyển thành hiện tượng *Flutter* nếu gặp một số điều kiện nhất định. Xin nhắc lại là cần phân biệt 2 loại hiện tượng là *Flutter* cổ điển và *Flutter* giạt.

Nếu dòng khí thổi qua kết cấu một cách êm đềm (dòng gió thổi đều) thì có thể quan sát thấy hiện tượng *Flutter* cổ điển. Khi tốc độ gió yếu, các dao động khí đàn hồi sẽ bị tắt dần do tác dụng giảm chấn sẵn có của bản thân kết cấu nhịp cầu. Khi tốc độ gió tăng lên đến thời điểm mà khả năng giảm chấn đối với một trong các dao động nào đó trở nên bằng 0. Như vậy đã đạt đến trạng thái tới hạn thứ nhất của *Flutter*, sẽ dẫn đến sự tăng rất nhanh biên độ dao động với tần số tương ứng. Đối với các kết cấu nhịp cầu thì hiện tượng *Flutter* cổ điển này thường mang đặc tính mất ổn định do dao động uốn - xoắn kết hợp.

Hiện tượng *Flutter* giạt xuất hiện khi có nhiễu loạn dòng gió sau khi gió thổi qua một kết cấu vật cản gió có hình dạng không lưu tuyến và hiện tượng này mang nhiều đặc tính dao động xoắn. Khi đó sự phát sinh các xoáy khí sẽ gây ra các lực khí động, các lực này

gây ra dao động. Nếu tần số xuất hiện của các xoáy khí gần trùng với tần số riêng của kết cấu sẽ dẫn đến cộng hưởng (hiện tượng *Flutter* giật). Tùy theo tốc độ gió và tính chất giảm chấn của bản thân kết cấu mà các dao động cộng hưởng này có thể gây phá huỷ hoặc không gây phá huỷ nhưng đều gây ra mỏi kết cấu. Trên thực tế các đặc trưng của dao động khí đàn hồi phức tạp hơn nữa và còn gây nhiều khó khăn cho việc giải quyết triệt để vấn đề này.

Lịch sử xây dựng cầu trên khắp thế giới đã cho thấy việc không xét hay xét không đầy đủ đến các hiệu ứng khí động học có thể dẫn đến thảm họa phá huỷ kết cấu nhịp cầu.

Trên đây mới nhắc đến dao động của kết cấu dầm cứng, nhưng các cột tháp của cầu dầm cũng bị dao động dưới tác dụng của dòng gió. Lấy ví dụ trường hợp cầu Sitka ở Hoa Kỳ, cầu này có 2 dầm hộp, các dây cáp văng được bố trí trong 2 mặt phẳng thẳng đứng. Cột tháp của cầu dạng thẳng đứng có mặt cắt chữ nhật với kích thước các cạnh dọc cầu bằng 92 cm, ngang cầu bằng 122 cm, chiều cao cột tháp là 30,5 m. Qua việc thường xuyên quan sát các cột tháp dao động trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng bố trí các dây văng, người ta đã phát hiện dao động này do gió thổi dọc cầu và gây ra những xoáy khí mà tần số của chúng ứng với tốc độ gió $10,8 \div 11,7$ m/s là trùng với tần số dao động riêng uốn của các cột tháp. Biên độ dao động lớn nhất ở đỉnh cột tháp đạt đến 14,3 cm khi tần số bằng 1,17 Hz. Khi đó ở đáy cột đã xuất hiện ứng suất bổ sung bằng 33 MPa.

Như vậy tác động của gió lên công trình nói chung có thể mô tả như sau:

Gió tạo ra áp lực tĩnh (tải trọng tĩnh), điều này luôn luôn được xét đến lúc thiết kế cầu. Các tác động xung giật của gió sẽ gây ra các lực kích động khiến công trình bị dao động. Những cấu kiện mềm của kết cấu như dây cáp thường có mặt cắt hình trụ tròn, khi tốc độ gió đạt đến trị số nhất định mà tần số phát sinh các xoáy khí trùng với tần số riêng của cấu kiện cản hướng dòng gió sẽ gây ra cộng hưởng và cũng gây ra các ứng suất bổ sung.

Cuối cùng, trong những kết cấu khá mềm có mặt cắt ngang không tròn, sự mất ổn định khí động có thể phát triển dần dần rồi dẫn đến phá huỷ kết cấu.

Như vậy có thể nhận xét rằng bài toán động học quan trọng nhất đối với cầu dây xiên là bài toán khí động học.

1.5.2. Các nghiên cứu ổn định khí đàn hồi

Sự ổn định khí đàn hồi của cầu phụ thuộc vào các yếu tố sau đây:

- Dạng hình học của kết cấu nhịp cầu:

Xét các dạng mặt cắt ngang chung của dầm cứng. Dạng này có thể thuộc loại ổn định khí động học hoặc thuộc loại dễ mất ổn định khí động học. Các dạng mặt cắt dầm đặc

hoặc mặt cắt chữ H của cầu kiểu giàn hờ và những dạng mặt cắt không thuần khác (không lưu tuyến) đều có thể bị mất ổn định khí động. Có thể tăng khả năng ổn định bằng cách chọn dạng mặt cắt thuần để thoát gió hoặc các dạng mặt cắt hờ nhưng có hệ giằng chống gió ở cao độ mặt xe chạy. Tuy nhiên dạng mặt cắt ngang kết cấu nhịp cầu bị hạn chế bởi các tỷ lệ nên không cho phép dùng loại hình dạng khí động học giống như dạng cánh máy bay.

- Các tần số dao động riêng của kết cấu cầu:

Dạng mặt cắt kết cấu nhịp cầu có thể có khả năng chịu xoắn kém hoặc tốt. Một ví dụ về dạng mặt cắt chịu xoắn tốt là dạng mặt cắt hộp kín hoặc mặt cắt kiểu giàn cao có mặt cầu kín và hệ thống giằng chống gió ở phía dưới đáy giàn. Dạng mặt cắt kết cấu hình chữ H là dạng kém chịu xoắn. Độ ổn định khí đàn hồi sẽ được đảm bảo nếu kết cấu nhịp có tỷ số giữa tần số riêng xoắn và tần số riêng uốn của kết cấu là đủ lớn.

- Tính chất giảm chấn cơ học của kết cấu cầu:

Độ ổn định khí đàn hồi của kết cấu nhịp cầu có thể được cải thiện bằng cách tăng tỷ số giảm chấn cơ học của kết cấu nhịp cầu, nghĩa là tăng tỷ số của hệ số демпнớt và hệ số демпнớt tới hạn. Trong quá trình chuyển động, nội ma sát sẽ tăng lên trong hệ kết cấu và có hiệu ứng như một lực làm tắt dần dao động.

Một số nghiên cứu về tải trọng gió trên các kiểu cầu khác nhau và các phương pháp lý thuyết để tính toán chúng đã được trình bày trong nhiều tài liệu, tuy nhiên do bản chất cực kỳ bất định của lực gió và sự phức tạp của các tính toán nên các Tiêu chuẩn AASHTO (từ 1992 đến 2004) đều đưa ra những trị số thực nghiệm về áp lực gió cho các kiểu cầu khác nhau.

Hiệu ứng động học của gió được xét đến chủ yếu trong các cầu dây văng và cầu dây văng. Tần số và biên độ dao động của cầu là các hàm số của sự biến đổi lực gió biến đổi thất thường và các đặc trưng động học của cầu tạo kết cấu nhịp cầu.

1.6. CÁC LỰC KHÍ ĐỘNG HỌC

1.6.1. Xét trường hợp tổng quát về tác động tương hỗ của vật thể có hình dạng bất kỳ với dòng khí

Một dầm cứng của cầu dây đang dao động trong dòng gió có thể kích thích gây ra các xoáy khí với tần số phát sinh nhất định, những xoáy khí này toả ra từ các mép biên của dầm cứng của cầu dây. Khi đó chúng gây ra xung áp lực, có thể phân tách thành các thành phần theo hướng dòng khí (lực cản bên hông, còn gọi là lực nằm ngang) và thành phần vuông góc với dòng khí (lực nâng thẳng đứng).

Nếu tần số phát sinh các xoáy khí trùng với tần số dao động riêng thì sẽ xảy ra cộng hưởng dao động với biên độ rất lớn, đặc biệt là trong trường hợp kết cấu có khả năng giảm chấn yếu. Với các góc hướng khác nhau của dòng gió thì sẽ xuất hiện các lực nâng, gây dao động uốn trong mặt phẳng thẳng đứng và gây ra cả dao động xoắn, nếu tần số của hai dạng dao động này xấp xỉ bằng nhau.

Các nghiên cứu đã khẳng định kết luận là *phải thiết kế kết cấu nhịp sao cho các tần số riêng của dao động xoắn và của dao động uốn khác nhau khá nhiều để đảm bảo an toàn cho cầu*. Theo kết quả nghiên cứu của Giáo sư J.Mathivat (người Pháp) thì khi thiết kế phải chọn cấu tạo cầu sao cho tỷ số giữa f_B và f_T cần chênh lệch nhau ít nhất 2,5 lần nhằm tránh tác dụng cộng hưởng. Nhưng lời khuyên này mới chỉ có giá trị đối với các nhịp cầu không lớn và đối với giai đoạn thiết kế sơ bộ. Để có kết luận chính xác đối với mỗi cầu dây cụ thể còn cần phải tiến hành thí nghiệm mô hình trong hầm gió.

Dưới tác dụng của dòng gió thì trong mặt cắt ngang nhịp cầu, thêm vào các nội lực tĩnh, còn phải kể đến 3 tác động là:

- Tải trọng nằm ngang T;
- Tải trọng thẳng đứng N;
- Tải trọng mô men xoắn M.

Các tác động này lại phụ thuộc vào các yếu tố sau đây:

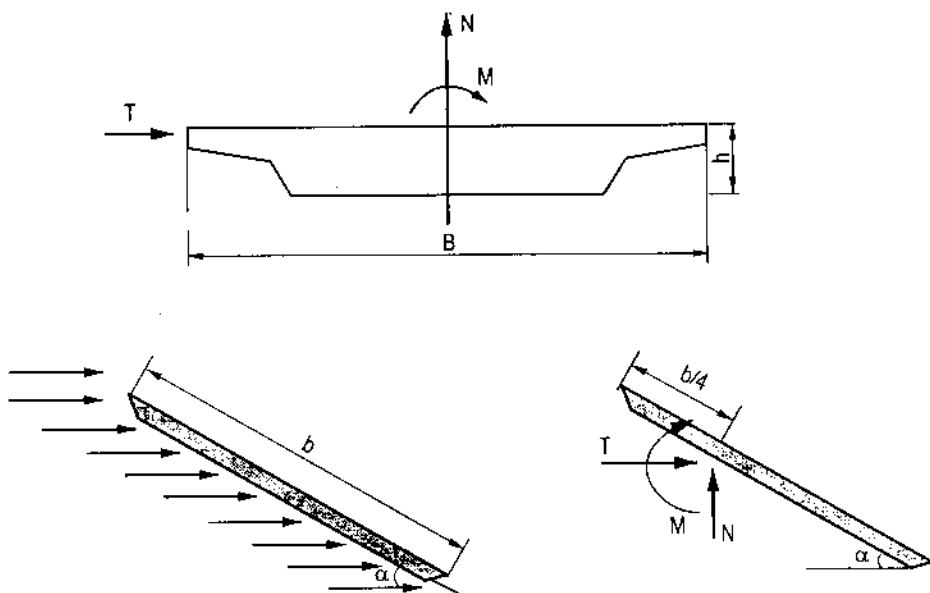
- Áp lực gió q;
- Hình dạng mặt cắt kết cấu nhịp (hệ số C_T, C_N, C_M);
- Góc tác dụng của gió lên kết cấu nhịp α .

Các đặc trưng định lượng của hình dạng mặt cắt có thể tìm thấy trong các tài liệu dựa trên rất nhiều kết quả thí nghiệm trên khắp thế giới. Ví dụ, để xác định các hệ số hình dạng C_T, C_N, C_M thì phải làm thí nghiệm (trên mô hình chẳng hạn). Sơ đồ đặt tải lên mặt cắt ngang cầu như hình 1.10:

$$\begin{aligned} T &= C_T \times q \times h \times L \\ N &= C_N \times q \times h \times L \\ M &= C_M \times q \times b \times h \times L \end{aligned} \quad (1-22)$$

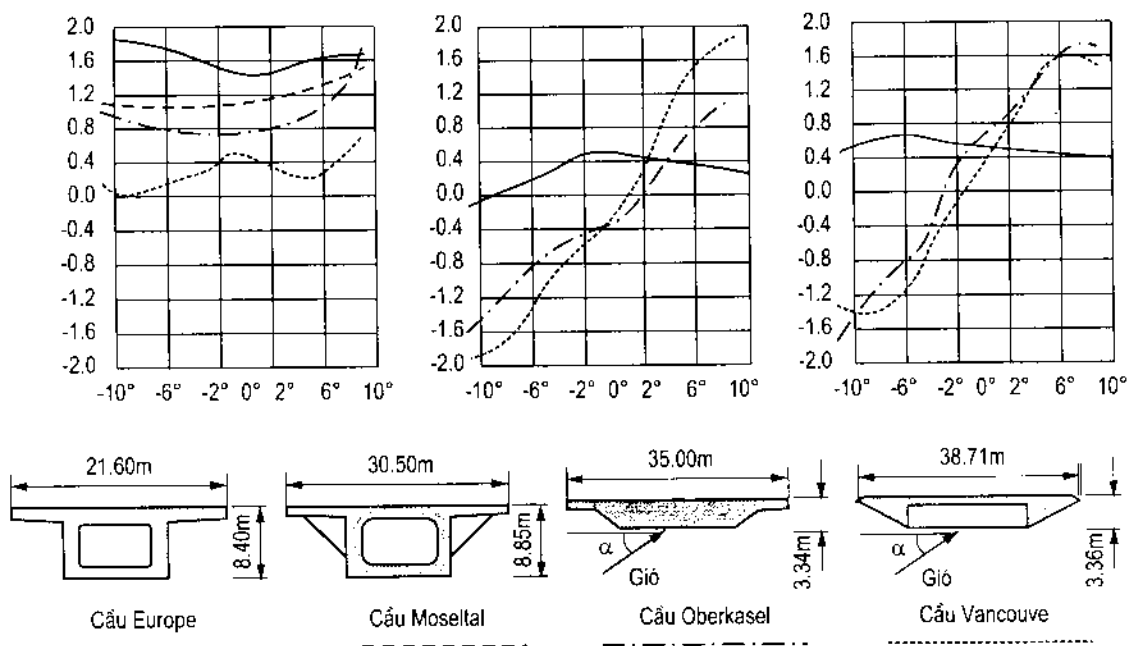
trong đó:

- L - chiều dài cầu
- h - chiều dây tổng cộng của kết cấu nhịp
- b - chiều rộng kết cấu nhịp



Hình 1.10: Các lực khí động T, N, M

Trên hình 1.11a mô tả các biểu đồ kết quả thí nghiệm đối với 4 hình dạng mặt cắt ngang cầu điển hình. Các đường cong biểu đồ của mỗi hệ số được vẽ tùy thuộc góc tác dụng α của dòng gió lên kết cấu nhịp [5].



Hình 1.11a: Các hệ số C_T, C_N, C_M đối với 4 hình dạng mặt cắt ngang cầu điển hình lấy tùy theo góc tới của dòng gió tác động lên kết cấu nhịp

Kết quả phân tích các hệ số ảnh hưởng của lực ngang, lực nâng hạ và mô men xoắn tác dụng lên kết cấu nhịp trên hình 1.11a cho thấy:

Hệ số áp lực ngang C_T phụ thuộc vào góc tác động của gió, chiều cao chắn gió H và hình dạng của mặt cắt ngang. Dạng mặt cắt ngang dùng cho cầu Moseltal nhờ cấu tạo thêm các sườn nghiêng phụ đã tạo khả năng thoát gió tốt hơn dẫn tới giảm trị số của hệ số áp lực ngang C_T gần 1,33 lần so với mặt cắt ngang của cầu Europe cho dù chiều cao đầm lớn hơn. So sánh tương tự đối với các loại mặt cắt ngang dùng cho cầu Oberkasel và cầu Vancouver cho thấy trị số này giảm tới 2 - 4 lần do hình dạng cho phép thoát gió tốt hơn.

Trong Tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN 272-05, hệ số C_T được ký hiệu khác đi là C_d và được quy định về cách tính toán theo điều 3.8.1.2.1 dùng để tính tải trọng gió thổi theo hướng ngang cầu. Xin nhắc lại như sau:

- Hệ số cản C_d phải tính theo các phương pháp sau:

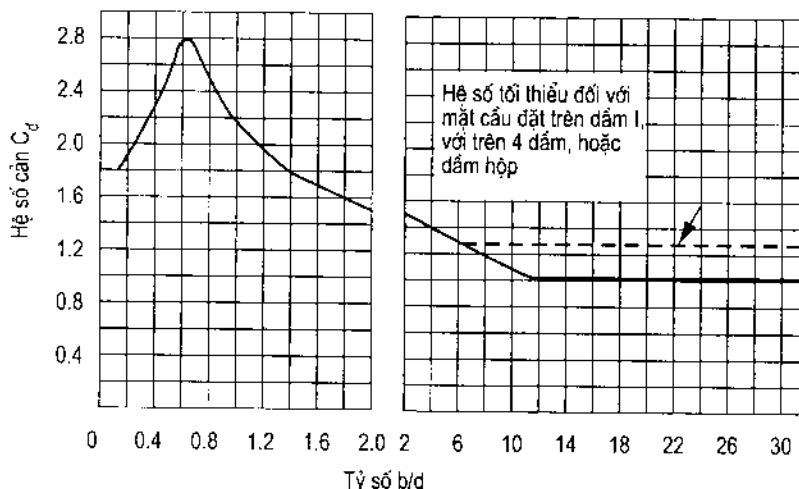
- Đối với kết cấu nhịp có mặt hứng gió đặc, khi kết cấu quy đổi có các mép cạnh dốc đứng và không có góc vuốt đáy đáng kể về khí động phải lấy C_d theo hình 1.11b (3.8.1.2.1 của 22TCN 272 - 05), trong đó:

- b - chiều rộng toàn bộ của cầu giữa các bề mặt lan can (mm)

- d - chiều cao kết cấu nhịp bao gồm cả lan can đặc, nếu có (mm)

- Đối với kết cấu nhịp giàn, lan can và kết cấu phần dưới phải lấy lực gió đối với từng cấu kiện với các giá trị C_d theo Tiêu chuẩn TCVN 2737 - 1995 Bảng 6 hoặc theo tài liệu khác mà được Chủ đầu tư duyệt.

- Đối với mọi kết cấu nhịp khác, phải xác định C_d trong Hầm thí nghiệm gió.



Hình 1.11b: (3.8.1.2.1.1 - của Tiêu chuẩn 22TCN 272-05)
Hệ số cản C_d dùng cho kết cấu phần trên có mặt hứng gió đặc

Ghi chú: (dùng cho hình 1.11b):

1- Các giá trị cho trong hình dựa trên giả thiết là mặt hứng gió thẳng đứng và gió tác dụng nằm ngang.

2- Nếu mặt hứng gió nghiêng so với mặt thẳng đứng, hệ số cản C_d có thể được giảm 0,5% cho mỗi độ nghiêng so với đường nằm ngang và tối đa được giảm 30%.

3- Nếu mặt hứng gió có cả phần đứng lẫn phần dốc hoặc 2 phần dốc nghiêng với góc khác nhau, tải trọng gió phải lấy như sau:

a) Hệ số cản cơ bản C_d tính với chiều cao toàn bộ kết cấu

b) Đối với từng mặt đứng hệ số cản cơ bản tính trên được giảm theo ghi chú 2.

c) Tính tải trọng gió tổng cộng bằng cách dùng hệ số cản thích hợp cho các diện tương ứng.

4- Nếu kết cấu nhíp được nâng cao, phải lấy C_d tăng lên 3% cho mỗi độ nghiêng so với đường nằm ngang, nhưng không quá 25%.

5- Nếu kết cấu nhíp chịu gió nghiêng không quá 5° so với hướng nằm ngang, phải tăng C_d lên 15%. Nếu góc nghiêng vượt 5° phải chia hệ số cản cho một hệ số theo thí nghiệm.

6- Nếu kết cấu nhíp được nâng cao đồng thời chịu gió nghiêng, phải lấy hệ số cản theo kết quả khảo sát đặc biệt.

Hệ số áp lực thẳng đứng C_N phụ thuộc vào góc tới của gió và hình dạng mặt cắt ngang của hệ mặt cầu. Trị số của hệ số này chênh lệch rất lớn có thể tới 5 lần tùy thuộc vào dạng mặt cắt.

Hệ số mô men xoắn C_M diễn biến phức tạp hơn tùy thuộc vào góc tới của gió, chiều cao h , chiều rộng b của hệ mặt cầu và hình dạng mặt cắt ngang của kết cấu nhíp.

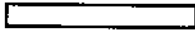
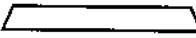
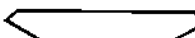
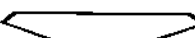
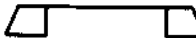
Tác động của các luồng gió thường không ổn định mà tạo ra các lực nêu trên thay đổi theo thời gian gây ra các dao động nằm ngang, dao động thẳng đứng và dao động xoắn tác động lên kết cấu nhíp cầu. Như trên đã nêu, khả năng cộng hưởng dẫn đến nguy hiểm sẽ xảy ra nếu tần số của các dao động trên xấp xỉ hoặc là bội số của nhau. Để tránh nguy cơ này khi thiết kế cần tính toán chọn cấu tạo kết cấu sao cho tần số dao động riêng uốn theo phương thẳng đứng, dao động riêng uốn theo phương ngang và dao động riêng xoắn thỏa mãn các trị số an toàn.

Để giảm bớt trị số của các lực tác động do gió, các kỹ sư thiết kế thường sử dụng hai giải pháp chính là:

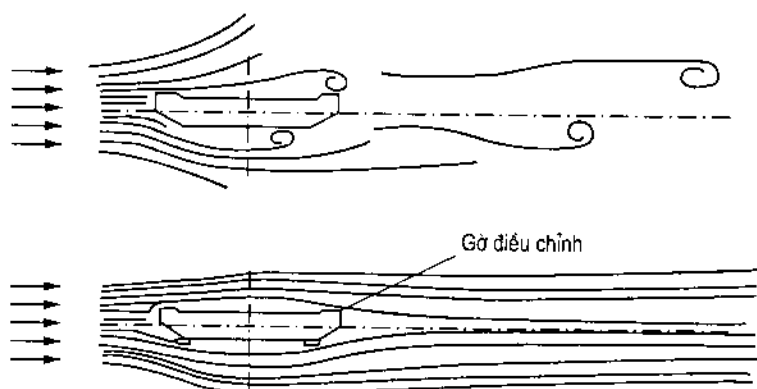
- Chọn dạng mặt cắt ngang phù hợp để giảm tác dụng của gió;
- Cấu tạo các gờ điều chỉnh để giảm tác động gió.

Trong Bảng 1.6 là các dạng mặt cắt ngang thông dụng của kết cấu nhíp dầm cùng với các kích thước tương ứng và các đánh giá về khả năng chịu gió.

Bảng 1.6: Đánh giá tính thích hợp về khả năng chịu gió
của các dạng mặt cắt ngang

B/H				
6.0	xấu	xấu	xấu	xấu
7.7	xấu	xấu	trung bình	trung bình
8.8	xấu	xấu	trung bình	trung bình
10.0	xấu	xấu	khá	khá
B/H				
6.0	xấu	xấu	khá	tốt
7.7	xấu	xấu	khá	tốt
10.0	xấu	xấu	khá	tốt
B/H				
6.0	xấu		xấu	
7.7	trung bình			
8.8	tốt		tốt	
10.0	tốt		tốt	

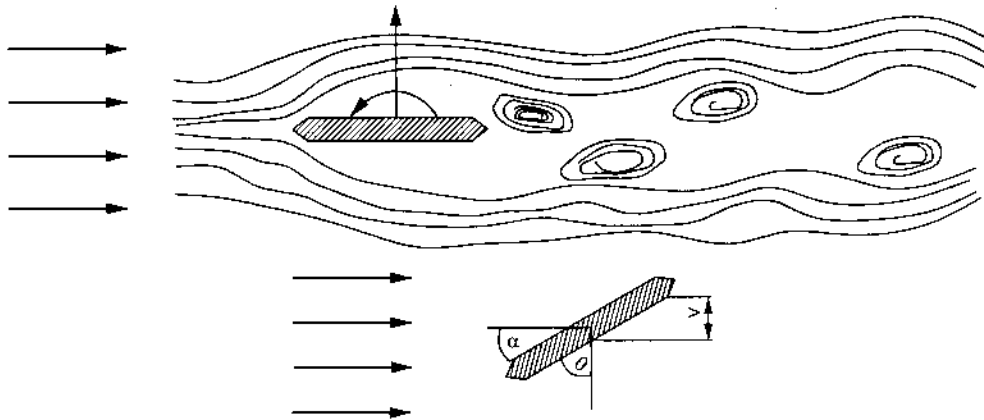
Cấu tạo các gờ để điều chỉnh luồng gió đi vòng qua mặt cắt ngang dầm cũng là một trong các giải pháp có hiệu quả và dễ thực hiện để giảm bớt các ảnh hưởng khí động. Trên hình 1.12 mô tả hiệu quả của việc cấu tạo các gờ điều chỉnh qua phân tích thí nghiệm thổi gió cho các phương án mặt cắt ngang của cầu Saint-Nazaire ở nước Pháp.



Hình 1.12: Tác dụng của gờ điều chỉnh để giảm bớt ảnh hưởng khí động

Hiện tượng *Flutter* khi xảy ra ở mức độ cao sẽ kéo theo sự nhiễu loạn của dòng khí sau khi đi qua mặt cắt kết cấu nhịp (hình 1.13). Nói chung, nếu hình dạng mặt cắt không

thuôn, khó thoát gió êm thuận thì hiện tượng xoáy khí nhiễu loạn sẽ xảy ra phía sau mặt cắt dẫn đến nguy cơ xảy ra dao động cộng hưởng.



Hình 1.13: Mô tả hiện tượng Flutter

Trong trường hợp tổng quát, tác động của gió lên công trình sẽ làm xuất hiện các lực động học gồm: sức cản bên hông, lực nâng và mô men xoắn.

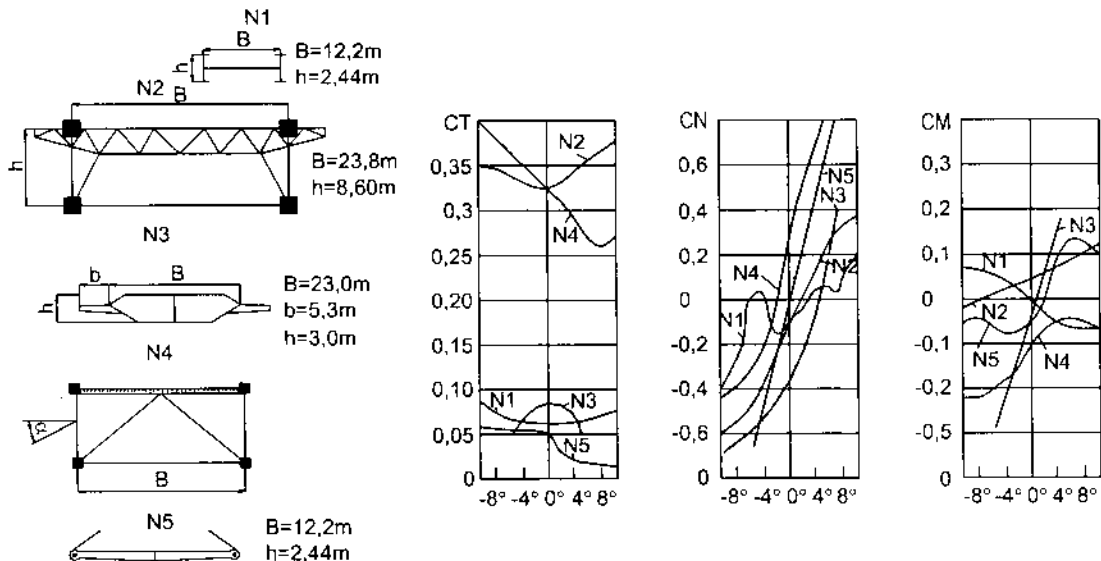
Lực rải đều dọc theo nhịp có chiều dài l m là:

- Lực cản nằm ngang: $q_x = T / L = q B C_T$ (1-23)

- Lực nâng thẳng đứng: $q_y = N / L = q B C_N$ (1-24)

- Mô men xoắn: $m = M / L = q B^2 C_M$ (1-25)

$q = 0,5 \rho V^2$ (1-26)

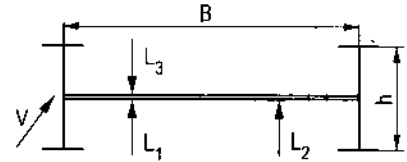


Hình 1.14: Các biểu đồ hệ số C_i tương ứng với một vài dạng mặt cắt dầm cứng của cầu dây

Các lực khí động phụ thuộc vào tốc độ gió cũng như góc hướng thổi tới của gió, hình dạng và kích thước mặt cắt ngang vật thể. Các đồ thị của các hệ số C_i đối với các dạng mặt cắt kết cấu nhịp khác nhau (hình 1.14), nhận được từ thực nghiệm với mô hình của một dốt dầm cứng trong Hầm thí nghiệm gió khác nhau và đã vẽ trên hình 1.14. Đối với các vật thể hình lăng trụ có mặt cắt nhiều góc cạnh thì các hệ số C_i thực tế là không phụ thuộc vào hệ số Reynold.

1.6.2. Các đặc điểm của lực khí động

Khi dòng khí tác động lên mặt cắt vật thể dưới một góc nào đó thì sẽ xuất hiện lực nâng, điểm đặt và hướng của lực nâng phụ thuộc vào hình dạng và các tham số của mặt cắt ngang. Để làm ví dụ chúng ta xét mặt cắt hình chữ H như hình 1.15. Vị trí hợp lực và hướng của các lực nâng L_1 , L_2 , và L_3 tương ứng với 3 trạng thái ổn định khí động:

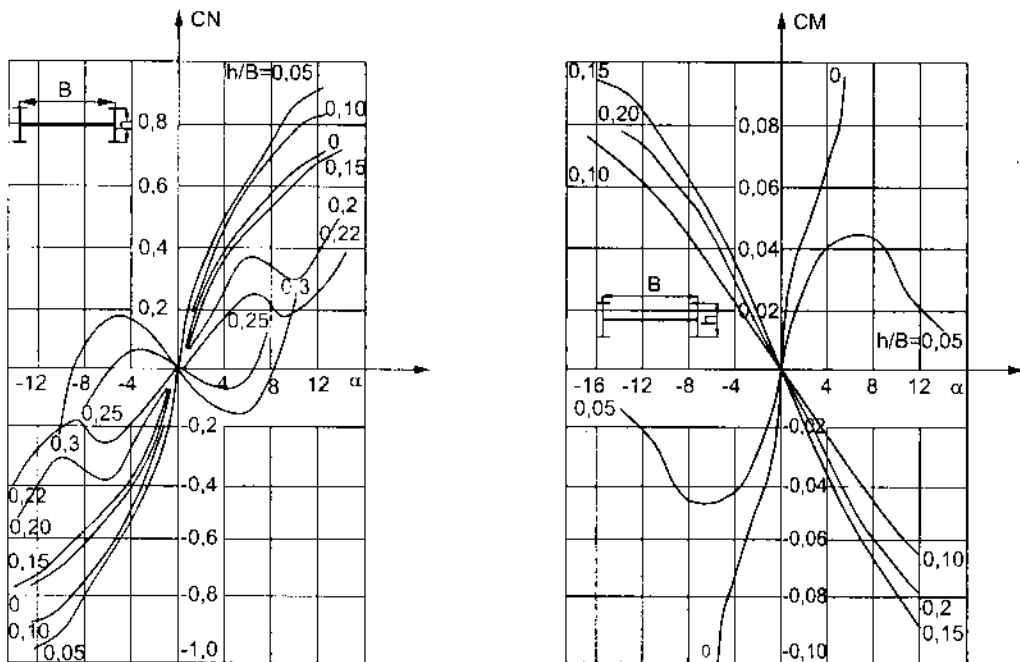


Hình 1.15: Sơ đồ tác dụng của lực nâng lên mặt cắt chữ H

- Khi $h/B < 0,08$ và L_1 thì mặt cắt ở trạng thái lý tưởng là ổn định đối với dao động thẳng đứng cũng như đối với dao động xoắn.

- Khi $h/B = 0,08 - 0,24$ và L_2 là tình huống thường gặp nhất, tương ứng với trạng thái mặt cắt không ổn định về chịu mô men xoắn.

- Khi $h/B \geq 0,24$ là tình huống hãn hữu, ít gặp nhất, bất lợi nhất cả về chịu mô men xoắn và chịu mô men uốn.

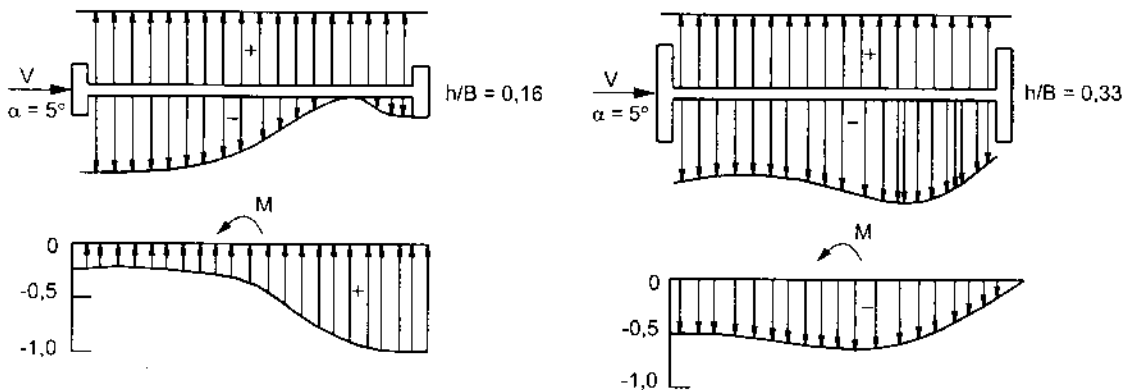


Hình 1.16: Biểu đồ hệ số C_N và C_M của mặt cắt chữ H

Các hệ số khí động của lực nâng và của mô men xoắn (hình 1.16) theo 3 trạng thái đó tương ứng với các giá trị dương và hoặc âm của đạo hàm:

- Trường hợp 1: $C'_N > 0$, $C'_M > 0$;
- Trường hợp 2: $C'_N > 0$, $C'_M < 0$;
- Trường hợp 3: $C'_N < 0$, $C'_M < 0$;

Đặc tính phân phối của áp lực khí động theo bề rộng mặt cầu khí góc hướng của gió bằng 5° được vẽ trên hình 1.17.



Hình 1.17: Sơ đồ phân bố áp lực khí động lên mặt cắt chữ H

1.7. KHÁI NIỆM VỀ TÍNH TOÁN FLUTTER

Bài toán ổn định của một vật thể đàn hồi nằm trong dòng khí liên quan đến một chuyên ngành cơ học đặc biệt, đó là lý thuyết khí đàn hồi với phạm vi ứng dụng chủ yếu trước đây là trong ngành hàng không.

Tuy nhiên các hiện tượng khí đàn hồi như hiện tượng phát tán (*Divergence*) và hiện tượng *Flutter* là đặc trưng không chỉ đối với các kết cấu máy bay mà cả đối với các kết cấu cầu dây văng và cầu dây văng.

Lý thuyết phát tán: là lý thuyết về dạng xoắn của sự mất ổn định tĩnh, trước tiên đã được nghiên cứu ứng dụng cho cánh máy bay. Tuy nhiên ngay cả trong lĩnh vực kết cấu xây dựng cũng đã có nhiều thành tựu nghiên cứu về vấn đề ổn định uốn - xoắn kết hợp.

Lý thuyết *Flutter*: là lý thuyết về dao động kết cấu trong dòng khí được phát triển trước tiên cho các ứng dụng của ngành hàng không. Bài toán *Flutter* là bài toán kiểu mới của lý thuyết ổn định đàn hồi và yêu cầu phải có một đường lối giải quyết mới đặc biệt.

1.7.1. Các công thức tính toán chính

Tần số phát sinh xoáy khí phụ thuộc vào độ lớn của vận tốc gió. Nếu tần số đó gần bằng một trong các tần số dao động riêng uốn của kết cấu thì có thể có nguy cơ xảy ra

cộng hưởng. Nguy cơ này chỉ bị hạn chế bởi khả năng kháng chấn của kết cấu thể hiện qua đặc trưng δ .

Số *Strouhal* có giá trị trung bình bằng 0,20 đối với mặt cắt hình trụ tròn với đường kính là h , hoặc giá trị trung bình bằng 0,10 đến 0,20 đối với mặt cắt kết cấu nhịp cầu có chiều dày là h . (Giá trị 0,10 tương ứng với tình huống các xoáy khí chỉ phát sinh ở một bên của mặt cắt). Nói chung các kết quả nhận được là không phụ thuộc số *Reynold* (số $R_e = 10^5 - 10^7$). Độ lớn của các lực chu kỳ nảy sinh ra sẽ phụ thuộc tốc độ gió và hình dạng mặt cắt ngang. Một kết cấu nhịp thanh mảnh và thuận gió sẽ là hình dạng hợp lý nhất xét theo quan điểm chịu gió tốt.

- Tính toán lực nâng và biên độ dao động Karman

Lực kích động chu kỳ do sự hình thành các xoáy gió gây ra (lực *Karman*) được tính theo công thức:

$$F(t) = F_0 \sin \omega.t \quad (1-27)$$

trong đó:

ω - tần số góc dao động cường bức của gió xoáy phụ thuộc vào các chỉ số *Strouhal* (S) và chỉ số *Reynold* (R_e);

$$F_0 = (\rho V^2/2) C.h$$

h - chiều cao hứng gió của dầm;

ρ - khối lượng riêng của không khí (xấp xỉ bằng $1,3 \text{ kg/m}^3$)

C - hệ số hình dạng, đặc trưng chịu lực của mặt cắt ngang nhịp, phụ thuộc tần số f và tốc độ V

$$V(t) = \frac{\pi}{\delta} \frac{1/k}{B} \rho \frac{V}{2} C.h \sin \omega.t \quad (1-28)$$

trong đó:

δ - suất giảm logarit (lấy gần đúng bằng 0,05)

$1/k$ - độ mềm kết cấu liên quan đến tải trọng F_0 trên một đơn vị bề mặt cầu (F_0/B)

b - chiều rộng kết cấu nhịp

Biên độ dao động sẽ là:

$$y = \frac{\pi}{\delta} \frac{1}{kB} \left(\rho \frac{V}{2} Ch \right) = \frac{\pi}{\delta} \frac{1}{k} \frac{F}{B} = \frac{\pi}{\delta} y_{\text{tính}} \quad (1-29)$$

trong đó

$y_{\text{tính}}$ - độ võng tĩnh do lực F_0 gây ra

Trong nội dung thiết kế các công trình cầu, để hạn chế ảnh hưởng do dao động *Karman* cần khống chế biên độ dao động nhỏ và tần số thấp.

- Kiểm tra tốc độ giới hạn lý thuyết của hiện tượng *Flutter*

Để đảm bảo cho kết cấu không bị phá hoại do hiện tượng *Flutter* cần dùng khái niệm về tốc độ giới hạn của gió (V_{gh}). Tốc độ giới hạn này phụ thuộc vào tỷ số ε giữa tần số dao động riêng về uốn với xoắn của kết cấu.

Để xét đến ảnh hưởng của hình dạng tiết diện dầm cầu, bằng phương pháp nửa thực nghiệm Kloppel đã đưa thêm vào hệ số điều chỉnh η .

$$\eta = \frac{V_{gh,tt}}{V_{gh,lt}}$$

trong đó:

$V_{gh,lt}$ - tốc độ giới hạn lý thuyết của gió khi xét ảnh hưởng *Flutter*.

$V_{gh,tt}$ - tốc độ giới hạn thực tế của gió khi xét ảnh hưởng *Flutter*.

η - hệ số điều chỉnh được xác định từ các mô hình thí nghiệm thổi gió và có thể lấy như sau:

$\eta = 0,8$ với tiết diện thoát gió tốt;

$\eta = 0,1$ với dầm đặc, tiết diện hở.

Điều kiện đảm bảo an toàn là tốc độ giới hạn của gió tìm được khi xét đến hiện tượng *Flutter* ($V_{gh,u}$) cần phải lớn hơn tốc độ lớn nhất của gió có thể xảy ra ở khu vực xây dựng cầu.

1.7.2. Hiệu chỉnh kết quả tính toán dựa trên kết quả mô hình thực nghiệm

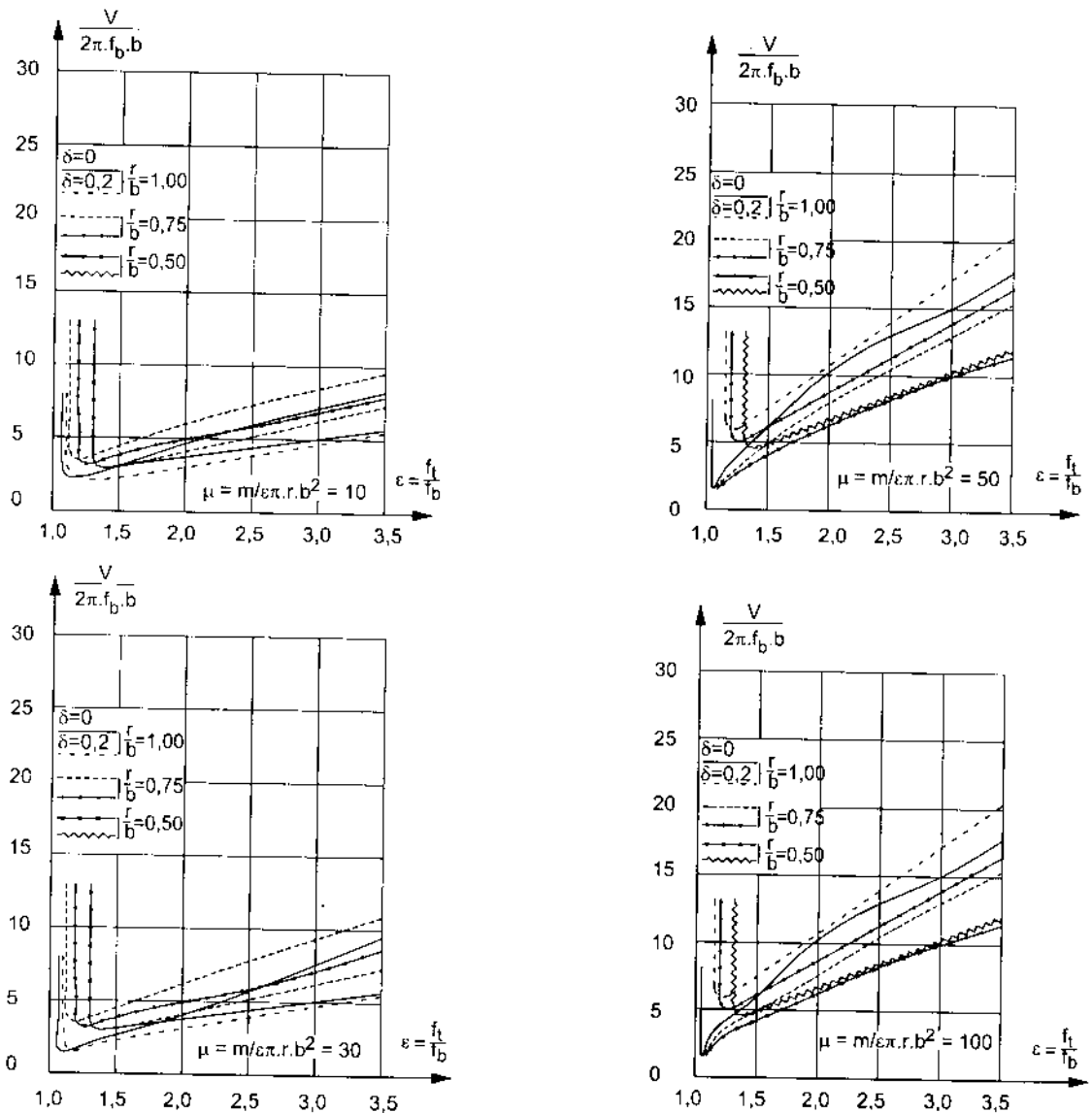
Các công thức trên đây chỉ xét cho trường hợp lý thuyết chung. Trên thực tế cần phải hiệu chỉnh các kết quả tính toán lý thuyết theo những kết quả thu được từ thực nghiệm trong Hầm gió.

Trái với hiện tượng cộng hưởng, các lực được cung cấp năng lượng trong trường hợp *Flutter* này là do sự chuyển động của chính kết cấu. Sự mất ổn định thường được biểu thị trước bằng hiện tượng *Flutter* (sự tròn trành trong dòng gió). Bắt đầu từ một tốc độ gió nhất định (gọi là tốc độ gió giới hạn V_{gh}) thì kết cấu nhịp nhận thêm phần năng lượng mà nó không thể triệt tiêu đi bằng khả năng tự giảm chấn. Khi đó sẽ xảy ra chuyển động uốn và xoắn kết hợp do các lực khí động với các biên độ tăng nhanh đột ngột đến nỗi phá huỷ kết cấu.

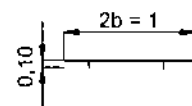
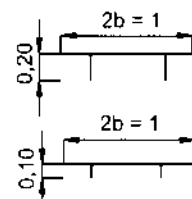
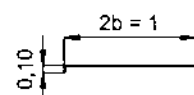
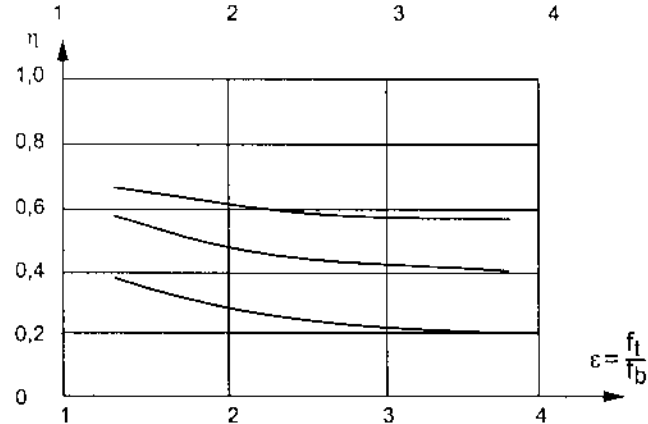
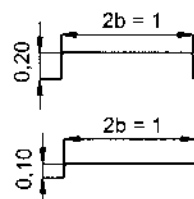
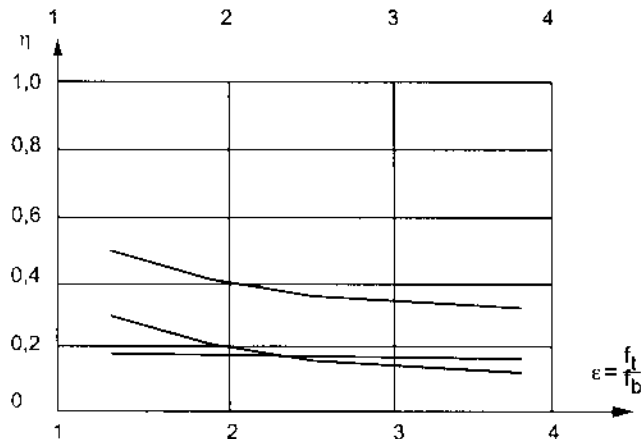
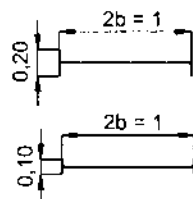
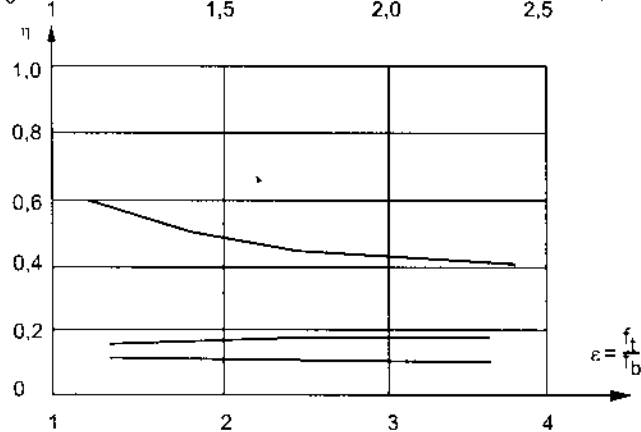
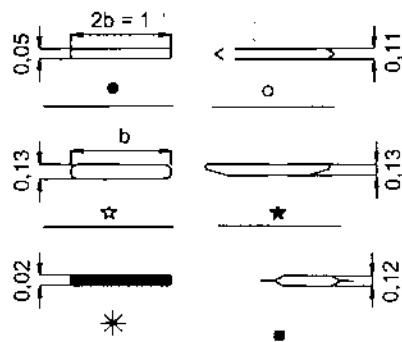
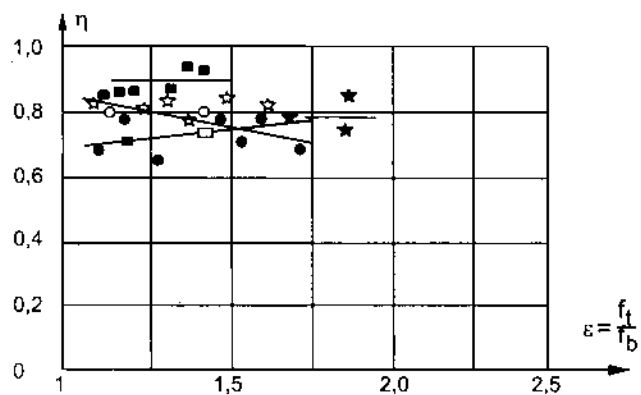
Cần phải thiết kế sao cho tốc độ gió giới hạn đối với một cầu dây là cao hơn mọi tốc độ gió thực tế có thể xuất hiện ở vị trí cầu trong quá trình khai thác cầu, ví dụ 100 năm, (tương ứng với một mức độ an toàn nào đó định trước). Với các loại cầu dây văng, xu hướng chọn kết cấu nhịp có độ cứng chống xoắn càng lớn càng tốt. Cách chọn kiểu bố trí cầu có hai mặt phẳng dây thay cho sơ đồ cầu một mặt phẳng dây sẽ tăng khả năng chống xoắn cho kết cấu. Hơn nữa các cáp văng xiên ra hai bên nên được bố trí chụm đầu tại đỉnh cột tháp hình chữ A. Ngoài ra, mở rộng mặt cắt ngang cầu hay bố trí cáp chính neo vào mặt cầu cũng là cách tăng khả năng chống xoắn cho kết cấu nhịp cầu. Mặt khác,

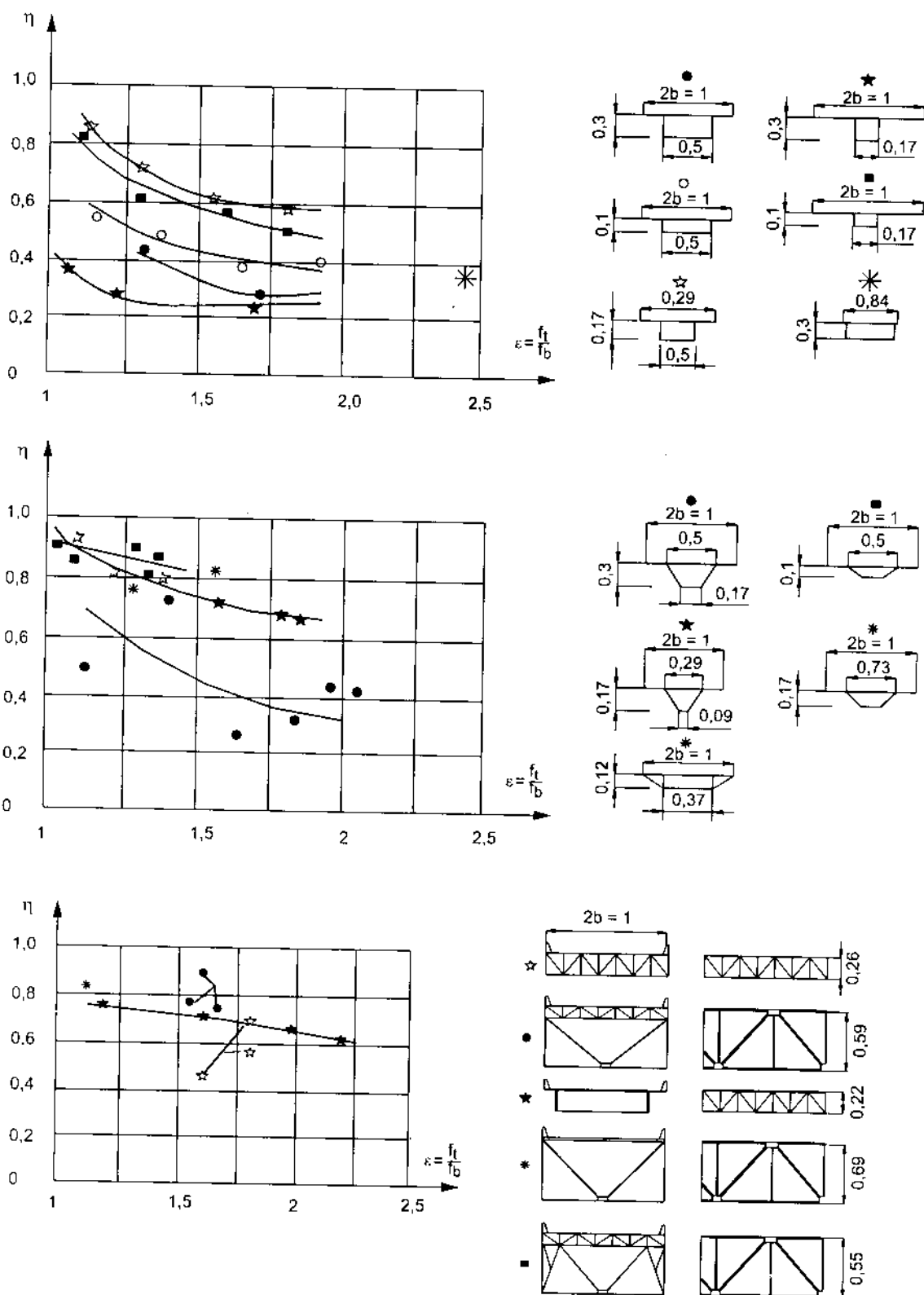
mặt cầu càng rộng thì càng có khả năng chống các dao động do gió tốt hơn. Cần phải tránh thiết kế cầu tạo những cầu có nhịp dài và bề ngang hẹp.

Phương pháp nửa giải tích của Kloppe (1967) đã kết hợp tính toán tốc độ tới hạn nhờ lý thuyết của Theodorsen với sự hiệu chỉnh nhờ hệ số triết giảm η xét đến hình dạng kết cấu nhịp (đây chính là hệ số điều chỉnh được xác định từ các mô hình thí nghiệm thổi gió). Tốc độ tới hạn sẽ được tìm ra căn cứ theo một biểu đồ như đã vẽ trên hình 1.18, phụ thuộc vào tỷ số ε giữa các tần số riêng xoắn và tần số riêng uốn, cũng như phụ thuộc khối lượng và bề rộng b của kết cấu nhịp cầu. Hệ số η , phụ thuộc vào hình dạng mặt cắt và ε được rút ra từ các thí nghiệm được thể hiện như trên hình 1.19.



Hình 1.18: Các biểu đồ hệ số η





Hình 1.19: Hệ số hiệu chỉnh $\eta = V_u / V_h$

Giá trị của hệ số η vào khoảng 0,8 đối với kết cấu nhịp dạng bản hoặc dạng hình hộp mỏng thoát gió, giá trị này có thể giảm đến 0,1 đối với mặt cắt dạng hở như kiểu của dầm có sườn.

Tất cả các dạng mặt cắt ngang gần đúng của kết cấu nhịp thực tế hiển nhiên là chưa được thí nghiệm trong Hầm gió. Phương pháp này chỉ là gần đúng. Tuy nhiên nó cho phép chúng ta ước lượng nhanh chóng xem liệu một cầu dây có nhạy cảm hay không với hiện tượng *Flutter* (trông thành trong dòng gió), trong điều kiện mà chúng ta chỉ có rất ít thông tin về dạng hình học của cầu, về trọng lượng bản thân của cầu, độ cứng của nó và kèm theo các tính toán tần số dao động riêng uốn và tần số dao động riêng xoắn. Các tốc độ gió tới hạn vừa tính được sẽ đem so sánh với các tốc độ gió mạnh nhất đã điều tra đo đạc được trong suốt thời gian ít nhất là 30 năm ở khu vực xây dựng cầu.

Ngoài ra, dòng gió có thể tác dụng theo hướng góc α so với phương nằm ngang, điều này càng làm tăng khả năng mất ổn định. Thực tế góc này không vượt quá trị số $3^\circ - 9^\circ$ (trị số trung bình là 6°), điều này dẫn đến sự giảm tiếp theo của hệ số η tùy theo dạng của mặt cắt:

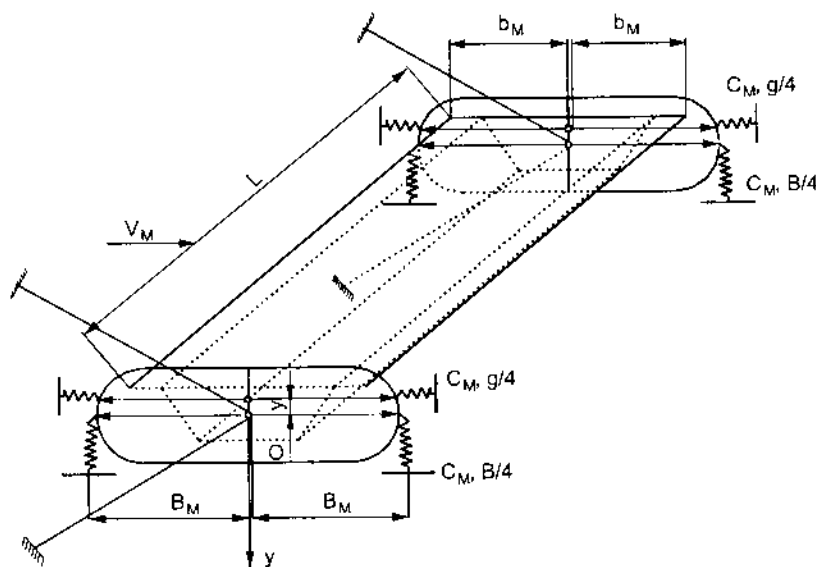
- Đối với kết cấu nhịp có mặt cắt ngang dạng thoát gió:

$$\eta_\alpha = 6/\eta_{\alpha=0} = 1/2 \quad (1-31)$$

- Đối với kết cấu nhịp hình hộp:

$$\eta_\alpha = 6/\eta_{\alpha=0} = 1/3 \quad (1-32)$$

Trên hình 1.20 giới thiệu sơ đồ bố trí mô hình thí nghiệm một dốt kết cấu nhịp cầu dây trong Hầm gió. Mô hình này được treo bởi các liên kết đàn hồi kiểu lò xo để cho phép mô phỏng chuyển động uốn và chuyển động xoắn.



Hình 1.20: Sơ đồ mô hình thí nghiệm cho cầu Meules ở Pháp

1.8. PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN KẾT CẤU CHỊU FLUTTER XOẮN

Bản chất của phương pháp là dùng đồng thời nghiệm của bài toán lý thuyết về dao động xoắn và một số biểu thức nhận được từ thực nghiệm. Đường lối này sẽ tăng đáng kể độ chính xác của kết quả giải.

Các đặc trưng của *Flutter* là:

- Tốc độ giới hạn V_{gh} ;
- Tần số góc dao động ω_v .

Bằng thực nghiệm kết hợp với tính toán chúng ta có thể xác định mối quan hệ giữa tốc độ giới hạn và tần số dao động *Flutter* đối với các dạng mặt cắt khác nhau.

Các nhà khoa học Đức đã nghiên cứu nhiều mô hình với các hình dạng khác nhau trong hầm thí nghiệm khí động rồi xác định được tốc độ giới hạn *Flutter* và các tần số vòng tương ứng. Chiều dài mô hình khoảng 1,22 - 2,00 m, chiều rộng 0,40 - 0,46 m; chỉ số logarit tắt dao động khi xoắn và khi uốn tương ứng là 0,005 và 0,1010.

Trong các kết cấu bình thường, sự tắt dần dao động được quyết định bởi các đặc điểm của hệ thống, nội ma sát trong các liên kết và nội ma sát trong vật liệu của công trình, đó chính là các đặc tính giảm chấn của kết cấu. Nó được đặc trưng bằng hệ số phân rã năng lượng dao động của hệ thống kết cấu $\gamma_k = \delta / \pi$. Trong đó δ là chỉ số logarit của dao động.

Khi dòng khí thổi quanh vật thể sẽ xuất hiện hiệu ứng giảm chấn khí động (γ_a), gây ra chuyển động của vật thể trong dòng gió đó. Hệ số tổng cộng phân rã năng lượng dao động là:

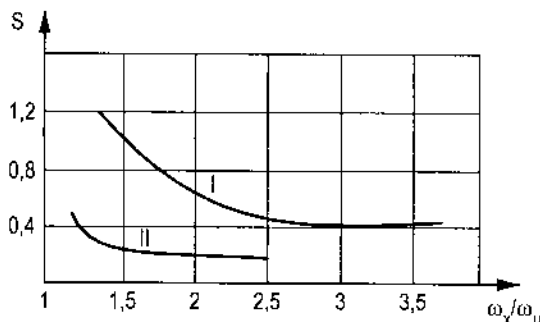
$$\gamma_{tc} = \gamma_k + \gamma_a \quad (1-33)$$

Trong các trường hợp γ_a lấy giá trị âm thì xuất hiện sự kích thích khí động học. Còn nếu γ_{tc} lấy giá trị âm thì sẽ xảy ra dao động tăng đột ngột.

Trên cơ sở các điều nói trên và các nghiên cứu khác nữa, chúng ta tính toán tham số:

$$S = B \omega_x / \omega_u \quad (1-34)$$

mà giá trị của nó đối với mặt cắt dạng hình chữ nhật hẹp tùy thuộc vào tỷ số giữa tần số riêng xoắn ω_x và tần số riêng uốn ω_u đã được vẽ



Hình 1.21: Giá trị của tham số S tùy theo tỷ số ω_x / ω_u

trên hình 1.21; xét hai tình huống: có kể đến tính giảm chấn (theo thực nghiệm trên mô hình, nét vẽ II) và không kể đến tính giảm chấn (theo lý thuyết, nét vẽ I).

Lời giải lý thuyết của phương trình vi phân dao động xoắn nhỏ của thanh thành mỏng cho phép xác định tốc độ *Flutter* tới hạn như là hàm số của tần số vòng.

Lấy tích phân gần đúng của phương trình thứ hai của hệ (1-34) để xác định tốc độ *Flutter*:

$$V^2_f = \frac{EJ_{\omega} \int_0^1 \theta''^2 dz + (GJ_k - Nr^2) \int_0^1 (\theta')^2 dz}{\left(\frac{\gamma F r^2}{g} + \frac{S^2}{B^2} + \frac{1}{2} \rho B^2 k_m \right) \int_0^1 \theta^2 dz} \quad (1-35)$$

Trong đó đã xét đến quan hệ giữa tần số và tốc độ của *Flutter*, nghĩa là tham số S.

Đối với cầu dây một nhịp cần phải thêm vào độ cứng chống xoắn thuần túy GJ_X một thành phần $0,5 Tb^2$, với T là lực đẩy ngang, b là khoảng cách giữa các dây treo đo theo chiều rộng của mặt cắt ngang. Khi cho hàm số tiệm cận gần đúng $\theta(z)$ tương ứng với các điều kiện biên khi xoắn, có thể nhận được công thức đối với các trường hợp khác nhau.

Sau đây chúng ta xét một vài dạng đặc trưng của dầm. Đối với dầm công xôn có chiều dài l thì tốc độ gió tới hạn là:

$$V_f = \frac{\pi}{2.l.B} \left[\frac{2GJ_k}{\alpha \rho k_m} \left(\frac{EJ_{\omega}}{GJ_k} \cdot \frac{\pi^2}{4.l^2} - \frac{N.r^2}{G.I_k} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad (1-36)$$

$$r = (J_X + J_Y)/F \quad (1-37)$$

$$\alpha = 1 + 2m r^2 S / (\rho k_m B^4) \quad (1-38)$$

trong đó:

b - chiều rộng mặt cắt ngang

GJ_k và EJ_{ω} - các độ cứng của mặt cắt dầm (thanh) khi chịu xoắn

ρ - mật độ không khí

N - lực nén trong dầm (thanh)

k_m - đạo hàm của hệ số mô men khí động, lấy theo thực nghiệm (đối với mặt cắt dạng bản phẳng mỏng $k_m \approx 1$)

J_X, J_Y, F - tương ứng là các mô men quán tính và diện tích mặt cắt ngang

m - khối lượng rải dọc của kết cấu nhịp.

Một ví dụ tính toán theo phương pháp tính toán kết cấu chịu Flutter xoắn

Dầm sơ đồ công xôn trong quá trình lắp ghép với độ dài phân hăng $L = 200$ m và rộng $b = 40$ m. Các đặc trưng của kết cấu nhịp là:

$$EJ_{\omega} = 0$$

$$k_m = 1$$

$$GJ_k = 4.10^8 \text{ kN.m}^2$$

$$\rho = 0,129.10^{-2} \text{ t/m}^2$$

$$m = 20,4 \text{ t/m}$$

$$\omega_x/\omega_u = 2,2$$

$$r = 15 \text{ m}$$

$$S = 0,67$$

Không xét đến tính giảm chấn của kết cấu.

Tính toán theo công thức (1-36) được kết quả $\alpha = 2,33$ và $V_f = 104,5$ m/s

Tần số *Flutter* là: $\omega_f = V_f S/b = 1,75$ (đơn vị đo là 1/s)

Trị số ω_f nằm trong khoảng giữa tần số dao động uốn và tần số dao động xoắn. Tính gần đúng như sau:

$$\omega_f = 0,5 (\omega_x + \omega_u)$$

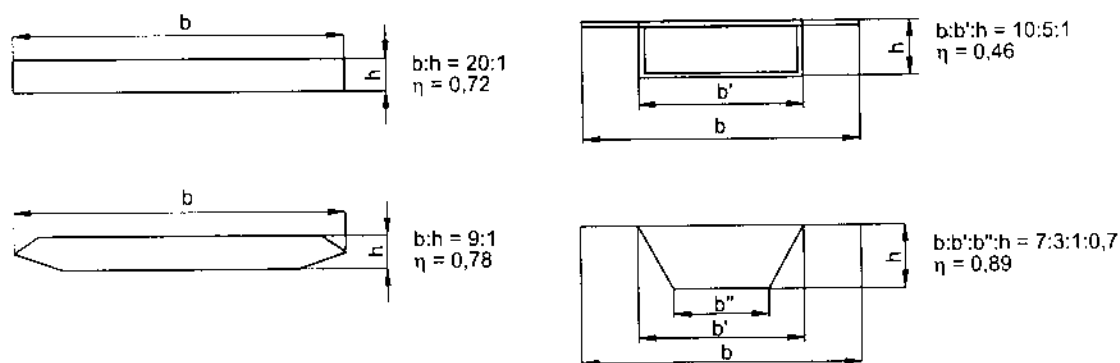
Khi $\alpha = 1$ sẽ có tốc độ giới hạn *Flutter*, ở ví dụ này là bằng $V_f = 159,6$ m/s

Nếu cũng thực hiện các tính toán như trên nhưng có kể đến tính giảm chấn khi $S = 0,2$. Kết quả nhận được $\alpha = 1,118$, còn tốc độ *Flutter* sẽ là $V_f = 150,9$ m/s.

Như vậy, việc xét đến tính giảm chấn của bản thân kết cấu thì sẽ nâng cao độ chính xác khi xác định tốc độ tới hạn *Flutter*. Trị số kết quả sẽ lớn hơn khá nhiều. Từ đây suy ra rằng trong thực hành thiết kế cầu dây văng nếu bỏ qua không xét tính giảm chấn của bản thân kết cấu nhịp thì sẽ thiên về an toàn mà lại đơn giản tính toán hơn. Còn trong thực hành kiểm định cầu dây văng thì rất cần phải xét tính giảm chấn của bản thân kết cấu nhịp để kết quả chính xác hơn.

Các công thức nêu ra trên đây chủ yếu dành cho dạng mặt cắt ngang hình chữ nhật hẹp (khi xác định các lực khí động). Tuy nhiên cũng có thể áp dụng các công thức đó cho các dạng mặt cắt ngang khác, bằng cách đưa thêm vào tốc độ tới hạn *Flutter* một hệ số hình dạng mặt cắt dựa theo các tài liệu thực nghiệm của K. Kleppelia (hình 1.22). Phương pháp tính toán đã nêu ra sẽ có đủ độ chính xác và khá đơn giản để sử dụng trong quá trình thiết kế sơ bộ.

Tốc độ *Flutter* xoắn có thể tính được cả đối với các hệ thống phức tạp hơn, nếu sử dụng các phương pháp số.



Hình 1.22: Hệ số hình dạng của một số mặt cắt

Tương tự với việc xác định tốc độ *Flutter* trong trường hợp cụ thể (công thức (1-38)) có:

$$V_f = \frac{1}{B} \left[\frac{2 \cdot \lambda_{l, \min}}{\alpha \cdot \rho \cdot k_m \cdot \Delta_z} \right] \quad (1-40)$$

Như vậy, phương pháp tính toán độ ổn định khí động nêu trên là khá tổng quát và đơn giản để sử dụng trong thực tế thiết kế cầu.

1.9. NHỮNG BIỆN PHÁP CẤU TẠO ĐỂ TRÁNH MẤT ỔN ĐỊNH KHÍ ĐỘNG CHO KẾT CẤU CẦU DÂY

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu khi tổng hợp các kinh nghiệm thiết kế và khai thác các cầu dây nhíp lớn người ta đã rút ra các biện pháp cấu tạo cho phép ngăn ngừa sự phát triển các dao động nguy hiểm của kết cấu cầu trong dòng gió. Các biện pháp đó trước hết nhằm tăng độ cứng chống xoắn như:

- Dùng kết cấu dầm cứng có mặt cắt hình hộp;
- Cải thiện dạng lưu tuyến cho mặt cắt ngang dầm để thoát gió dễ dàng hơn mà không tạo ra các xoáy khí ở phía sau mặt cắt;
- Tăng chiều rộng mặt cầu.

Các kết quả nghiên cứu mới đây về thí nghiệm khí động học của mô hình cầu cho thấy các hệ thống cầu dây văng với 2 mặt phẳng dây kiểu đồng quy không bị xuất hiện những dao động khí đàn hồi nguy hiểm. Các dây tăng cường cho cầu dây dầm cứng có chiều cao nhỏ với tỷ lệ $h/L = 1/300$ và dầm cứng dạng lưu tuyến cũng tỏ ra an toàn.

Để thiết kế các cầu dây mới cần phải làm nhiều thí nghiệm trên các mô hình, hoặc thông qua quan trắc theo dõi các cầu dây có cấu tạo tương tự đang khai thác sau đó rút kinh nghiệm và đề ra những kiến nghị phục vụ hướng dẫn thiết kế.

Ví dụ tại nước Mỹ có các văn bản hướng dẫn các điều kiện để đảm bảo ổn định khí động học cho các cầu treo như sau:

- Chiều cao dầm cứng, đo bằng khoảng cách tìm các thanh của mạ trên và mạ dưới (m):

$$h \geq \frac{L}{1000} \left(8,33 + \frac{L}{305} \right) \quad (1-41)$$

- Độ cứng chịu uốn của dầm cứng (tính bằng đơn vị kN.m²):

$$EJ \geq \frac{1,474b/10}{\sqrt{H}} \quad (1-42)$$

trong đó:

L - chiều dài nhịp chính, m

b - chiều rộng cầu, đo giữa các dây xiên, theo phương ngang cầu, m

H - chiều cao cột tháp, m

Để đảm bảo ổn định khí động học cần phải thiết kế hình dạng mặt cắt ngang dầm cứng sao cho mặt cắt ngang tương ứng với lực gió nâng nhỏ nhất. Ngoài ra phải đảm bảo yêu cầu về độ cứng hợp lý (tỷ số giữa các tần số dao động xoắn và dao động uốn là hợp lý).

Như đã nêu trên, theo ý kiến của nhiều chuyên gia thì để đảm bảo ổn định khí động học, tần số dao động xoắn cần phải lớn hơn 2 ÷ 3 lần so với tần số dao động uốn trong mặt phẳng thẳng đứng. Nếu dạng mặt cắt ngang dầm cứng là dạng thon và thoát gió tốt thì tỷ số này có thể giảm còn 1,5 ÷ 2,0. Có thể lấy ví dụ cầu qua sông Rein ở nước Đức với mặt cắt dầm cứng dạng hờ, nhịp dầm dài 319 m: Tỷ số giữa tần số dao động riêng xoắn với tần số dao động riêng uốn theo dạng dao động thứ nhất là 0,54 : 0,38 = 1,42.

Với các chỉ số logarit của dao động riêng uốn bằng 0,18 và của dao động riêng xoắn bằng 0,07, dựa trên các nghiên cứu trong Hầm gió đã chứng minh được độ ổn định khí động của kết cấu nhịp là tốt. Điều này được chứng thực trong quá trình khai thác cầu.

Lấy ví dụ ở một số cầu dây văng ở nước Nga có mặt cắt ngang gồm 2 hộp nối với nhau bằng bản cánh trên. Chu kỳ dao động riêng thẳng đứng như sau:

- Đối với cầu qua sông Dnhép ở Kiép, $T_1 = 2,31$ s, $T_2 = 1,17$ s

- Đối với cầu qua sông Secsni ở Trerepov, $T_1 = 1,63$ s, $T_2 = 0,92$ s

Các cầu này đang khai thác bình thường.

Đối với các cầu dây văng thì qua thực tế cho thấy chúng có rất ít khả năng hoặc không có khả năng xảy ra dao động cộng hưởng với biên độ lớn bởi vì có hiệu ứng giảm chấn làm tắt dần dao động. Điều này đã thấy rõ khi thí nghiệm cầu có nhịp 90 m ở Sturgat (nước Đức). Yếu tố cơ bản ảnh hưởng đến dao động chính là chiều dài khác nhau của các dây văng trong kết cấu nhịp.

Các cầu dây có trụ tháp hình chữ A thường có độ cứng không gian đặc biệt lớn. Tuy nhiên nếu bỏ qua các nguyên tắc bố trí cấu tạo như đã nêu trên thì trong các cầu dây sẽ xuất hiện những dao động lớn do gió. Lấy ví dụ một cầu dây văng ở Canada nhịp dài 218 m, chỉ có 1 dây ở mỗi bên trụ tháp. Cầu này xây dựng xong thì có biên độ dao động quá lớn. Sau đó phải có thêm các biện pháp gia cường để giảm dao động là: đặt thêm các cánh thoát gió, bịt kín phần đáy của mặt cắt ngang để chuyển từ dạng mặt cắt hở thành dạng mặt cắt kín. Các biện pháp này đã được thử nghiệm trong hầm gió và cho kết quả tốt. Với góc nghiêng vát tối ưu của bộ cánh thoát gió mới được thêm vào mặt cắt ngang dầm cứng và khi đáy mặt cắt đã được bịt kín thì biên độ dao động thẳng đứng giảm xuống đáng kể.

Khi muốn nhận định sơ bộ về độ ổn định khí động của kết cấu nhịp cầu chúng ta có thể căn cứ vào các đặc điểm của biểu đồ hệ số khí động của mô men xoắn: cụ thể là các giá trị âm của đạo hàm sẽ chứng tỏ khả năng chịu gió kém của công trình.

Cần lưu ý về mặt vật liệu thì nên dùng dầm cứng bằng BTCT cho cầu dây văng. Do trọng lượng lớn và do khả năng tắt dao động nhanh của kết cấu BTCT (tắt nhanh gấp $2 \div 3$ lần so với kết cấu thép). Các cầu dây văng - dầm cứng BTCT thực ra không gặp vấn đề bất lợi nào về khí động học. Ví dụ cầu Columbia (Mỹ) có nhịp chính dài 299 m đã gặp cơn gió bão lớn trong thời gian thi công. Chiều dài đoạn công xôn được treo bởi các dây xiên khoảng 150 m. Nhưng tỷ số giữa tần số dao động riêng xoắn với tần số dao động riêng uốn bằng 1,4 (theo dạng dao động thứ 1) nên cầu vẫn an toàn.

Chương 2

MÔ HÌNH BÀI TOÁN KHÍ ĐỘNG CẦU DÂY VÀNG TRONG GIAI ĐOẠN THI CÔNG HẰNG TƯƠNG ỨNG VỚI CÁC KIỂU KẾT CẤU KHÁC NHAU

2.1. CƠ SỞ TÍNH TOÁN ỔN ĐỊNH CẦU DÂY VÀNG TRONG GIAI ĐOẠN THI CÔNG, ĐẶC BIỆT LÀ THI CÔNG HẰNG

Chương 1 đã đề cập đến tính toán ổn định khí động kết cấu nhịp cầu nói chung mà chủ yếu là xét giai đoạn đã thi công xong, kết cấu đã hoàn chỉnh, đã đưa vào khai thác.

Một tình huống bất lợi nhất cho kết cấu nhịp cầu phải xét là khi đang thi công hằng đến mức hằng nhất, trước khi hợp long. Khi đó kết cấu yếu nhất mà khối lượng lại gần bằng so với lúc khai thác nên các hiện tượng mất ổn định khí động đều có thể xảy ra. Nói chung cách tính toán cũng tương tự như khi tính các đặc trưng dao động riêng của kết cấu, cần xét đến các tình huống bất lợi nhất trong quá trình thi công còn việc tính toán lý thuyết chỉ là gần đúng, nhất thiết phải làm các thí nghiệm trong Hầm gió.

Nếu tính toán và thí nghiệm Hầm gió cho thấy có nguy cơ mất ổn định khí động ở thời điểm thi công hằng xa nhất, cần phải bố trí các dây néo tạm từ đáy kết cấu nhịp xuống các bệ trụ thấp. Số lượng và lực căng các dây này tùy theo tính toán và thí nghiệm quyết định. Cũng có thể lựa chọn thời điểm và tiến độ thi công hợp lý sao cho lúc thi công hằng xa nhất thì vào mùa gió yếu.

Đối với cầu thi công theo công nghệ hằng, ngoài việc phải đặt tải trọng đối xứng, còn phải xét tới trường hợp đặt tải trọng không đối xứng. Hệ số áp lực gió không đối xứng thường lấy bằng 0,5.

2.2. VÍ DỤ VỀ CẦU BÃI CHÁY

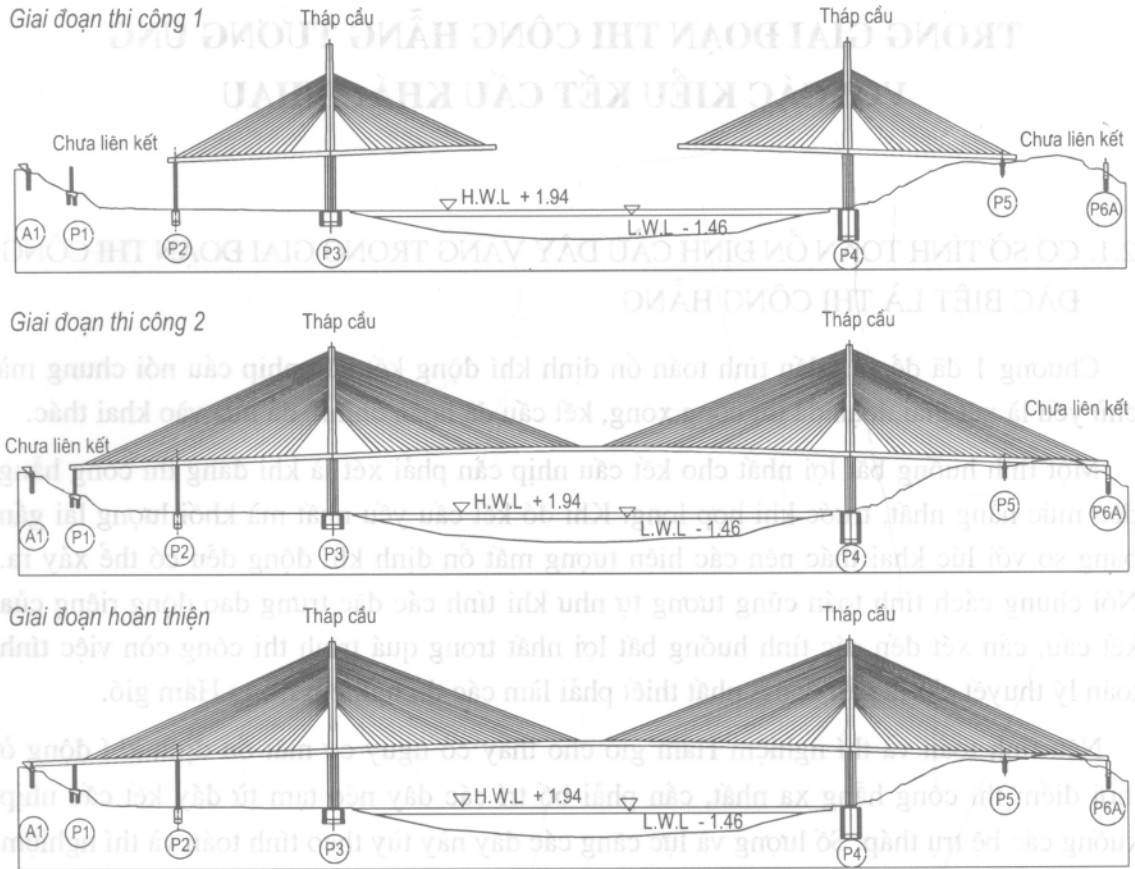
Trong phần này nêu ví dụ về việc xét các tình huống thi công bất lợi nhất của cầu Bãi Cháy (thành phố Hạ Long).

Đối với từng giai đoạn thi công bất lợi nhất về mặt khí động lực học trong quá trình thi công cần sử dụng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn các giá trị tần số dao động riêng cho mô hình kết cấu động của cầu:

- **Giai đoạn thi công 1:** Giai đoạn ngay trước khi các dầm hẫng lắp ghép được nối với trụ P2 hoặc P5 ở nhịp biên.

- **Giai đoạn thi công 2:** Giai đoạn ngay trước khi hai phía của các dầm hẫng lắp ghép được nối với nhau tại giữa nhịp giữa.

- **Giai đoạn hoàn thành:** Giai đoạn khi toàn bộ công việc thi công được hoàn thành.



Hình 2.1: Các trạng thái kết cấu chính của cầu Bãi Cháy

Trong tiến độ thi công của cầu Bãi Cháy, mỗi giai đoạn thi công thể hiện trong kế hoạch thí nghiệm Hàm gió 3 chiều trong thời gian như sau:

1- Giai đoạn thi công 1 (giai đoạn ngay trước khi các dầm hẫng lắp ghép được nối với trụ P2 hoặc P5 ở nhịp biên): tháng 9 - tháng 10 năm 2005.

2- Giai đoạn thi công 2 (giai đoạn ngay trước khi hai phía của các dầm hẫng lắp ghép được nối với nhau tại giữa nhịp giữa): tháng 4 - tháng 6 năm 2006.

Giai đoạn thi công 2 có khả năng xảy ra sự cố cao hơn do nằm trong mùa bão (tháng 5 - tháng 8). Do đó, giai đoạn thi công 2 sẽ được chọn làm mô hình thí nghiệm Hàm gió đối với ổn định khí động lực học của cầu trong quá trình thi công.

Từ nghiên cứu đề cập nêu trên, mô hình thí nghiệm tỷ lệ 1/150÷1/200 của thí nghiệm Hàm gió được chuẩn bị cho giai đoạn 2 và giai đoạn hoàn thành tương ứng.

Chương 3

CÁC PHƯƠNG PHÁP KẾT HỢP TÍNH TOÁN LÝ THUYẾT VÀ THÍ NGHIỆM TRÊN MÔ HÌNH TRONG HẦM GIÓ

3.1. KHÁI NIỆM

Đối với các cầu dây văng cũng như cầu dây võng có nhịp lớn, việc đánh giá tác động của gió đối với kết cấu cầu luôn được thực hiện theo đường lối kết hợp giữa các tính toán lý thuyết và các thí nghiệm mô hình vật lý thu nhỏ trong Hầm gió. Các thí nghiệm có mục tiêu là xác định các tham số khí động học thực nghiệm làm số liệu đầu vào phục vụ cho việc phân tích lý thuyết và cũng là để kiểm chứng kết quả tính toán lý thuyết.

Công tác thí nghiệm đòi hỏi cán bộ có trình độ chuyên sâu và các thiết bị thí nghiệm hiện đại mà ở Việt Nam còn thiếu. Do đó vừa qua, các cầu lớn ở nước ta như Bãi Cháy, Kiên, Rạch Miễu, Cần Thơ, Thuận Phước đều thực hiện thí nghiệm ở nước ngoài (Nhật Bản, Thái Lan, Trung Quốc).

Trong số các thí nghiệm này thì thí nghiệm về xác định các hệ số khí động của mặt cắt ngang dầm cầu là quan trọng để tính toán lực gió tĩnh và lực ngẫu nhiên *Bufetting* tác dụng lên kết cấu nhịp. Mô hình có hai loại là:

- Mô hình một đoạn dầm có mặt cắt tương ứng.
- Mô hình không gian tổng thể cả cầu dây gồm cả dầm, tháp, dây.

Thông thường có các thí nghiệm sau:

- Thí nghiệm xác định các hệ số khí động học gồm: hệ số cản nằm ngang C_T , hệ số nâng thẳng đứng C_N , hệ số mômen xoắn C_M .
- Thí nghiệm xác định các hệ số gây ra dao động tròn trành (*Flutter*), hay hệ số Scanlan gồm: H_i , P_i , A_i với $i = 1-6$.
- Thí nghiệm xác định các vận tốc gió tới hạn V_{gh} gây ra mất ổn định *Flutter*.
- Thí nghiệm xác định các ứng xử động lực của kết cấu trong dòng gió: các đặc trưng dao động, biên độ dao động cực đại, độ cản khí động.

3.2. VẤN ĐỀ ĐỒNG DẠNG TRONG CÁC THÍ NGHIỆM MÔ HÌNH VẬT LÝ THU NHỎ

Trong mọi thí nghiệm mô hình vật lý thu nhỏ đều cần giải quyết vấn đề đồng dạng giữa vật liệu và cấu tạo của kết cấu thực, các điều kiện làm việc thực với vật liệu và cấu

tạo của mô hình và các điều kiện làm việc của mô hình. Đã có các quy định chung về vấn đề này và khi làm thí nghiệm trong Hầm gió về khí động học cũng áp dụng các quy định chung đó. Vấn đề này đã được đề cập trong nhiều tài liệu kinh điển, sau đây chỉ nêu ra những vấn đề cụ thể của mô hình cầu dây văng trong thí nghiệm Hầm gió.

3.2.1. Nguyên lý 1 về tính đồng dạng

Điều kiện cần và đủ để hai hiện tượng đồng dạng là các tham số không thứ nguyên tương ứng mô tả hai hiện tượng là giống nhau.

3.2.2. Nguyên lý 2 về tính đồng dạng

Cần phân biệt hai nhóm các tham số không thứ nguyên lập ra từ các đại lượng vật lý là:

- Nhóm các tham số không thứ nguyên cơ sở;
- Nhóm các tham số không thứ nguyên còn lại, có thể suy ra từ các tham số không thứ nguyên cơ sở nói trên.

Tỷ lệ mô hình thu nhỏ thường được xác định trước tiên, sau đó từ nguyên lý đồng dạng sẽ đề ra các tham số đồng dạng và căn cứ vào chúng để lập ra mối quan hệ giữa các đại lượng vật lý đặc trưng cho vật liệu, kết cấu dòng khí thực với các đại lượng tương ứng của mô hình và thiết bị trong Hầm gió.

3.2.3. Điều kiện đồng dạng

Trong điều kiện dòng khí ổn định lúc thí nghiệm, người ta lập ra năm tham số không thứ nguyên cơ sở là:

- Tham số độ nhớt dòng khí (số *Reynold*)
- Tham số trọng trường (số *Froude*)
- Tham số đàn hồi (số *Cauchy*)
- Tham số độ giảm logarit
- Tham số tỷ lệ mật độ khối
- Tham số vận tốc chiết giảm

Các điều kiện đồng dạng trong thí nghiệm mô hình với dòng khí ổn định được thể hiện mối quan hệ giữa các tham số đồng dạng sau:

- Tham số đồng dạng hình học
- Tham số độ nhớt
- Tham số trọng trường
- Quan hệ vận tốc
- Tham số đàn hồi
- Quan hệ mô đun đàn hồi
- Tham số lực cản
- Tham số vận tốc chiết giảm
- Quan hệ tần số

3.2.4. Sự thoả mãn các điều kiện đồng dạng theo loại thí nghiệm

Trong thực tế thí nghiệm mô hình kết cấu cầu trong Hầm gió rất khó thoả mãn tất cả các tham số đồng dạng do các khó khăn trong kỹ thuật, vật liệu làm mô hình... Tùy thuộc loại hình thí nghiệm mà có các điều kiện đồng dạng nhất định bắt buộc phải thoả mãn và các tham số khác không nhất thiết phải thoả mãn.

Với thí nghiệm xác định các hệ số khí động lực, chỉ cần thoả mãn các điều kiện đồng dạng hình học và tham số độ nhớt, còn các tham số đồng dạng khác không cần thoả mãn. Tuy nhiên cũng không thể thoả mãn tham số độ nhớt trong điều kiện thường vì giá trị số Reynold phụ thuộc vào vận tốc gió và kích thước vật thể, mà bản thân mô hình thu nhỏ đã làm thay đổi kích thước. Trong thí nghiệm người ta cũng đặt vấn đề khảo sát sự ảnh hưởng của tham số độ nhớt tới giá trị của hệ số khí động lực.

3.3. XÁC ĐỊNH HỆ SỐ KHÍ ĐỘNG LỰC TRONG HẦM GIÓ

3.3.1. Công thức xác định các hệ số khí động

Với mặt cắt kết cấu dầm thì lực khí động gồm ba thành phần lực tĩnh là lực cản nằm ngang (T), lực nâng thẳng đứng (N) và mô men xoắn (M). Để đặc trưng cho độ lớn của các lực khí động dựa vào các hệ số hình dạng: hệ số cản (C_T), hệ số nâng (C_N) và hệ số mô men xoắn (C_M) xác định nhờ vào thí nghiệm trong Hầm gió. Các hệ số khí động lực của tiết diện dầm cầu xác định theo các công thức sau: (1, 2, 3):

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho_a U^2 L b}; \quad C_N = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho_a U^2 L b}; \quad C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho_a U^2 L^2 b^2}$$

trong đó:

ρ_a , U - mật độ không khí và vận tốc gió thử

T, N, M - các lực cản, lực nâng và mô men trên mô hình thí nghiệm.

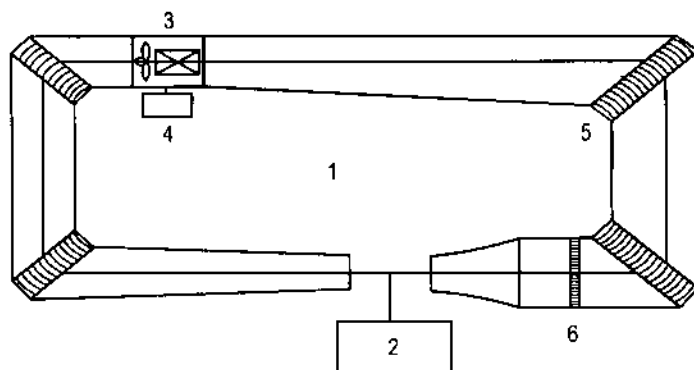
b, l - bề rộng và chiều dài mô hình thí nghiệm.

3.3.2. Thí nghiệm trong hầm gió của Viện Khoa học công nghệ Giao thông vận tải

Các cán bộ của Viện KHCN GTVT đã tiến hành thí nghiệm xác định các hệ số khí động lực của các mặt cắt dầm cầu trong phòng thí nghiệm Hầm gió của Viện kỹ thuật Phòng không và Không quân (Hầm gió OT-1), là Hầm gió duy nhất ở nước ta hiện nay thực hiện công tác thí nghiệm mô hình trong dòng khí. Một số thông số quan trọng của Hầm gió này như sau:

- Kiểu hầm gió: chu trình gió kín
- Đặc điểm dòng khí thử: ổn định

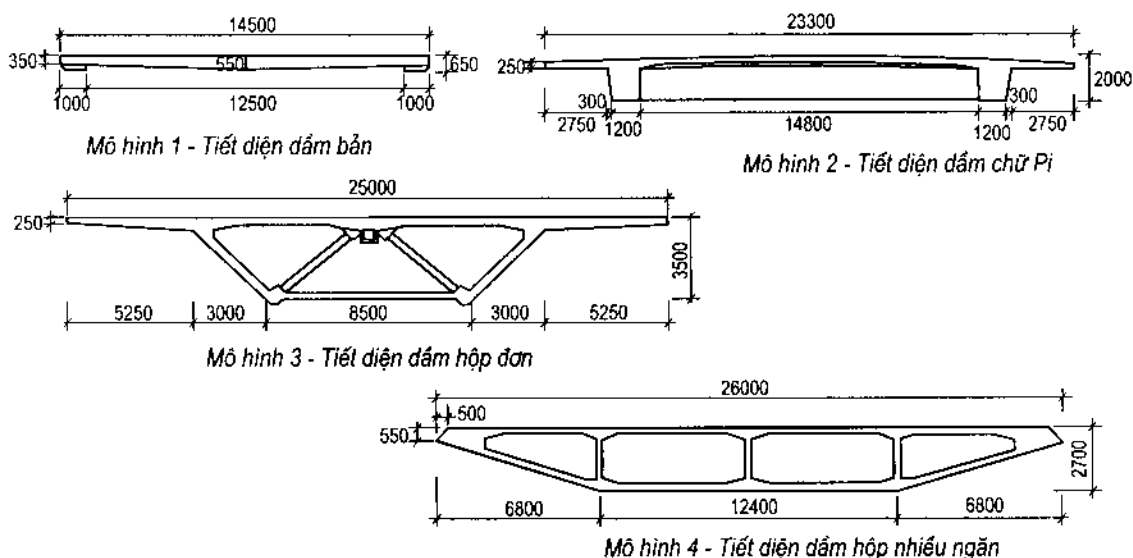
- Kích thước buồng công tác: rộng 2,0m × cao 1,4m × dài 3,8m
- Dải vận tốc gió thử: 10m/s ÷ 55m/s



Hình 3.1: Sơ đồ hầm gió OT-1

- | | |
|------------------------|------------------------------|
| 1- buồng công tác; | 4- buồng điều khiển động cơ; |
| 2- buồng điều khiển; | 5- lá hướng dòng; |
| 3- buồng động cơ quạt; | 6- lá tổ ong. |

Xây dựng 04 mẫu mô hình phân đoạn kết cấu dầm cầu. Các điều kiện đồng dạng trong chế tạo mô hình thoả mãn yêu cầu với loại thí nghiệm này.



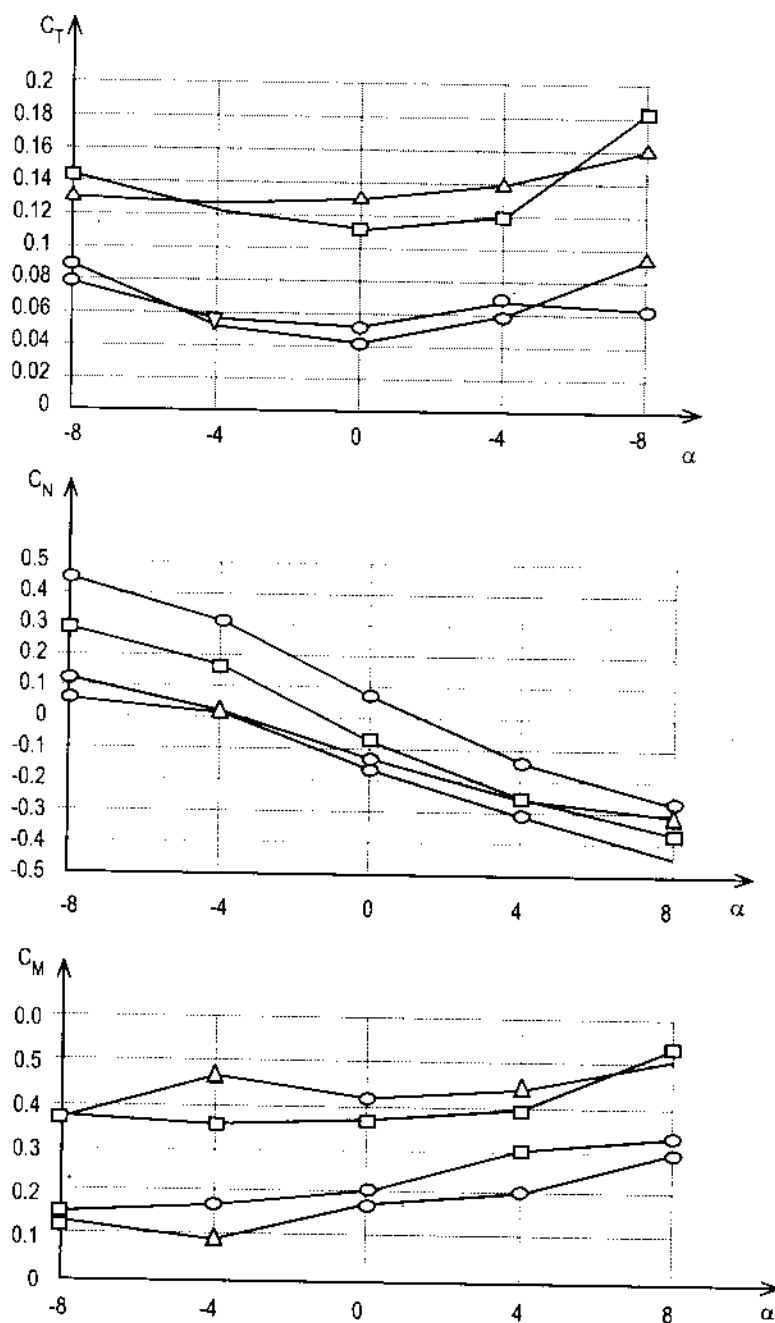
Hình 3.2: 4 mô hình tiết diện dầm cầu thí nghiệm của Viện KHCN GTVT

Tỷ lệ thu nhỏ của mô hình 1 là 1/50, còn của các mô hình 2, 3 và 4 là 1/100, chiều dài mô hình thử là 125cm. Thí nghiệm trong Hầm gió OT-1 theo nội dung sau:

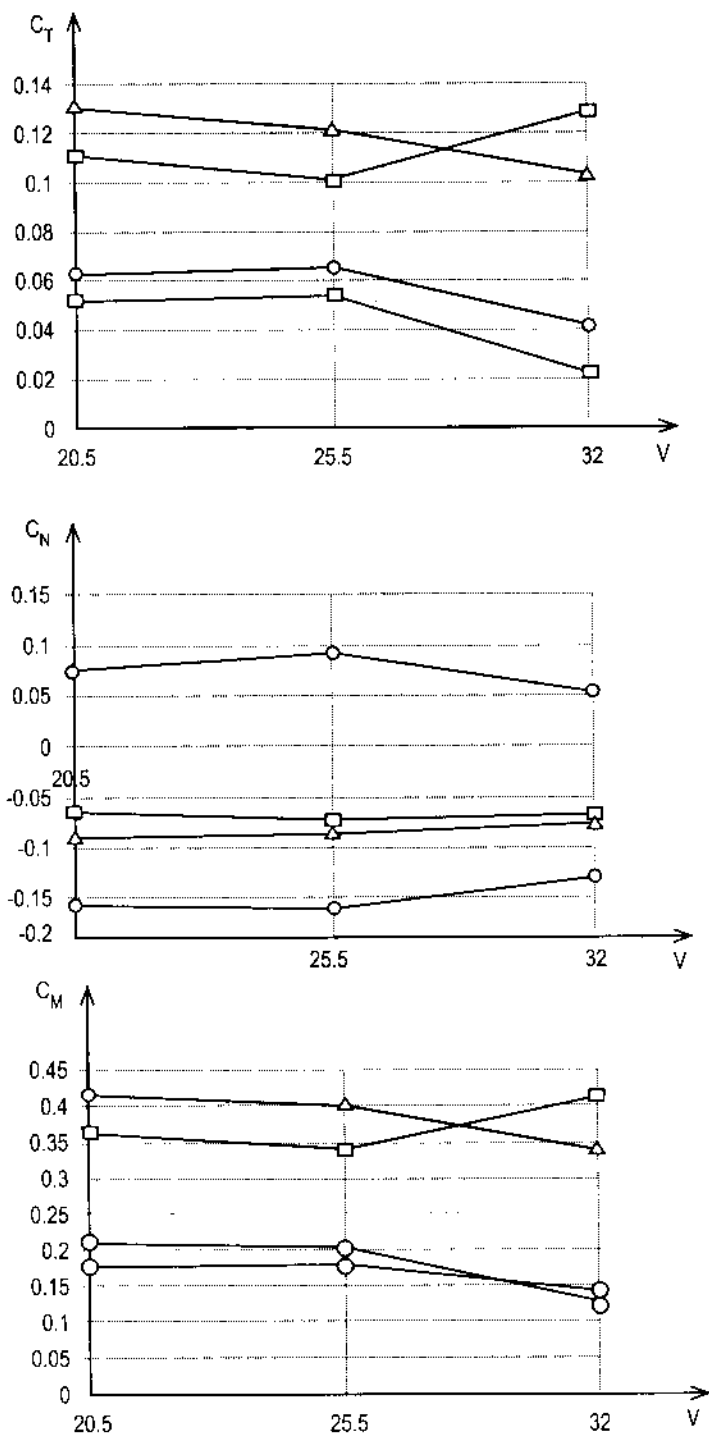
- Xây dựng biểu đồ quan hệ giữa các hệ số khí động lực C_T , C_N , C_M theo góc tới α ($\alpha = -8^\circ, -4^\circ, 0^\circ, 4^\circ, 8^\circ$).

- Xây dựng biểu đồ quan hệ giữa các hệ số khí động lực C_T , C_N , C_M theo số *Reynold* khi vận tốc gió thử thay đổi.

Sau khi thí nghiệm, xử lý số liệu đo đạc và tính toán các hệ số khí động lực theo các công thức đã trình bày. Các kết quả tính toán được trình bày dưới dạng biểu đồ theo hình 3.3 và hình 3.4.



Hình 3.3: Biểu đồ quan hệ giữa các hệ số khí động lực theo góc gió tới α



Hình 3.4: Biểu đồ quan hệ giữa các hệ số khí động lực theo vận tốc gió thử v

Một số nhận xét từ kết quả thu được của Viện KHCN GTVT:

Các hệ số khí động lực của mặt cắt đầm cầu xác định có thể dùng trong tính toán thiết kế trong trường hợp cụ thể của góc gió tới α . Kết quả thí nghiệm cho thấy sự biến

đổi giá trị của các hệ số này phù hợp về định tính và định lượng theo sự thay đổi của góc tới của gió α và đặc điểm mặt cắt dầm cầu.

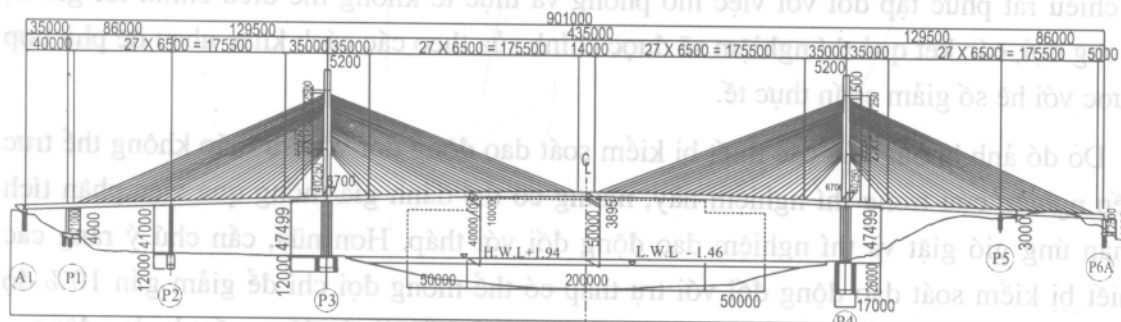
Từ các biểu đồ quan hệ giữa các hệ số khí động lực và vận tốc gió, xem xét mối quan hệ phụ thuộc vào hệ số *Reynold* (Bảng 3.1) thấy rằng giá trị của các hệ số này là xấp xỉ nhau với hai vận tốc gió thử $v = 25\text{m/s}$ và $25,5\text{m/s}$, nhưng ở vận tốc gió thử 32m/s thì giá trị các hệ số có sự thay đổi. Như vậy, tham số độ nhớt cũng ảnh hưởng tới kết quả thực nghiệm nhưng có thể bỏ qua sự phụ thuộc vào việc chọn vận tốc gió thí nghiệm nhằm đảm bảo ứng xử của mô hình trong dòng khí vẫn ở trạng thái tĩnh.

Bảng 3.1. Số Reynold theo vận tốc gió

Số Reynold Re	Vận tốc gió thử (m/s)		
	20,5	25,5	32
Mô hình 1	1,5E + 05	1,87E + 05	2,35E + 05
Mô hình 2	2,73E + 05	3,40E + 05	4,27E + 05
Mô hình 3	4,78E + 05	5,95E + 05	7,47E + 05
Mô hình 4	3,69E + 05	4,59E + 05	5,76E + 05

Kết luận: Thí nghiệm của Viện KHCN GTVT đã xác định các hệ số khí động lực học của mặt cắt dầm cầu trong Hàm gió rất cần thiết trong thiết kế và đánh giá tác động tĩnh và khí động lực lên các kết cấu cầu. Đã có các kết quả bước đầu về các tham số đồng dạng và xây dựng mô hình đồng dạng, đã xây dựng mô hình cứng phân đoạn kết cấu cho mặt cắt cầu và tiến hành xác định các hệ số khí động lực của mặt cắt dầm cầu trong Hàm gió, cùng một số khảo sát liên quan tới các hệ số khí động lực này.

3.3.3. Kết quả nghiên cứu của tư vấn Nhật Bản về thí nghiệm hầm gió cho dầm và tháp cầu Bãi Cháy khi sử dụng mô hình khí động lực học ba chiều



Hình 3.5: Cầu chính Bãi Cháy

Nhằm mục đích xây dựng cầu dây văng Bãi Cháy an toàn, tư vấn Nhật Bản đã tiến hành thí nghiệm Hầm gió với mô hình ba chiều của toàn bộ cầu để kiểm tra độ ổn định

của kết cấu cầu đối với gió mạnh. Hình 3.5 thể hiện sơ đồ cầu dây văng Bãi Cháy. Tổng chiều dài cầu là 901m trong đó nhịp giữa dài 435m. Dầm cầu được treo bởi các bó cáp nằm trong chỉ một mặt phẳng dây văng.

Mục đích của thí nghiệm Hâm gió này nhằm kiểm tra lại và xác định mức độ ổn định khí động lực học của toàn bộ kết cấu cầu đối với gió sau khi đã quyết định toàn bộ các thông số kết cấu như là các kích thước, hình dáng và độ cứng trong thiết kế kỹ thuật chứ không phải là để xác định những thông số này từ đầu.

3.3.3.1. Mục đích nghiên cứu

Mục đích thí nghiệm: Việc thí nghiệm Hâm gió 3 chiều, được thực hiện trong giai đoạn thiết kế kỹ thuật thi công, nhằm mục đích xác nhận rằng cầu như đã được thiết kế sẽ chống hoặc chịu được các điều kiện gió được dự đoán trước.

Thí nghiệm này nhằm mục đích sẽ xác nhận rằng:

- Sự không ổn định khí động lực học (như là hiện tượng dao động tròn trành (*Flutter*), dao động tiến triển nhanh (*Galloping*)) sẽ không xảy ra.
- Sự dao động do gió xoáy (*Vortex*) ở dưới mức cho phép.
- Nội dung đã giả thiết của phân tích phản ứng gió giật và/hoặc hệ số phản ứng gió giật mà đã được sử dụng trong lúc thiết kế là phù hợp.

Nếu bất cứ sự xác nhận nào ở trên là chưa trọn vẹn thì những tính toán cụ thể hơn nữa đối với việc kiểm tra và/hoặc sửa đổi thiết kế sẽ là cần thiết. Mục đích của mô hình thí nghiệm này chỉ là để quyết định rằng bất cứ yêu cầu thiết kế nào đều được điều chỉnh phù hợp.

Chọn lựa các thiết bị kiểm soát dao động đối với trụ tháp:

Do hệ số giảm chấn của mô hình toàn bộ cầu được sử dụng cho thí nghiệm Hâm gió 3 chiều rất phức tạp đối với việc mô phỏng và thực tế không thể điều chỉnh tới giá trị mong đợi, các kết quả thí nghiệm sẽ được chỉnh sửa theo các cách khác nhau để phù hợp được với hệ số giảm chấn thực tế.

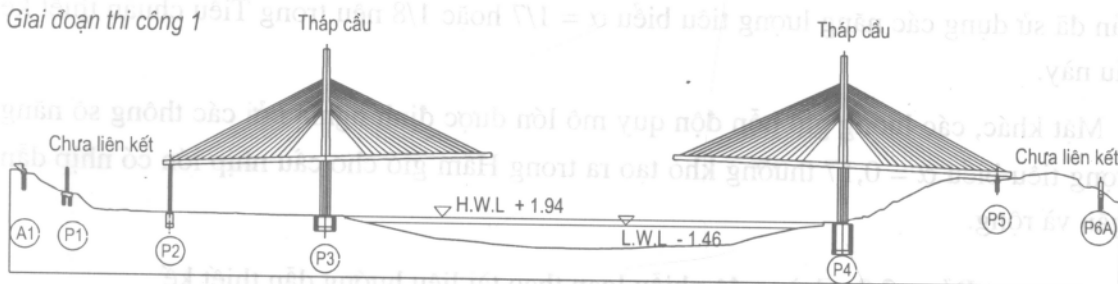
Do đó ảnh hưởng của các thiết bị kiểm soát dao động đối với trụ tháp không thể trực tiếp nghiên cứu trong thí nghiệm này, nhưng có thể đánh giá thông qua việc phân tích phản ứng gió giật và thí nghiệm dao động đối với tháp. Hơn nữa, cần chú ý rằng các thiết bị kiểm soát dao động đối với trụ tháp có thể mong đợi chỉ để giảm gần 10% độ uốn của trụ tháp, bởi các thiết bị này chỉ có hiệu quả đối với tác động uốn do dao động.

3.3.3.2. Mô hình thí nghiệm

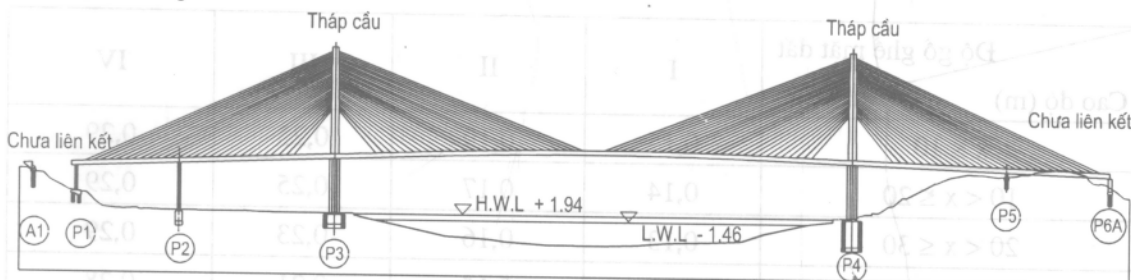
Ba giai đoạn thí nghiệm, như được thể hiện ở hình 3.6 đã được nghiên cứu để kiểm tra ổn định khí động lực học cầu Bãi Cháy. Các giai đoạn thí nghiệm này mô tả các giai

đoạn tới hạn khí động lực học trong quá trình thi công bằng cách sử dụng phân tích các giá trị dao động cho mô hình kết cấu động của cầu (đã được giới thiệu chi tiết trong mục 2.2. của chương 2).

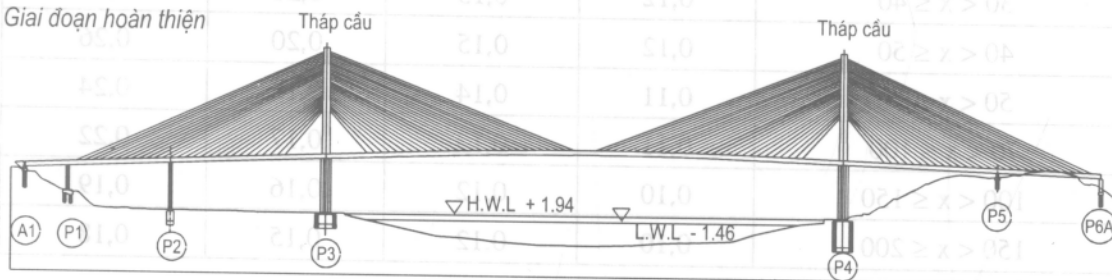
Giai đoạn thi công 1



Giai đoạn thi công 2



Giai đoạn hoàn thiện



Hình 3.6: Trạng thái kết cấu chính cầu Bãi Cháy

3.3.3.3. Các điều kiện thí nghiệm

3.3.3.3.1. Luồng gió thí nghiệm

Hai kiểu luồng gió thí nghiệm được sử dụng là luồng gió đều nhẹ nhàng (SUF) và luồng gió hỗn độn (TBLF). Dòng khí đều, êm ả được sử dụng để kiểm tra ổn định khí động lực học, dòng khí hỗn độn được sử dụng để nghiên cứu sự phản ứng ở điều kiện gió chính xác hơn là phản ánh đặc điểm thực tế của luồng gió tại thời điểm thi công.

Từ dữ liệu đo đạc gió tại vị trí xây dựng cầu Bãi Cháy, năng lượng chính của gió thẳng đứng là $\alpha = 1/5,75 (\approx 0,17)$. Thông số tiêu biểu $\alpha = 0,17$ từ các số liệu đo có thể lớn hơn các giá trị thông thường tại địa hình trống trải như vùng biển. Trong trường hợp cầu Bãi Cháy, có rất nhiều đảo nhỏ ở phía trước cầu được mô tả bằng các khối gỗ ghè trong ranh giới sắp thành từng lớp trong Hầm gió. Các đảo nhỏ phía trước cầu Bãi Cháy này có thể dễ dàng tạo ra nhiễu loạn không khí.

Tuy nhiên, thông số tiêu biểu 1/5,75 thu được từ quá trình theo dõi trong phạm vi gió tốc độ thấp từ 3,5m/s đến 6,0m/s. Các năng lượng tiêu biểu của phạm vi các cơn gió mạnh có lẽ nhỏ hơn phạm vi tốc độ gió. Trong trường hợp cầu Houshu-Shikoku tại Nhật Bản đã sử dụng các năng lượng tiêu biểu $\alpha = 1/7$ hoặc $1/8$ nêu trong Tiêu chuẩn thiết kế cầu này.

Mặt khác, các luồng gió hỗn độn quy mô lớn được định nghĩa bởi các thông số năng lượng tiêu biểu $\alpha = 0,17$ thường khó tạo ra trong hầm gió cho cầu nhịp lớn có nhịp dẫn ngắn và rộng.

Bảng 3.2: Cường độ nhiễu loạn theo tài liệu hướng dẫn thiết kế của tổ chức đường bộ Nhật Bản (1991)

Độ gồ ghề mặt đất Cao độ (m)	I	II	III	IV
$x \leq 10$	0,15	0,19	0,25	0,29
$10 < x \leq 20$	0,14	0,17	0,25	0,29
$20 < x \leq 30$	0,13	0,16	0,23	0,29
$30 < x \leq 40$	0,12	0,15	0,21	0,28
$40 < x \leq 50$	0,12	0,15	0,20	0,26
$50 < x \leq 70$	0,11	0,14	0,18	0,24
$70 < x \leq 100$	0,11	0,13	0,17	0,22
$100 < x \leq 150$	0,10	0,12	0,16	0,19
$150 < x \leq 200$	0,10	0,12	0,15	0,18

Từ các sự xem xét trên, địa hình lồi chồm và gió đứng của mục tiêu TBLF được giả định là loại I dựa trên tài liệu "Hướng dẫn thiết kế tuyến" của Hiệp hội Đường bộ Nhật Bản (1991) và $\alpha = 1/7 \sim 1/8$, điều đó rất phù hợp với các giá trị trong Tiêu chuẩn cầu Houshu-Shikoku.

Các thông số hỗn độn cho mục tiêu TBLF là:

- Cường độ hỗn độn: $I_u = 0,12$ (tại cao độ dầm),
- Mức độ hỗn độn: $L_u^x = 110\text{m}$ (73cm tại mức của 1/150),
- Mức độ hỗn độn: $L_u^y = 50\text{m}$ (37cm tại mức của 1/150).

Khi các thông số hỗn độn được giả định lớn hơn giá trị mục tiêu TBLF trong thí nghiệm Hầm gió, trường hợp tải trọng gió bão được xem xét để an toàn, sự phân tích gió giật sẽ được áp dụng trong thông số tiêu biểu lớn hơn, dựa trên các số liệu thu được từ kết quả thí nghiệm Hầm gió.

Bảng 3.3: Dòng gió thí nghiệm: S : 1/150 (tại chiều cao dầm)

	SUF	TBLF
Vận tốc gió (m/s)	từ 0,5 đến 6,0	từ 0,5 đến 6,0
Góc tác động (độ)	-3, 0, +3	0
Cường độ hỗn độn (%)	-	12
Mức độ hỗn độn (cm)	-	từ 30 đến 60
Năng lượng tiêu biểu	-	$\alpha = 0,12$

Vận tốc gió trong thí nghiệm từ 0,5 đến 0,6m/s trong bảng 2 là phù hợp (0,5~6,0) $\times \sqrt{150} = 6,1 \sim 73,5$ m/s. Phạm vi vận tốc gió đó trong trường hợp thí nghiệm Hầm gió sẽ phù hợp với phạm vi tốc độ gió thiết kế trong giai đoạn hoàn thiện, thi công các giai đoạn 1 và/hoặc 2.

3.3.3.3.2. Gió ngang

Hướng luồng gió ngang thí nghiệm được xác định từ sự theo dõi nêu trên và được tổng kết lại trong Bảng 3.4

Bảng 3.4: Hướng gió cho mỗi luồng

	SUF	TBLF
Phạm vi tốc độ gió (m/s)	từ 0,5 đến 6,0 (m/s)	từ 0,5 đến 6,0 (m/s)
Hướng gió (độ)	0, 15, 30 (60 các kết quả theo đó tùy ý)	0, 15 (30 các kết quả theo đó tùy ý)

Trong trường hợp luồng gió nhẹ nhàng, góc nghiêng tác dụng sẽ là 0° ngoại trừ hướng gió tác động là 0°.

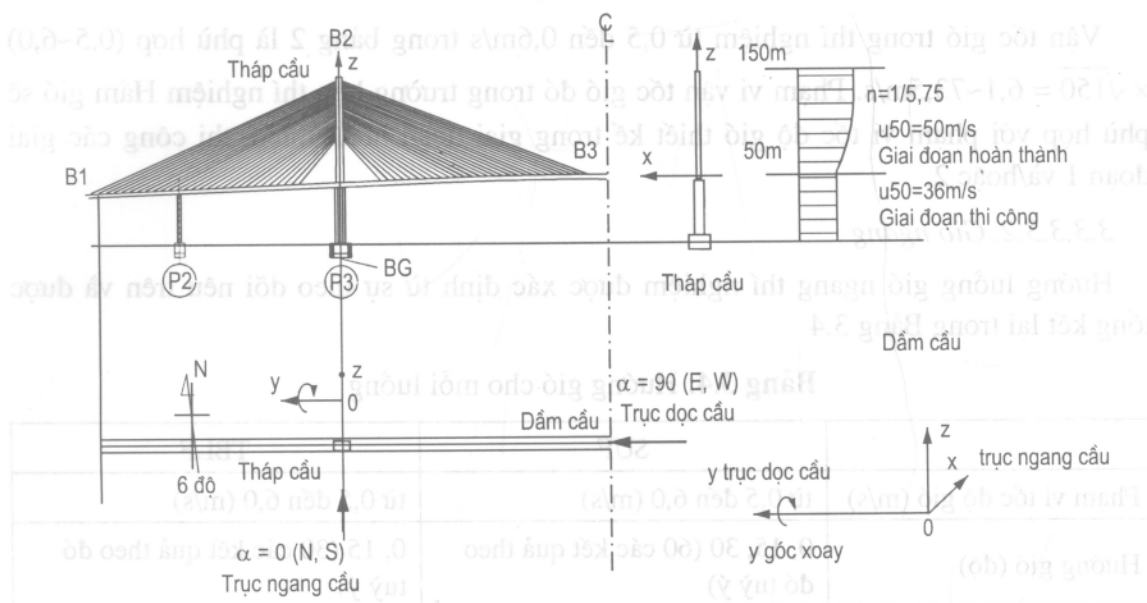
3.3.3.3.3. Trường hợp của thí nghiệm Hầm gió

Bảng tóm tắt của thí nghiệm Hầm gió được thể hiện trong bảng 3.5.

Bảng 3.5: Toàn bộ trường hợp của thí nghiệm Hầm gió

STT	Mô hình	Luồng	Góc tác động	Hướng	Vận tốc gió
1	2	3	4	5	6
B1	Giai đoạn thi công 2 (Khi cánh hẫng lớn nhất)	SUF	-3	0	0,5 tới 6,0 m/s
B2			0	0	
B3			+3	0	
B4			0	15	
B5			0	30	
B6		TBLF	0	15	
B7			0	30 (được chọn)	

1	2	3	4	5	6
C1	Giai đoạn hoàn thành	SUF	-3	0	0,5 tới 6,0 m/s
C2			0	0	
C3			+3	0	
C4			0	15	
C5			0	30 (được chọn)	
C6	TBLF	TBLF	0	15	
C7			0	30 (được chọn)	



Hình 3.7: Hệ thống tọa độ của cầu

3.3.3.3.4. Các điểm đo

Để đo đặc, tọa độ của mô hình được xác định như hình 3.7. Vị trí đo chuyển vị được thể hiện ở hình 3.4. Để đo đặc chuyển vị, cảm biến đo chuyển vị la de và cảm biến quang học được sử dụng cho dầm và tháp cầu tương ứng. Biến dạng ở đáy của trụ P3 cũng được đo và ứng suất ở đáy trụ P3 cũng được đánh giá từ các kết quả thí nghiệm.

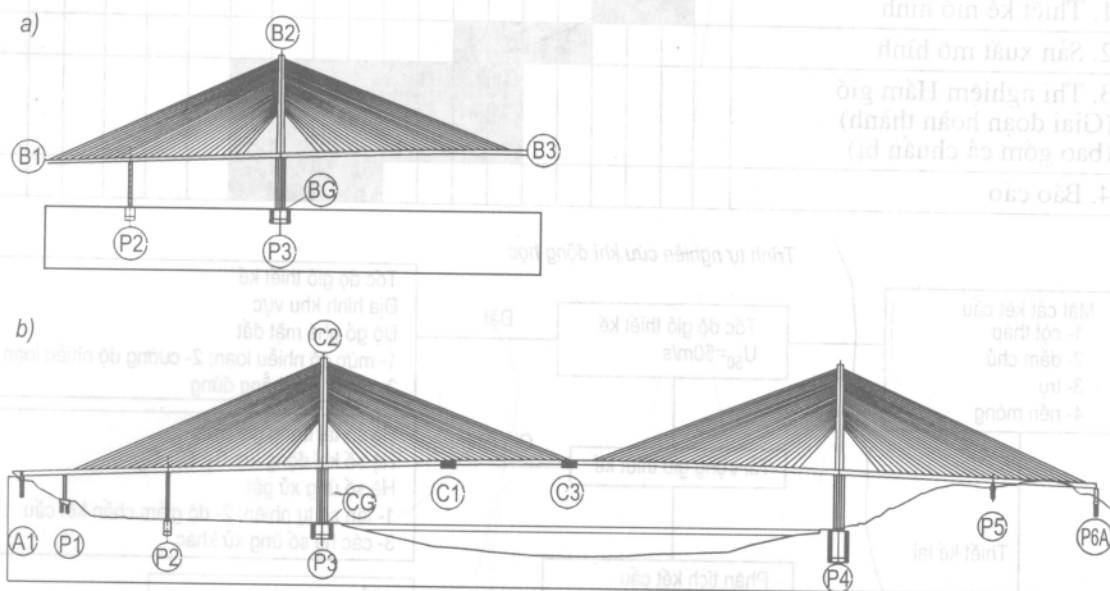
- Giai đoạn thi công 2

Bảng 3.6: Vị trí đo chuyển vị và thành phần của hệ thống thời gian A trong giai đoạn thi công 2

Điểm	Vị trí	Thành phần đo				Cảm biến
		x	y	z	θ	
B1	Đầu của dầm (phía đất liền)	o	-	o	o	La de
B2	Đỉnh của trụ tháp	•	•	-	-	Quang học
B3	Đầu của dầm (phía biển)	♦	-	o	o	La de
BG	Đáy của trụ P3	♦	♦	-	-	Đồng hồ đo biến dạng

Trong đó: o, • và ♦ là cảm biến chuyển vị la de, cảm biến chuyển vị quang học và đồng hồ đo biến dạng tương ứng.

- Giai đoạn hoàn thành



Hình 3.8. Vị trí đo chuyển vị

a) giai đoạn thi công 2; b) giai đoạn hoàn thiện

Bảng 3.7: Vị trí chuyển vị và thành phần của hệ thống thời gian A trong giai đoạn hoàn thành

Điểm	Vị trí	Thành phần đo				Cảm biến
		x	y	z	θ	
C1	1/4 nhịp giữa	-	-	o	-	La de
C2	Đỉnh của trụ tháp	•	•	-	-	Quang học
C3	Giữa nhịp giữa	o	-	o	o	La de
CG	Đáy của trụ P3	♦	♦	-	-	Đồng hồ đo biến dạng

Trong đó: o, • và ♦ là cảm biến chuyển vị la de, cảm biến chuyển vị quang học và đồng hồ đo biến dạng tương ứng.

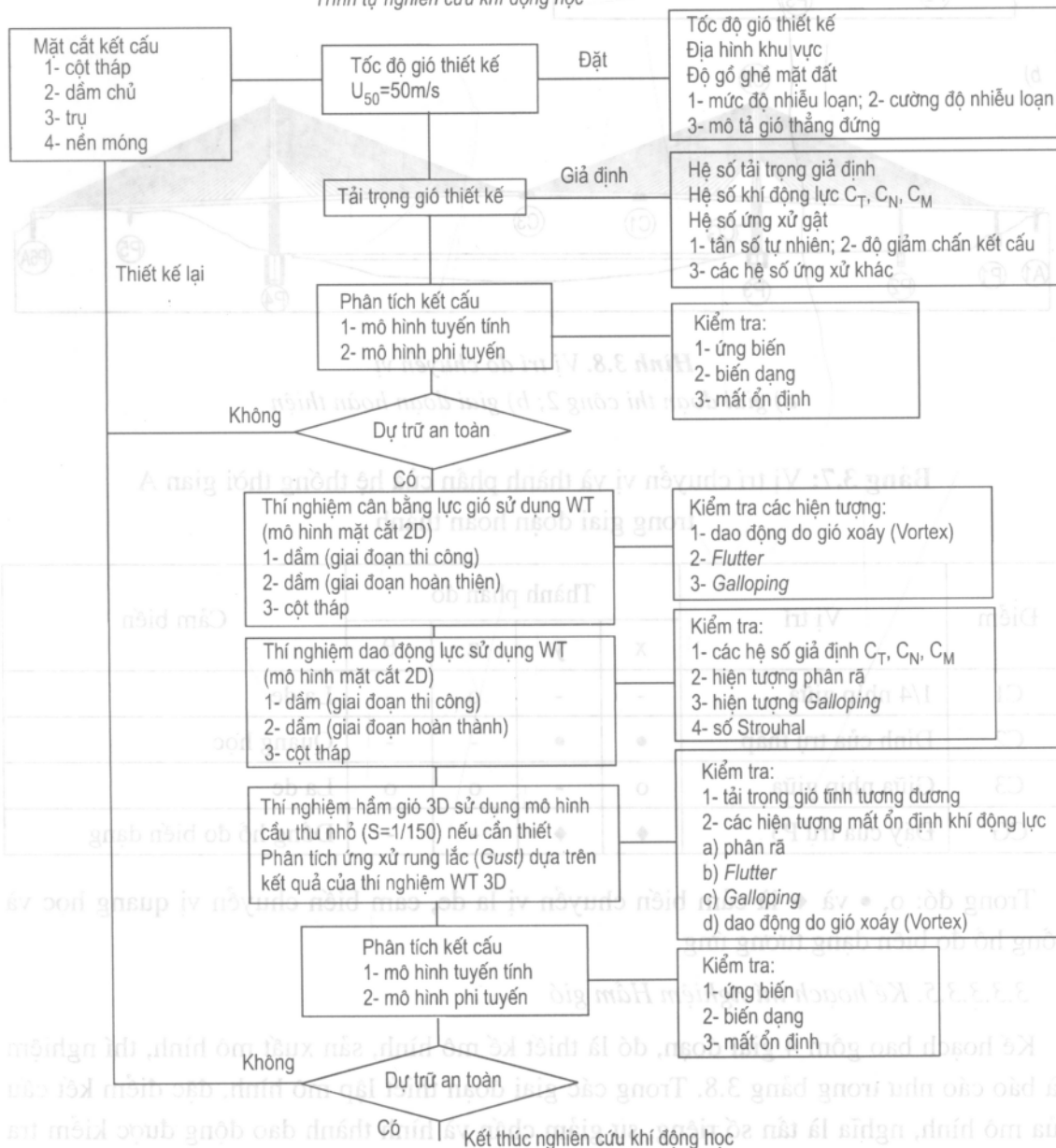
3.3.3.3.5. Kế hoạch thí nghiệm Hầm gió

Kế hoạch bao gồm 4 giai đoạn, đó là thiết kế mô hình, sản xuất mô hình, thí nghiệm và báo cáo như trong bảng 3.8. Trong các giai đoạn thiết lập mô hình, đặc điểm kết cấu của mô hình, nghĩa là tần số riêng, sự giảm chấn và hình thành dao động được kiểm tra bởi thí nghiệm dao động.

Bảng 3.8: Thời gian biểu của thí nghiệm Hầm gió

Tháng	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T1
1. Thiết kế mô hình										
2. Sản xuất mô hình										
3. Thí nghiệm Hầm gió (Giai đoạn hoàn thành) (bao gồm cả chuẩn bị)										
4. Báo cáo										

Trình tự nghiên cứu khí động học



Chương 4

HƯỚNG DẪN TÍNH TOÁN CHỐNG GIÓ ĐỘNG HỌC ĐỐI VỚI CẦU DÂY

4.1. NGUYÊN TẮC CHUNG

4.1.1. Mục đích

Bản Hướng dẫn này biên soạn nhằm đảm bảo việc thiết kế các cầu dây đường bộ, đặc biệt là các kết cấu cầu dầm dài, lớn, nhẹ và là kết cấu mềm đạt yêu cầu tiên tiến về kỹ thuật, hợp lý về kinh tế, đảm bảo an toàn tin cậy.

4.1.2. Phạm vi áp dụng

Bản Hướng dẫn này nói chung áp dụng cho việc thiết kế chống gió và kiểm toán chống gió của các loại cầu dây đường bộ có khẩu độ chính từ $40 \div 150$ m. Đối với cầu dây văng có khẩu độ trên 800m hoặc cầu treo dây võng có khẩu độ trên 1500 m vì dưới tác dụng của tải trọng của gió có thể xuất hiện tính phi tuyến cực mạnh hoặc các vấn đề khác nên không nằm trong phạm vi áp dụng của bản Hướng dẫn này.

4.1.3. Mối quan hệ với các tiêu chuẩn khác

Bản Hướng dẫn này chỉ đề cập tới việc thiết kế chống gió và kiểm toán chống gió đối với kết cấu cầu đường bộ. Việc thiết kế về cường độ, ổn định, biến dạng v.v... của các kết cấu hoặc các cấu kiện kết cấu trong trạng thái năng lực chịu tải cực hạn (trạng thái giới hạn cường độ) và trạng thái cực hạn sử dụng (trạng thái giới hạn sử dụng) thông thường v.v... vẫn phải tuân thủ theo các quy định trong các Quy phạm, Tiêu chuẩn có liên quan của Nhà nước hoặc của Bộ Giao thông.

4.1.4. Các thuật ngữ và ký hiệu cơ bản

4.1.4.1. Các thuật ngữ cơ bản

(1) Tốc độ gió cơ bản

Tốc độ gió cơ bản được hiểu là tốc độ gió tối đa bình quân năm 10 phút có tần số xuất hiện chỉ 1% ở độ cao 10m tính từ chỗ mặt đất bằng phẳng rộng rãi thuộc khu vực vị trí cầu (nói chung lấy ở phạm vi trạm khí tượng quản lý. Các trạm khí tượng thường đặt ở nơi bằng phẳng, trống trải).

(2) Tốc độ gió chuẩn thiết kế (không xét khẩu độ cầu)

Trên cơ sở tốc độ gió cơ bản ở khu vực vị trí cầu, tốc độ gió chuẩn thiết kế là tốc độ gió tối đa bình quân năm 10 phút có tần số xuất hiện 1% tại cao độ mặt cầu có xét ảnh hưởng độ gồ ghề bề mặt cục bộ tại vị trí cầu.

(3) Tốc độ gió kiểm tra dao động riêng

Đây là tốc độ gió giới hạn đảm bảo cho cầu tránh được dao động riêng tự kích. Dao động tự kích (dao động trông trành (*Flutter*) và dao động tiến triển nhanh (*Galloping*)) là một loại dao động phát tán có tính chất nguy hiểm. Khi thiết kế cần phải chọn cấu tạo sao cho tốc độ gió giới hạn dao động riêng cao hơn tốc độ gió tiêu chuẩn thiết kế của cầu và phải có một mức độ dự trữ an toàn nhất định.

(4) Góc tác dụng (góc thổi) của gió

Do ảnh hưởng của địa hình đối với mặt nằm ngang, hướng gió gần mặt đất có khả năng tạo ra độ nghiêng nhất định, gọi là góc tác dụng (góc thổi) của gió. Đối với cầu, gió có góc tác dụng (góc thổi) khác không ($\neq 0$) sẽ làm cho cầu dao động như dao động trông trành, gây ảnh hưởng bất lợi. Thông thường, góc tác dụng (góc thổi) trung bình khi tốc độ gió mạnh sẽ vào khoảng $\pm 3^\circ$.

(5) Tải trọng gió thiết kế

Tải trọng gió thiết kế là tải trọng gió được dùng để thiết kế chống gió theo lực tĩnh. Đối với cầu có khẩu độ tương đối nhỏ, độ cứng tương đối lớn, có thể chỉ xét cường độ dưới tác dụng của tải trọng gió trận. Còn đối với kết cấu cầu mềm có khẩu độ tương đối lớn cần phải xét tác dụng tải trọng gió động lực do gió gây ra.

(6) Hệ số gió trận (xét hệ số nâng cao của tốc độ gió bình quân do thời gian ngắn)

Đây là tỷ số giữa tốc độ gió trận (tức thời) và tốc độ gió bình quân 10 phút. Khi tính toán tải trọng do gió trận gây ra thì phải sử dụng tốc độ gió tức thời (gió trận) trong khoảng thời gian $1 \div 3s$, nghĩa là lấy hệ số gió trận nhân với tốc độ gió chuẩn thiết kế.

(7) Độ gồ ghề mặt đất

Đây là chỉ tiêu phản ánh sự lồi lõm mặt đất trong thiên nhiên hoặc địa vật cao thấp, mau thưa trong lớp biên của khí quyển. Trong bản Hướng dẫn này chia làm 4 loại độ gồ ghề. Chúng ảnh hưởng tới tốc độ gió bình quân phân bố theo cao độ của gió, cũng như ảnh hưởng tới cường độ dòng gió rối và hàm mật độ phổ công suất.

(8) Hệ số lực tĩnh không khí

Đây là hệ số không thứ nguyên, đặc trưng cho các loại mặt cắt kết cấu chịu lực lớn hay nhỏ dưới tác dụng của lực tĩnh khí động.

Dưới tác dụng của lực gió bình quân, mặt cắt ngang cầu chịu tác dụng của tải trọng gió tĩnh (không biến đổi theo thời gian). Tải trọng gió tĩnh có thể phân tích thành lực

ngang, lực dọc và mô men xoắn quanh trục trọng tâm trong hệ trục tọa độ gắn với vật thể. Đối với các dạng mặt cắt khác nhau của kết cấu có thể dùng thí nghiệm Hàm gió về 3 thành phần lực của mô hình phân đoạn, đo xác định 3 hệ số không thứ nguyên phản ánh đặc điểm hình dáng vật thể, gọi chung là hệ số lực tĩnh không khí.

(9) Sự phát tán xoắn (vận) của lực gió tĩnh

Dưới tác dụng của mô men xoắn do lực gió tĩnh trong không khí, khi tốc độ gió vượt qua một trị số giới hạn nào đó, giá trị mô men lực không khí sinh ra do góc tác dụng (góc thổi) của gió tăng thêm làm cho dầm chủ đang treo hằng của cầu bị biến dạng xoắn vượt quá giá trị sức kháng mô men của kết cấu, làm cho dầm chủ xuất hiện hiện tượng phát tán xoắn không ổn định.

(10) Uốn ngang lực tĩnh

Đây là hiện tượng mất ổn định lực tĩnh xuất hiện khi tải trọng gió tĩnh theo hướng ngang tác dụng lên dầm chủ hằng vượt quá tải trọng giới hạn uốn ngang của dầm chủ.

(11) Đặc trưng dao động riêng của kết cấu

Đặc trưng dao động riêng của kết cấu bao gồm các dạng dao động vốn có của kết cấu và tần số, hệ số cản tương ứng của mỗi dạng dao động đó. Dao động do gió gây ra có tính đa dạng nên các bậc dao động chính cũng không giống nhau, vì vậy nói chung cần tính nhiều thức (mode) dao động, từ đó chọn các thức dao động chủ yếu như uốn theo phương đứng, uốn theo phương ngang và xoắn của dầm chủ để làm căn cứ phân tích dao động của gió.

(12) Dao động trông thành (Flutter)

Dao động trông thành (*Flutter*) là một loại dao động tự kích thích phát tán có tính chất nguy hiểm. Khi dao động này đạt tới tốc độ gió tới hạn, do lực phản tác dụng của luồng khí, kết cấu cầu sẽ liên tục hấp thụ thêm năng lượng làm cho biên độ dao động tăng dần, cuối cùng dẫn đến kết cấu bị phá hoại.

(13) Dao động tiến triển nhanh (Gallop)

Đối với kết cấu và cấu kiện có hình dạng không tròn, có mặt cắt tương tự hình chữ nhật với tỷ lệ cạnh dài trong phạm vi nhất định, do hiệu ứng xác suất âm của đường cong lực nâng, các kết cấu có biên độ dao động nhỏ có thể liên tục hấp thụ năng lượng gió. Khi đạt tới tốc độ gió tới hạn, năng lượng hấp thụ vào kết cấu sẽ lớn hơn năng lượng do bộ giảm chấn kết cấu đã tiêu hao, hình thành một loại dao động riêng uốn cong một bậc tự do của gió theo phương ngang.

(14) Cộng hưởng xoáy khí (Vortex-Shedding)

Dòng gió thổi qua các kết cấu có hình dạng không tròn với các dạng mặt cắt tròn, chữ nhật, hoặc hình nhiều cạnh v.v... đều có thể phát sinh ra các xoáy khí tạo thành các lực

xoáy thay đổi đan chéo ở hai bên. Khi tần số hiện tượng tách của dòng xoáy khí đạt gần bằng tần số dao động riêng của kết cấu thì sẽ xuất hiện hiện tượng cộng hưởng của kết cấu.

(15) Dao động rung lắc ngẫu nhiên (gật) (Buffeting)

Đây là dao động cưỡng bức do thành phần dòng gió rối trong khí quyển kích động gây ra, gọi là hiệu ứng dòng gió rối. Dao động rung lắc ngẫu nhiên là loại dao động có biên độ giới hạn vì chúng sinh ra tần số dao động cao, có thể dẫn đến làm kết cấu mỏi. Nếu biên độ của dao động rung lắc quá lớn sẽ làm con người cảm thấy mệt mỏi, thậm chí mất an toàn khi xe chạy trên cầu với tốc độ cao.

(16) Thí nghiệm 3 thành phần lực gió tĩnh

Nội dung của thí nghiệm này là chế tạo một mô hình cứng cho một phân đoạn của dầm chủ hoặc của trụ cầu rồi đặt vào Hầm gió để xác định 3 thành phần lực tác dụng của dòng gió trung bình: lực cản, lực nâng và mô men xoắn. Đường cong biểu diễn quan hệ giữa góc tác dụng (góc thổi) và hệ số 3 thành phần lực không thứ nguyên sẽ phản ánh tính chất khí động cơ bản của mặt cắt. Đó là tham số quan trọng để phân tích các loại dao động do gió gây nên và ổn định của lực tĩnh.

(17) Thí nghiệm mô hình phân đoạn

Người ta chế tạo mô hình cứng của các đoạn kết cấu nhịp có tính đặc trưng, đại diện của dầm chủ rồi dùng lò xo treo lên giá, tạo thành mô hình dao động có bậc tự do truyền động thẳng đứng, nằm ngang và quay được. Đặt mô hình này trong Hầm gió nhằm xác định lực động của gió. Thí nghiệm mô hình phân đoạn kết cấu nhịp có thể thỏa mãn các điều kiện tương tự, còn có thể đo trực tiếp được tốc độ gió tới hạn của dao động rung trong không gian hai chiều, cũng có thể biết các hiện tượng khí động lực bất bình thường biểu thị bằng đạo hàm khí động. Đây là một trong những thí nghiệm quan trọng nhất của kết cấu cầu trong Hầm gió.

(18) Thí nghiệm mô hình khí động đàn hồi toàn cầu

Người ta chế tạo mô hình đàn hồi không gian 3 chiều toàn cầu theo một kích thước hình học thu nhỏ nhất định và phải thỏa mãn các điều kiện tương tự về khí động học cần thiết. Sau đó đặt mô hình này trong Hầm gió có tầng biên giới khí quyển cỡ lớn để quan trắc các hiện tượng dao động do gió trong môi trường gió thổi đều và môi trường gió rối, để khảo sát tính năng chống gió của cầu diễn biến qua từng giai đoạn thí công đến giai đoạn đưa vào khai thác. Đây là một trong những phương pháp thí nghiệm chính xác nhất để nghiên cứu các dao động của cầu do gió gây ra.

(19) Khống chế dao động gió

Cần áp dụng các biện pháp khí động hoặc biện pháp cơ học nhằm nâng cao tốc độ gió tới hạn hoặc giảm biên độ dao động, bảo đảm tính an toàn chống gió cho cầu trong các tình huống sau:

- Khi tốc độ tới hạn của dao động tròn tránh do gió (dao động *Flutter*) và dao động tiến triển nhanh (*Gallop*) có tính chất nguy hiểm thấp hơn tốc độ gió thiết kế tại vị trí cầu hoặc

- Khi biên độ dao động của dạng cộng hưởng xoáy khí (*Vortex-Shedding*) và dao động rung lắc (*Buffeting*) vượt quá giới hạn có thể chấp nhận được.

(20) Bộ giảm chấn điều chỉnh khối lượng (*Turned Mass Damper*, viết tắt là *TMD*)

Đây là một thiết bị kết hợp sử dụng vật nặng có thể thay đổi khối lượng và các lò xo để tạo thành bộ giảm chấn. Thông qua việc điều chỉnh khối lượng vật nặng làm cho tần số của bộ giảm chấn biến đổi đến mức gần bằng tần số không chế của kết cấu. Lúc đó, năng lượng dao động của kết cấu sẽ truyền vào bộ giảm chấn và tiêu hao, kết quả là làm giảm dao động của kết cấu. Đây là một loại thiết bị khống chế dao động kiểu bị động thường dùng trong kết cấu cầu.

4.1.4.2. Các ký hiệu cơ bản

B - chiều rộng cầu (m)

b - nửa chiều rộng cầu (m)

C_H, C_V, C_M - hệ số lực cản nằm ngang, lực nâng, mô men xoắn của kết cấu trong hệ trục tọa độ gắn với vật thể

D_D, C_L, C_M - hệ số lực cản nằm ngang, lực nâng, mô men xoắn của kết cấu trong hệ trục tọa độ của gió

D - chiều cao hình chiếu dầm chủ (m)

E - mô đun đàn hồi của vật liệu (MPa)

f_h, f_t - tần số dao động riêng uốn thẳng đứng và xoắn của kết cấu (Hz)

G - mô đun cắt của vật liệu (MPa)

I_m - mô đun quán tính khối lượng của kết cấu trên đơn vị dài ($\text{kg.m}^2/\text{m}$)

J_x, J_y - mô men quán tính của mặt cắt đối với trục trung hoà dầm chủ (m^4)

J_d - mô men quán tính xoắn tự do của mặt cắt (m^4)

J_o - mô men quán tính xoắn ràng buộc của mặt cắt (m)

L - khẩu độ cầu (m)

I_{ux}, I_{uy} - kích thước dòng rối của tốc độ gió giật u theo phương x, y (m)

M - khối lượng kết cấu (kg);

mô men xoắn lực tĩnh của không khí (N.m)

m - khối lượng kết cấu trên một đơn vị dài (kg/m)

n - tần số gió (Hz)

P - tải trọng gió (N)

P_g - tải trọng gió trận (dòng gió rối) (N)

P_H, P_V - tải trọng gió hướng ngang và hướng thẳng đứng trong hệ toạ độ không gian cầu (N)

q - áp lực động của tốc độ gió (Pa)

$[q_{cx}]$ - tải trọng giới hạn uốn ngang của dầm chủ cầu treo (N)

r - bán kính quán tính của mặt cắt (m)

S_t - số Strouhal

$S_u(n), S_v(n), S_w(n)$ - các hàm mật độ phổ công suất của gió giật theo hướng gió thuận, hướng ngang và hướng thẳng đứng.

T - chu kỳ dao động (s)

T_h - số Theodorsen

U, V, W - tốc độ gió theo phương nằm ngang và thẳng đứng của dòng gió chủ, phương vuông góc với dòng gió chủ (m/s)

$\overline{U}, \overline{V}, \overline{W}$ - tốc độ gió bình quân theo phương nằm ngang và thẳng đứng của dòng gió chủ, phương vuông góc với dòng gió chủ (m/s)

u, v, w - tốc độ gió động của tốc độ gió U, V, W (thành phần gió động)

U_{10} - tốc độ gió cơ bản tại điểm cách mặt đất hoặc mặt nước 10 m (m/s)

U_d - tốc độ gió chuẩn thiết kế (m/s)

U_g - tốc độ gió trận (m/s)

U_z - tốc độ gió tại cao độ z cách mặt đất (hoặc mặt nước) (m/s)

U_{cr} - tốc độ gió giới hạn tròn tròn (m/s)

U_{cg} - tốc độ gió tới hạn gây dao động tròn tròn (m/s)

U_{cv} - tốc độ gió tới hạn gây cộng hưởng xoáy khí (m/s)

U_{co} - tốc độ gió tới hạn gây dao động tròn tròn của bản phẳng (m/s)

x, y, z - 3 toạ độ trong hệ toạ độ vuông góc

Z - chiều cao chuẩn của cầu (kết cấu hoặc cấu kiện) (m)

Z_0 - chiều cao thô gồ ghề mặt đất (m)

Z_g - chiều cao từ mặt đất đến tầng khí quyển biên

α - hàm số mũ của mặt cắt tốc độ gió dòng cắt khí quyển. Góc tác dụng (góc thổi) của gió (0)

ε - tỷ lệ tần số giữa dao động xoắn và uốn thẳng đứng của dầm chủ

δ - tỷ lệ suy giảm logarit

ξ - hệ số cản (giảm chấn)

ξ_s - hệ số giảm chấn của kết cấu

η_s - hệ số hiệu chỉnh hình dạng của mặt cắt dầm chủ không phẳng

η_α - hệ số hiệu ứng góc tác dụng (góc thổi)

μ - tỷ lệ mật độ của vật liệu kết cấu và không khí

μ_f - hệ số hiệu chỉnh khi xét ảnh hưởng động của tốc độ gió và đặc tính tương quan phẳng

ρ - mật độ không khí (kg/m^3)

ρ_s - khối lượng riêng vật liệu kết cấu (kg/m^3)

$\sigma(x)$ - phương sai căn chuyển vị dao động vẩy tại toạ độ x

$\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ - phương sai căn tiêu chuẩn của tốc độ gió (m/s)

$\phi(x)$ - hàm dao động của kết cấu

ω - tần số góc của kết cấu

ω_b, ω_t - tần số góc uốn thẳng đứng và xoắn của kết cấu

4.2. NGUYÊN TẮC CƠ BẢN CỦA THIẾT KẾ CHỐNG GIÓ

4.2.1. Tác dụng của gió đối với cầu

Phân loại gió tự nhiên thành hai thành phần: gió bình quân và gió động, một cách gần đúng có thể xét riêng tác dụng tĩnh và động của chúng đối với cầu. Đứng trên góc độ ứng dụng vào công trình mà xét thì việc bỏ qua tác dụng tương hỗ giữa các dao động do gió bình quân và gió động gây ra, không gây ra sự sai lệch gì rõ rệt, mà giúp cho việc phân tích được đơn giản hơn nhiều. Hiện nay trong phân tích dao động rung lắc (*Buffeting*) đã xét đến tác dụng giảm chấn khí động do gió bình quân gây ra.

4.2.1.1. Quy định chung

Tác động của gió đối với cầu phụ thuộc vào đặc tính tự nhiên của gió, đặc tính động lực của kết cấu và tác dụng qua lại giữa gió và kết cấu. Có thể phân chia gió tự nhiên thành gió bình quân không thay đổi theo thời gian và gió giật biến đổi theo thời gian và cộng tác dụng hai bộ phận đó lại. Phần sau sẽ lần lượt xét tác dụng của từng loại gió đối với cầu.

4.2.1.2. Tác dụng lực tĩnh của gió

Dưới tác dụng của gió bình quân, giả sử kết cấu đứng yên hoặc có dao động nhỏ nhưng không chịu ảnh hưởng lực tác dụng của không khí, tức là bỏ qua hiệu ứng không bình thường biến đổi theo thời gian mà dòng rối và xoáy do luồng khí vòng qua kết cấu cầu gây nên, mà chỉ xét lực tác dụng của không khí thông thường, gọi là tác dụng tĩnh của gió.

4.2.1.3. Tác dụng động lực của gió

Tác dụng động lực đàn hồi của không khí dưới tác dụng của dòng gió rối gần mặt đất đối với cầu là một hệ dao động có thể phân thành hai loại lớn:

a) Dưới tác dụng của gió, phản lực của kết cấu đối với lực không khí sẽ sinh ra một loại cơ chế dao động riêng, như khi dao động tròn tròn (*Flutter*) và dao động tiến triển

nhanh (*Gallop*ing) đạt tới trạng thái giới hạn, sinh ra dao động lan truyền (phát tán) có tính chất nguy hiểm.

b) Dưới tác dụng của gió động, có thể xuất hiện một loại dao động cưỡng bức có biên độ dao động hạn chế và tần số dao động cao gọi là dao động rung lắc (*Buffeting*). Cộng hưởng xoáy khí (*Vortex-Shedding*) tuy có tính chất tự kích thích nhưng cũng là dao động có biên độ hạn chế. Vì vậy có tính chất song trùng.

Bảng 4.1: Phân loại tác dụng của gió đối với cầu

Phân loại	Hiện tượng				Cơ chế tác dụng
Tác dụng lực tĩnh	Nội lực và biến dạng do tải trọng gió tĩnh gây ra				Lực cản, lực nâng và tác dụng mômen lực do lực nén gió tĩnh của gió bình quân gây nên
	Lực tĩnh không ổn định		Phát tán xoắn vặn		Tác dụng mômen lực (xoắn) tĩnh
			Uốn khuất phục theo phương ngang		Tác dụng lực cản tĩnh
Tác dụng động lực	Dao động rung lắc- <i>Buffeting</i> (ảnh hưởng dòng gió rối)		Biên độ dao động hữu hạn		Tác dụng dòng gió rối
	Dao động riêng	Dao động xoắn	Một bậc tự do	Dao động phát tán	Hiệu ứng bộ giảm chấn khí động của lực kích động, bộ cản đẩy chuyển
		Dao động tiến triển nhanh			
		Dao động rung xoắn			
		Dao động rung tổ hợp ngẫu nhiên cổ điển	Hai bậc tự do		Đẩy chuyển cứng khí động của lực kích động

4.2.2. Mục đích và phương pháp thiết kế chống gió

Thí nghiệm trong Hầm gió, nhất là thí nghiệm mô hình phân đoạn với chi phí không lớn, là một biện pháp quan trọng để thiết kế chống gió cho cầu. Qua thí nghiệm, có thể trực tiếp tìm ra các tham số khí động của mặt cắt cầu và tốc độ giới hạn, để chỉ đạo chắc chắn việc thiết kế chống gió.

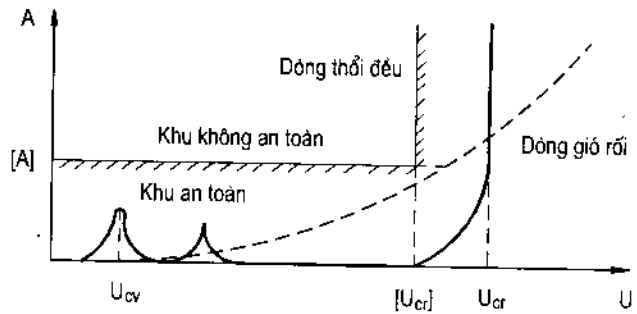
Công tác thiết kế chống gió chia thành 3 giai đoạn, để thích hợp với các giai đoạn thiết kế khác nhau và yêu cầu kiểm tra chống gió cho các cầu có quy mô khác nhau.

4.2.2.1. Mục đích thiết kế chống gió

Mục đích thiết kế chống gió cho cầu trước hết là bảo đảm trong giai đoạn thi công cũng như trong giai đoạn khai thác sau khi xây dựng xong, cầu chịu được tác dụng lực tĩnh của tải trọng gió tối đa có khả năng xảy ra và chịu tác dụng động lực do gió gây ra một cách an toàn.

4.2.2.2. Yêu cầu tính toán

Vì gió tự nhiên gây ra các loại dao động do gió, nên trong thiết kế chống gió của cầu, trước tiên yêu cầu phải chọn cấu tạo sao cho tốc độ gió tới hạn phát sinh dao động tròn trập (*Flutter*) và dao động tiến triển nhanh (*Galloping*) có tính chất nguy hiểm là lớn hơn so với tốc độ gió thiết kế cầu (đã được chọn theo điều kiện tự nhiên khu vực xây dựng cầu) với mức độ an toàn phù hợp chọn trước. Như vậy sẽ bảo đảm chắc chắn tính ổn định chống gió của kết cấu trong các giai đoạn thi công và khai thác.



Hình 4.1: Khu vực an toàn dao động do gió của cầu

Đồng thời yêu cầu hạn chế biên độ dao động tối đa của dao động xoáy khí (*Vortex-Shedding*) và dao động rung lắc (*Buffeting*) trong phạm vi chấp nhận được, để tránh những vấn đề như gây mỏi cho kết cấu, gây cảm giác khó chịu cho người, chạy xe mất an toàn v.v... (chi tiết xem sơ đồ hình 4.1).

4.2.2.3. Yêu cầu về giải pháp xử lý tăng khả năng chống gió

Nếu phương án thiết kế cấu tạo cầu ban đầu không đáp ứng yêu cầu chống gió thì phải sửa đổi thiết kế hoặc dùng các biện pháp khí động, biện pháp kết cấu hoặc biện pháp cơ học v.v... để nâng cao tính ổn định chống gió của kết cấu hoặc làm giảm biên độ dao động do gió gây ra.

4.2.2.4. Yêu cầu về thí nghiệm Hầm gió

Đặc trưng của dòng gió rối trong không khí rất phức tạp và các đặc trưng khí động của mặt cắt ngang cầu là vật thể có hình dạng không theo quy tắc nào nên cũng rất phức tạp. Do đó hiện nay chưa có cách nào để xây dựng một mô hình toán học miêu tả một cách đầy đủ tác dụng tương hỗ giữa gió và kết cấu, mà chỉ có thể thông qua con đường nửa lý thuyết, nửa thực nghiệm hoặc hoàn toàn thực nghiệm để tìm lời giải gần đúng. Do vậy, thí nghiệm trong Hầm gió là một biện pháp quan trọng không thể thiếu trong việc thiết kế chống gió cho cầu.

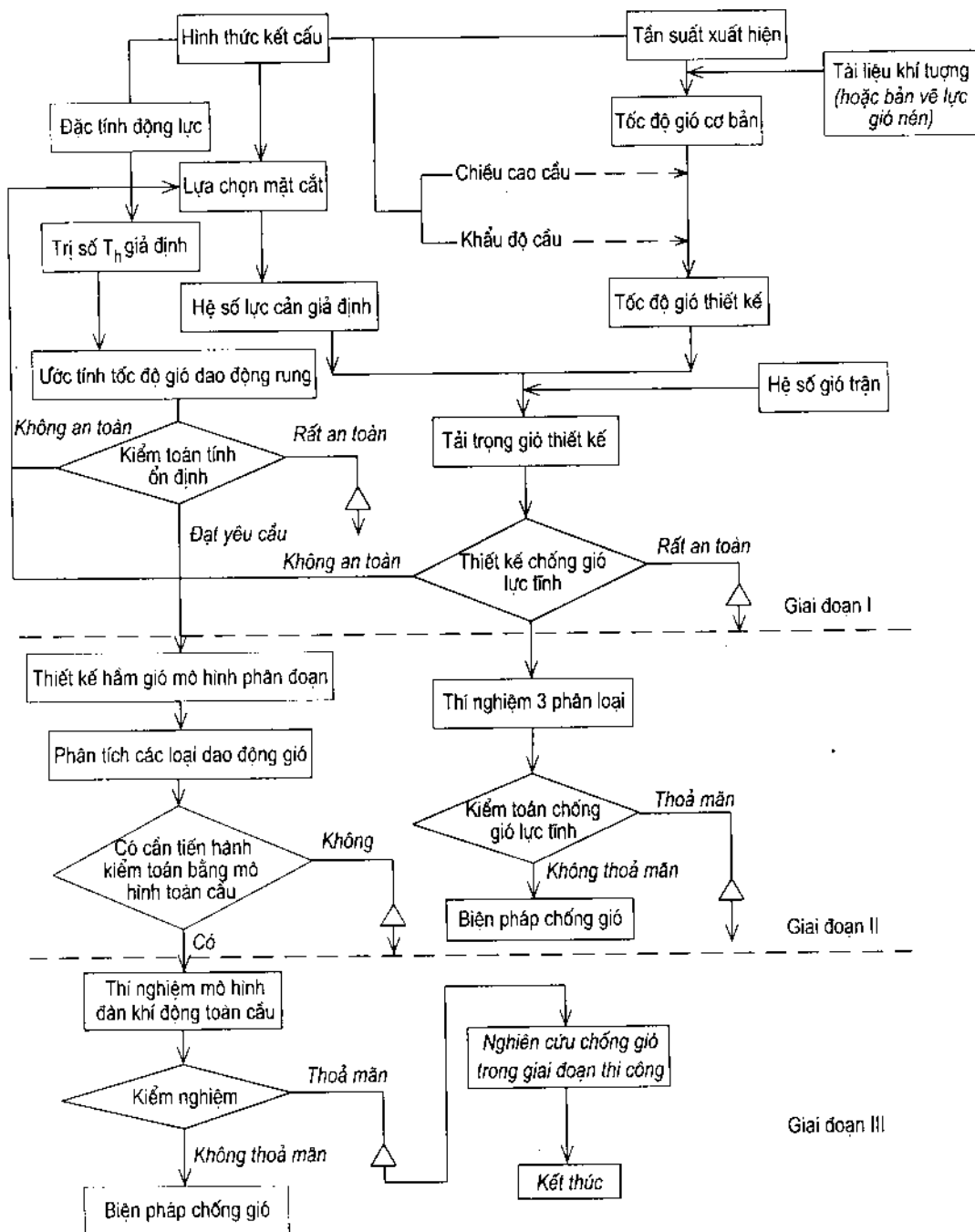
4.2.2.5. Lựa chọn phương pháp tính toán và thí nghiệm

Trong các giai đoạn thiết kế cầu khác nhau, có thể căn cứ vào tình hình cụ thể để chọn sử dụng các phương pháp thiết kế chống gió và cách thí nghiệm Hầm gió có độ chính xác khác nhau.

Đối với cầu lớn thông thường, ở giai đoạn thiết kế sơ bộ, có thể dùng các công thức gần đúng để tiến hành ước tính nội lực tải trọng gió tĩnh và đặc tính ổn định động lực trong các phương án. Sau khi đã xác định phương án mới thông qua việc thí nghiệm trong Hầm gió bằng mô hình phân đoạn của kết cấu nhịp để đo các tham số, kiểm toán việc chống gió và phân tích các loại dao động gió.

Đối với các cầu có tính chất quan trọng, ngay trong giai đoạn thiết kế sơ bộ, cần chọn loại hình dạng khí động lực qua thí nghiệm Hầm gió để làm căn cứ chọn mặt cắt ngang đầm chủ. Trong giai đoạn thiết kế kỹ thuật lại phân tích dao động gió và kiểm tra việc chống gió một cách tỷ mỉ đối với phương án mặt cắt đã chọn và xác định lại kết quả phân tích bằng các thí nghiệm Hầm gió bằng mô hình 3D toàn cầu.

4.2.2.6. Trình tự thiết kế chống gió (xem hình 4.2)



Hình 4.2: Trình tự thiết kế chống gió cho cầu dây

4.2.3. Các yếu tố quan trọng trong thiết kế chống gió

5 yếu tố trọng yếu nêu trong mục này là những vấn đề cần đặc biệt coi trọng khi thiết kế chống gió cho cầu. Các tham số đặc tính của gió là căn cứ của tải trọng gió (tĩnh và động); các tham số đặc trưng động lực học của cầu là cơ sở để tiến hành phân tích các loại dao động do gió gây ra, còn tính ổn định dao động tròng trành (*Flutter*) và ảnh hưởng dao động rung lắc (*Buffeting*) là hai hình thức dao động rất quan trọng liên quan đến an toàn của cầu và cũng là nội dung kiểm tra chống gió chủ yếu.

4.2.3.1. Các tham số đặc tính của gió

Cần điều tra, thu thập tài liệu khí tượng để nắm được đặc tính gió ở vị trí cầu và dùng phương pháp chính xác để xác định các thông số hợp lý sử dụng trong thiết kế chống gió. Cần đặc biệt chú ý tới địa hình địa mạo, hướng gió thổi đặc thù tại địa điểm xây dựng cầu để tiện cho việc điều chỉnh cần thiết đối với trị số lấy theo quy định thông thường.

4.2.3.2. Các đặc trưng động lực học của kết cấu cầu

Phân tích đặc trưng động lực học kết cấu cầu là cơ sở phân tích dao động gió. Cần sử dụng mô hình cơ học hợp lý và chú ý xử lý chính xác các điều kiện biên. Cần so sánh kết quả tính toán với cầu tương tự (tốt nhất là có số liệu đo đạc thực tế) để kiểm tra lại tính hợp lý, chắc chắn của cầu, trong đó đặc biệt phán đoán chính xác dao động uốn đứng, uốn ngang, xoắn đối xứng và xoắn phản đối xứng của dầm chủ từ bậc II trở xuống.

4.2.3.3. Tải trọng gió đối với cầu

Tải trọng gió đối với cầu được tổ hợp từ hai thành phần tải trọng là tải trọng gió lực tĩnh và tải trọng gió lực động. Tải trọng gió lực tĩnh gồm lực cản, lực nâng và mômen lực. Tải trọng gió lực động là lực quán tính kết cấu được sinh ra bởi dao động của gió gây ra. Vì để gây ra dao động cần một thời gian kéo dài nhất định của tác động gió nên có thể sử dụng gió bình quân trong khoảng thời gian tương đối lớn để làm tốc độ gió thiết kế gây ra dao động.

4.2.3.4. Tốc độ gió tới hạn dao động tròng trành (*Flutter*)

Tốc độ gió tới hạn dao động tròng trành (*Flutter*) là tốc độ gió bắt đầu làm cho kết cấu cầu phát sinh dao động tròng trành (*Flutter*) có tính chất phát tán. Khi tốc độ gió bên ngoài thấp hơn tốc độ gió tới hạn thì dao động suy giảm. Để đề phòng tránh loại dao động nguy hiểm làm hư hỏng cầu cần bảo đảm sao cho tốc độ gió tới hạn dao động tròng trành (*Flutter*) của kết cấu cầu lớn hơn tốc độ gió chuẩn thiết kế có khả năng xuất hiện ở nơi vị trí cầu và phải có hệ số an toàn nhất định.

4.2.3.5. Ảnh hưởng dao động rung lắc (giật), (Buffeting, Gust)

Dao động rung lắc là loại dao động cưỡng bức ngẫu nhiên dưới tác dụng của dòng gió rối. Ảnh hưởng dao động giật tùy thuộc vào đặc tính động lực của cầu, đặc tính khí động của mặt cắt đầm chủ và đặc tính dòng gió rối.

4.3. ĐẶC TÍNH GIÓ GẦN MẶT ĐẤT ĐƯỢC XÉT TRONG THIẾT KẾ CHỐNG GIÓ

4.3.1. Quy định thông thường

Đặc tính gió nêu trong đề mục này chủ yếu phục vụ cho việc thiết kế chống gió động cho cầu. Các giả định về đặc tính gió, tải trọng gió và sự tổ hợp các tải trọng khác v.v... trong thiết kế chống gió tĩnh là để tính toán nội lực và chuyển vị v.v... của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng gió lớn nhất tức thời. Vì vậy tải trọng gió là tức thời, nghĩa là tải trọng gió trận do tốc độ gió trận gây ra trong một khoảng cách thời gian cực ngắn.

Một phương pháp giải quyết khác trong thiết kế chống gió tĩnh là phân chia tốc độ gió thành 2 thành phần: tốc độ gió bình quân với thời gian tương đối dài và tốc độ gió động luôn luôn biến đổi quanh tốc độ gió bình quân; tải trọng gió cũng phân thành 2 thành phần tương ứng: Tải trọng gió tĩnh ứng với tốc độ gió bình quân và tải trọng gió động ứng với tốc độ gió động có trị số cực trị (xem Mục 4.4).

4.3.1.1. Cầu là một kết cấu nằm trong tầng khí quyển, dưới tác dụng của gió tự nhiên sẽ xuất hiện biến dạng, ứng suất, dao động. Nếu thiết kế không hợp lý có thể làm cho kết cấu bị phá hoại hoặc mỏi, biến dạng quá lớn và nội lực quá lớn. v.v... Trong thiết kế chống gió cho cầu việc nắm vững các đặc tính gió tự nhiên là điều hết sức quan trọng.

4.3.1.2. Trong phạm vi khoảng không cách mặt đất $500 \div 1000\text{m}$, tốc độ gió hầu như không chịu ảnh hưởng của điều kiện địa hình mặt đất. Trong phạm vi dưới 500m của tầng khí quyển thì tốc độ gió chịu ảnh hưởng của nhiều nhân tố như vị trí địa lý, điều kiện địa hình, độ gồ ghề mặt đất, độ cao, nhiệt độ v.v... và không ngừng biến đổi theo không gian, thời gian, xung quanh tốc độ gió bình quân so với mặt phẳng nằm ngang, góc tác dụng hay còn gọi là góc công, cường độ của gió động, thành phần, chu kỳ, tương quan không gian v.v...

4.3.2. Tốc độ gió cơ bản

Do gió tự nhiên gần mặt đất, chịu ảnh hưởng rất lớn về địa hình và độ gồ ghề mặt đất, nên khi thiết kế chống gió cho cầu phải căn cứ vào các số liệu quan trắc được về tốc độ gió ở vị trí cầu mà suy đoán và xác định tốc độ gió thiết kế. Tuy nhiên, trong đại đa số trường hợp ở địa điểm xây dựng cầu không có hoặc không đủ số liệu quan trắc về tốc độ gió, nên không thể tìm ra một cách trực tiếp tốc độ gió thiết kế cho cầu; lúc đó cần

thông qua tài liệu về tốc độ gió gián tiếp để xác định được tốc độ gió thiết kế. Tài liệu có thể dễ dàng tìm được là các tài liệu về tốc độ gió ở Trạm khí tượng thuộc địa phương xây dựng cầu.

Ví dụ như Tiêu chuẩn quan trắc về tốc độ gió quy định trong ngành khí tượng Việt Nam và Trung Quốc là tốc độ gió bình quân 10 phút ở cao độ 10 m cách mặt đất tại khu vực bằng phẳng thoáng đãng. Theo quy định trong "Quy phạm thông dụng thiết kế cầu cống đường bộ Trung Quốc" (JTJ 021-89), áp lực gió cơ bản tính trong kỳ hạn tái xuất hiện 100 năm; Trong "Tiêu chuẩn thiết kế cầu Việt Nam 22TCN 272-05" cũng quy định như trên. Do vậy trong bản Hướng dẫn này lấy tốc độ gió cơ bản là tốc độ gió tối đa trung bình năm 10 phút của kỳ hạn tái xuất hiện 100 năm, ở cao độ 10 m cách mặt đất bằng phẳng thoáng đãng. Qua đó thấy rằng tốc độ gió cơ bản không phải là tốc độ gió tại vị trí cầu mà là tốc độ gió ở vùng địa mạo có tính đại diện (tức là mặt đất bằng phẳng thoáng đãng) của một vùng tương đối rộng thuộc phạm vi quản lý của Trạm khí tượng tại địa phương xây dựng cầu. Chỉ khi vị trí xây dựng cầu nằm trong vùng bằng phẳng thoáng đãng thì tốc độ gió cơ bản mới đại diện cho tốc độ gió ở vị trí cầu.

Các tài liệu tham khảo của Trung Quốc và Nhật Bản cho thấy tốc độ gió tối đa hàng năm theo sự phân bố loại cực trị I, nên trong bản Hướng dẫn này cũng đề nghị lấy sự phân bố loại cực trị I làm phương pháp tính tốc độ gió tối đa hàng năm chu kỳ tái xuất hiện 100 năm.

4.3.2.1. Phương pháp xác định tốc độ gió cơ bản

(1) Trường hợp Trạm khí tượng tại địa phương xây dựng cầu có đầy đủ số liệu quan trắc về tốc độ gió thì thông thường có thể giả thiết tuân theo phân bố loại I của tốc độ gió tối đa năm, từ tốc độ gió tối đa bình quân năm 10 phút suy ra trị số xác suất kỳ vọng toán học của tần suất xuất hiện 1% để làm tốc độ gió cơ bản.

(2) Trường hợp tại địa phương xây dựng cầu thiếu các số liệu quan trắc về tốc độ gió thì dùng bản đồ phân bố áp lực gió cơ bản; trị số của Việt Nam có thể lấy từ Tiêu chuẩn 22TCN 272-05 lấy áp lực gió cơ bản ở khu vực xây dựng cầu tính đổi ra tốc độ gió cơ bản:

$$U_{10} = 0,836.U_{20} \quad (4.1a)$$

$$U_{20} = \sqrt{1,6.W_0} \quad (4.1b)$$

trong đó:

W_0 - áp lực gió cơ bản ở khu vực xây dựng cầu, rút ra từ bản đồ phân bố áp lực gió cơ bản trị số của Việt Nam có thể lấy từ Tiêu chuẩn 22TCN 272-05

U_{20} - tốc độ gió cơ bản ở độ cao 20m, m/s.

(Ghi chú: Đề nghị từ nay về sau chiều cao chuẩn trong bản đồ phân bố áp lực gió nêu trong quy phạm từ 20m đổi thành 10m).

(3) Đối với những cầu quan trọng nằm trong quy hoạch thì ngay trong thời kỳ bắt đầu quy hoạch, cần xây dựng Trạm quan trắc tốc độ gió để có các số liệu tốc độ gió chính xác hơn.

4.3.3. Tốc độ gió tiêu chuẩn thiết kế

Một số tài liệu nghiên cứu cho thấy tốc độ gió bình quân phân bố theo chiều cao có đặc điểm sau: ở chiều cao trên 100 m tuân theo quy luật hàm số mũ, còn dưới 100 m tuân theo quy luật hàm số lôgarit. Trong bản Hướng dẫn này thống nhất lấy theo quy luật hàm số mũ. Trong bảng 4.2, việc phân chia lại độ gồ ghề mặt đất và chọn trị số mũ α tham khảo trong "Hướng dẫn thiết kế chống gió cho cầu" của Nhật Bản, và "Hướng dẫn thiết kế chống gió cho cầu" của Trung Quốc.

Khi dùng công thức (4.3) để tính tốc độ gió chuẩn thiết kế U_d , thì chiều cao z trong bảng 4.3, về nguyên tắc, lấy mặt biển, mặt nước hoặc mặt đất làm mặt chuẩn (đối với sông ngòi thì mặt chuẩn là mặt nước có mực nước trung bình, là mực nước mà trong nửa năm không dưới mức đó; đối với mặt biển lấy mặt biển trung bình hoặc lấy vị trí thủy triều trung bình làm mặt chuẩn). Đối với dầm chủ, cao độ z là cự ly từ mặt cầu ở khẩu độ chính đến mặt chuẩn; đối với trụ cầu cao độ z là khoảng cách từ 0,65 chiều cao trụ đến mặt chuẩn.

Trường hợp số liệu quan trắc tốc độ gió ở vị trí cầu không đầy đủ, khi muốn sử dụng tương quan giữa các số liệu tại vị trí cầu và tại trạm khí tượng lân cận để tìm tốc độ gió chuẩn thiết kế, thì cần chú ý tốc độ gió tương đối cao (thí dụ gió trận cấp 6) giữa hai nơi đó để phân tích, nếu không sai số sẽ tương đối lớn.

4.3.3.1. Sự thay đổi tốc độ gió theo chiều cao

Giả thiết rằng tốc độ gió trong khí quyển phân bố theo chiều cao thẳng đứng theo quy luật hàm số mũ tức là:

$$\frac{U_z}{U_{10}} = \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (4.2)$$

trong đó:

U_z - tốc độ gió ở độ cao z (m/s)

α - chỉ số mũ, đại lượng không thứ nguyên, có xét tới độ gồ ghề mặt đất, xem bảng 4.2

4.3.3.2. Phân loại độ gồ ghề mặt đất

Để tiện cho việc xác định tốc độ gió chuẩn thiết kế tại các địa điểm có độ gồ ghề mặt đất khác nhau, người ta phân ra 4 loại độ gồ ghề mặt đất (xem bảng 4.2).

Bảng 4.2: Phân loại độ gồ ghề của mặt đất

Phân loại độ gồ ghề mặt đất	Tình trạng mặt đất	α
I	Trên mặt biển, bờ biển	0,12
II	Trên ruộng vườn, đất bằng phẳng trồng trãi; khu vực có cây cối, khối kiến trúc thấp, thưa thớt v.v...	0,16
III	Khu vực nhiều cây cối, khối kiến trúc thấp tầng dày đặc; khu vực có khối kiến trúc cao tầng, trung tầng thưa thớt; khu vực đồi gò thoải	0,22
IV	Khu vực tập trung nhà cao tầng, trung tầng; khu vực đồi núi chập trùng	0,30

4.3.3.3. Tốc độ gió cơ bản và tốc độ gió tiêu chuẩn thiết kế

Giữa tốc độ gió tiêu chuẩn thiết kế và tốc độ gió cơ bản có công thức quan hệ sau đây:

$$U_d = K_I \cdot U_{10} \quad (4.3)$$

trong đó:

K_I - hệ số hiệu chỉnh không thứ nguyên có xét tới ảnh hưởng độ cao và độ gồ ghề mặt đất khác nhau (xem bảng 4.3). Trong đó địa hình loại II là loại địa hình tiêu chuẩn đã quy định trong định nghĩa gió cơ bản.

Bảng 4.3: Hệ số hiệu chỉnh K_I

Phân loại độ gồ ghề mặt đất Cao độ (m)	I	II	III	IV
<i>l</i>	2	3	4	5
$0 < z \leq 5$	1,11	1,00	0,83	0,75
$5 < z \leq 10$	1,46	1,00	0,83	0,75
$10 < z \leq 15$	1,24	1,04	0,83	0,75
$15 < z \leq 20$	1,29	1,09	0,85	0,75
$20 < z \leq 25$	1,33	1,14	0,90	0,75
$25 < z \leq 30$	1,36	1,18	0,94	0,75
$30 < z \leq 35$	1,39	1,21	0,98	0,77
$35 < z \leq 40$	1,41	1,24	1,01	0,80
$40 < z \leq 45$	1,43	1,26	1,04	0,83
$45 < z \leq 50$	1,45	1,28	1,07	0,86
$50 < z \leq 60$	1,47	1,31	1,11	0,90
$60 < z \leq 70$	1,50	1,35	1,15	0,94
$70 < z \leq 80$	1,53	1,38	1,18	0,98
$80 < z \leq 90$	1,55	1,41	1,22	1,02
$90 < z \leq 100$	1,57	1,43	1,25	1,06

<i>I</i>	2	3	4	5
$100 < z \leq 110$	1,59	1,46	1,27	1,09
$110 < z \leq 120$	1,61	1,48	1,30	1,12
$120 < z \leq 130$	1,62	1,50	1,32	1,14
$130 < z \leq 140$	1,64	1,52	1,35	1,17
$140 < z \leq 150$	1,65	1,53	1,37	1,20
$150 < z \leq 160$	1,67	1,55	1,39	1,22
$160 < z \leq 170$	1,68	1,57	1,41	1,24
$170 < z \leq 180$	1,69	1,58	1,43	1,26
$180 < z \leq 190$	1,70	1,60	1,44	1,29
$190 < z \leq 200$	1,71	1,61	1,46	1,31

Độ gồ ghề mặt đất từ loại I ~ III theo "Tập san thiết kế cầu đường" của Trung Quốc

Độ gồ ghề mặt đất loại IV xem xét theo "Xây dựng công trình dân dụng" của Trung Quốc

4.3.3.4. Tính tốc độ gió chuẩn thiết kế khi có đủ số liệu điều tra

Trường hợp tại địa phương xây dựng cầu có đầy đủ tài liệu về tốc độ gió, tốc độ gió chuẩn thiết kế tính theo công thức:

$$U_d = \bar{U}_{10} \cdot \left(\frac{Z}{10} \right)^{\alpha} \quad (4.4)$$

trong đó: $\bar{U}_{10}$ - tốc độ gió ở độ cao 10m tại vị trí cầu, (m/s)

4.3.3.5. Tính tốc độ gió chuẩn thiết kế khi không có đủ số liệu điều tra

Trường hợp tại địa phương xây dựng cầu không có đầy đủ số liệu quan trắc khí tượng thì có thể tận dụng tính chất tương quan số liệu quan trắc tốc độ gió của Trạm khí tượng gần kề với vị trí cầu, suy ra $\bar{U}_{10}$, sau đó áp dụng công thức 4.4 tính U_d .

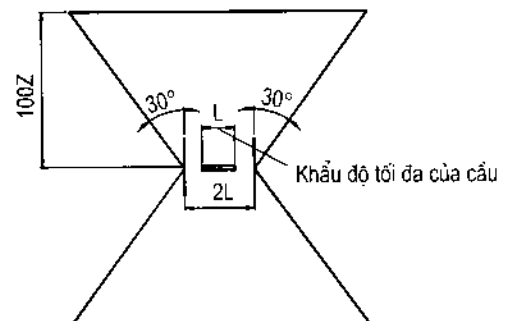
4.3.3.6. Phân loại độ gồ ghề mặt đất tại vị trí cầu

Phân loại độ gồ ghề mặt đất tại vị trí cầu được xác định theo phạm vi ở sơ đồ hình 4.3.

(1) Trường hợp phạm vi xét có hai loại độ gồ ghề chênh lệch nhau tương đối lớn thì lấy trị số trung bình của chúng theo tỷ lệ diện tích.

(2) Trường hợp phạm vi xét tồn tại hai loại độ gồ ghề gần nhau thì lấy trị số của loại nhỏ hơn.

(3) Trường hợp độ gồ ghề ở hai phía thượng, hạ lưu khác nhau thì lấy trị số bên phía tương đối nhỏ hơn.



Hình 4.3. Phạm vi xác định độ gồ ghề bề mặt vị trí cầu

(4) Trường hợp cầu vượt qua sông tương đối nhỏ (dưới 100m) thì lấy trị số thấp hơn một mức của độ gồ ghề đã xác định và theo mặt đất không gồm chiều rộng sông.

(5) Khi cầu vượt qua eo biển hoặc khe núi tương đối hẹp có khả năng xuất hiện hiện tượng hút gió hoặc khi địa hình tương đối phức tạp thì có thể thông qua thí nghiệm hầm gió của địa hình mô phỏng, quan trắc tốc độ gió tại thực địa hoặc đối chiếu với các tài liệu tốc độ gió có liên quan để xác định tốc độ gió tiêu chuẩn thiết kế.

4.3.4. Đặc tính giật của tốc độ gió

Cường độ gió I_u trong bảng 4.4., kích thước dòng L_x^u, L_y^u trong bảng 4.5, hàm mật độ phổ công suất trong công thức 4.7a, b, độ gồ ghề mặt đất trong bảng 4.6, hàm tương quan không gian trong công thức 4.8 v.v... đều là tài liệu tham khảo mô phỏng trường gió khi tiến hành thí nghiệm Hầm gió. Nhưng vì kích thước dòng giữa đo thực tế và thí nghiệm phân tán tương đối lớn, mô phỏng hàm mật độ phổ công suất nếu yêu cầu thoả mãn trên tất cả phạm vi tần số là tương đối khó, vì thế trong thực tế chỉ cần thoả mãn trong phạm vi tần số của mô hình kết cấu là được.

Vì ở Việt Nam thiếu tài liệu quan trắc thực tế gió động nên các số liệu trong bảng được lấy ở tài liệu tham khảo Trung Quốc [3].

4.3.4.1. Quy định thông thường

Thành phần động của tốc độ gió luôn biến đổi có thể miêu tả bằng các đặc tính như cường độ dòng rối to hay nhỏ, hàm mật độ phổ công suất của dòng rối, kích thước dòng rối và tương quan không gian của dòng rối. Dòng rối đối với sự dao động tròng trành (*Flutter*), dao động rung lắc (*Buffeting*), v.v... của dao động riêng, cũng như biên độ dao động hữu hạn của dao động rung lắc, dao động cộng hưởng xoắn của cầu đều có những ảnh hưởng tương đối lớn.

4.3.4.2. Cường độ dòng rối

(1) Gọi $\bar{U}$ là tốc độ gió bình quân của tốc độ gió U theo phương nằm ngang dòng chủ (x) của gió; các tốc độ trung bình của tốc độ gió V theo phương nằm ngang (y) vuông góc với phương nằm ngang dòng chủ và tốc độ gió bình quân của tốc độ gió W theo trục thẳng đứng (z) đều được giả định bằng 0, tức là: $\bar{V} = \bar{W} = 0$. Gọi u, v, w là thành phần động (phân lượng giật) của U, V, W , gọi $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$ là phương sai căn bậc hai của U, V, W thì cường độ dòng của U, V, W được định nghĩa như sau:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (4.5a)$$

$$I_v = \frac{\sigma_v}{V} \quad (4.5b)$$

$$I_w = \frac{\sigma_w}{W} \quad (4.5c)$$

(2) Cường độ dòng rối thay đổi theo chiều cao và độ gồ ghề mặt đất. Khi thiếu các số liệu quan trắc dòng gió tại vị trí cầu thì trị số trung bình của cường độ dòng rối I_u có thể lấy trị số theo bảng 4.4 và có thể lấy $I_v = 0,88.I_u$; $I_w = 0,5.I_u$.

(3) Tính chất tách cường độ dòng rối tương đối lớn, phạm vi phân tán đại thể là $\pm 30\%$ trị số bình quân, trong thiết kế chống gió cho cầu cần lấy số liệu quan trắc gió mạnh để xác định cường độ dòng rối, lúc đó cường độ dòng lấy bằng 0,7 lần trị số bình quân.

Bảng 4.4: Cường độ dòng rối I_u

Phân loại độ gồ ghề mặt đất Cao độ (m)	I	II	III	IV
$10 < Z \leq 20$	0,14	0,17	0,25	0,29
$20 < Z \leq 30$	0,13	0,16	0,23	0,29
$30 < Z \leq 40$	0,12	0,15	0,21	0,28
$40 < Z \leq 50$	0,12	0,15	0,20	0,26
$50 < Z \leq 70$	0,11	0,14	0,18	0,24
$70 < Z \leq 100$	0,11	0,13	0,17	0,22
$100 < Z \leq 150$	0,10	0,12	0,16	0,19
$150 < Z \leq 200$	0,10	0,12	0,15	0,18

4.3.4.3. Kích thước dòng rối

(1) Định nghĩa

Kích thước dòng rối của tốc độ gió giật i ($i = u, v, w$) theo phương j ($j = x, y, z$) được định nghĩa như sau:

$$L_j^i = \int_0^\infty R_i(r_j) dr_j \quad (4.6)$$

trong đó:

$R_i(r_j)$ - hệ số tương quan không gian của tốc độ gió động i tại điểm j và $j + r_j$

L_j^i - kích thước tích phân dòng rối, là kích thước trung bình xoáy của dòng rối trong luồng khí.

(2) Khi mô phỏng kích thước dòng rối trong thí nghiệm Hầm gió, có thể tham khảo trị số ước tính từ bảng 4.5.

Bảng 4.5: Trị số kích thước chuẩn dòng rối

Cao độ (m) \ Kích thước dòng rối (m)	L_x^u	L_y^u
$z \leq 10$	50	20
$10 < z \leq 20$	70	30
$20 < z \leq 30$	90	40
$30 < z \leq 40$	100	50
$40 < z \leq 50$	110	50
$50 < z \leq 70$	120	60
$70 < z \leq 100$	140	70
$100 < z \leq 150$	160	80
$150 < z \leq 200$	180	90

4.3.4.4. Hàm mật độ phổ công suất của dòng rối

(1) Hàm mật độ phổ công suất của tốc độ gió động là lượng đóng góp các tần số trong dòng rối nhiều hay ít. Hàm mật độ phổ công suất theo chiều nằm ngang và thẳng đứng tại cao độ z , tốc độ gió bình quân $U(z)$, có thể áp dụng riêng biệt các công thức sau:

$$\frac{n.S_u(n)}{U_n^2} = \frac{200f}{(1 + 50f)^{5/3}} \quad (4.7a)$$

$$\frac{n.S_w(n)}{U_n^2} = \frac{6f}{(1 + 4f)^2} \quad (4.7b)$$

trong đó:

$S_u(n)$, $S_w(n)$ - lần lượt là hàm mật độ phổ công suất của gió giật theo phương gió xuôi nằm ngang và thẳng đứng

n - tần số gió (Hz)

$$f = \frac{n.Z}{U_{(z)}} \quad (4.7c)$$

U_n - tốc độ ma sát dòng khí (cũng gọi là tốc độ cắt)

$$U_n = \frac{K.U_{(z)}}{\ln \frac{Z - Z_d}{Z_0}} \quad (4.7d)$$

trong đó:

K - hằng số không thứ nguyên $K = 0,4$

$$Z_d = \bar{H} - Z_0/K \quad (4.7c)$$

$\bar{H}$ - chiều cao trung bình các vật kiến trúc xung quanh (m).

Z_0 - chiều cao độ gồ ghề mặt đất (m) xem bảng 4.6

(2) *Định nghĩa về độ gồ ghề mặt đất tại cao độ Z_0*

Độ cao cách mặt đất nơi tốc độ gió bình quân $U(Z_0) = 0$ được tìm ra từ tốc độ gió bình quân tại cao độ Z_g , theo trị số α phân loại độ gồ ghề mặt đất của khu vực này. Khi tốc độ gió bình quân ở cao độ Z_g trên không của lớp biên giới khí quyển gần như không bị ảnh hưởng bởi mức độ gồ ghề mặt đất. Trị số Z_g của các khu vực gồ ghề mặt đất có thể lấy theo bảng sau:

Bảng 4.6

Phân loại độ gồ ghề mặt đất	I	II	III	IV
$Z_g(m)$	500	600	700	700
$Z_0(m)$	0,01	0,05	0,3	1,0

4.3.4.5. Quan hệ không gian của tốc độ gió giật

Hàm tương quan không gian $Coh_{ij}(f)$ của tần số f của thành phần tốc độ gió giật i ($i = u, v, w$) tại hai điểm có cự ly r_i theo phương j ($j = x, y, z$) có thể biểu diễn gần đúng theo công thức sau:

$$Coh_{ij}(f) = \exp\left(-\lambda_{ij} \cdot \frac{fr_j}{U_z}\right) \quad (4.8)$$

trong đó: λ_{ij} - hệ số suy giảm không thứ nguyên, nằm trong phạm vi từ $7 \div 20$, trong thiết

kế chống gió thông thường lấy $\lambda_{ij} = 7$ thiên về an toàn.

4.3.4.6. Góc tác dụng của gió (góc thổi của gió)

(1) Trong thiết kế chống gió động lực cho cầu, phải xét tới ảnh hưởng của góc tác dụng của gió và lấy góc tác dụng trung bình của gió tốc độ cao tức thời làm tiêu chuẩn, thường lấy là $\pm 3^\circ$.

(2) Góc tác dụng của gió trên mặt biển phẳng lặng và khu vực bằng phẳng rộng lớn thường là 0° , còn ở nơi địa hình phức tạp thì được xác định theo thí nghiệm hầm gió với địa hình mô phỏng.

4.4. TẢI TRỌNG GIÓ

4.4.1. Quy định chung

4.4.1.1. Khi kiểm toán về thiết kế các kết cấu phần trên, kết cấu phần dưới của cầu, cần phải xét đến tác dụng của tải trọng gió thiết kế.

4.4.1.2. Đối với cầu kết cấu cứng thông thường, nói chung có thể sử dụng tải trọng gió trên cơ sở tốc độ gió trận để làm tải trọng gió thiết kế.

4.4.1.3. Tải trọng gió thiết kế đối với dầm chủ và tháp cầu mềm khẩu độ lớn được tổ hợp từ hai bộ phận là tải trọng gió lực tĩnh và tải trọng gió lực động:

- Tải trọng gió lực tĩnh chỉ là tải trọng gió của tốc độ gió tiêu chuẩn thiết kế;
- Tải trọng gió động là các lực quán tính kết cấu sinh ra từ dao động gió gây ra.

Cần tính toán riêng biệt nội lực của hai bộ phận này, sau đó cộng tác dụng. Kết quả tính toán phải được đem so sánh với trị số nội lực do tải trọng gió trận gây ra và lấy trị số lớn hơn làm nội lực kiểm toán thiết kế tham gia vào tổ hợp tải trọng.

4.4.2. Tải trọng gió trận

4.4.2.1. Tải trọng gió trận

Khi tính tải trọng gió trận, cần lấy tốc độ gió trận ở khoảng cách thời gian tương đối ngắn, tải trọng gió trận do áp lực gió trận gây ra trên một đơn vị chiều dài được tính theo công thức:

$$P_g = q_g \cdot C_D \cdot A_n \quad (4.9)$$

trong đó:

P_g - tải trọng gió trận (N)

q_g - áp lực động của không khí dưới tốc độ gió trận U_g

$$q_g = \frac{1}{2} \rho U_g^2 = 0,613 U_g^2 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

ρ - mật độ của không khí (kg/m^3), thường lấy $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

C_D - hệ số lực cản của các cấu kiện cầu

A_n - diện tích hình chiếu đơn vị chiều dài của các cấu kiện cầu theo chiều gió thuận (m^2)

4.4.2.2. Tốc độ gió trận

Tốc độ gió trận thường chỉ tốc độ gió trong khoảng thời gian 1 ÷ 3(s). Trong trường hợp thiếu các tài liệu về tốc độ gió trận thì trên cơ sở tốc độ gió chuẩn thiết kế (xem mục 4.3.3.3), có xét tới hệ số tốc độ gió trận do tốc độ gió bình quân tăng lên vì rút ngắn thời gian, mà áp dụng công thức:

$$U_g = G_v \cdot U_d \quad (4.10a)$$

hoặc gián tiếp tính áp lực động gió trận qua hệ số áp lực gió trận:

$$q_g = \frac{1}{2} \rho U_d^2 G_q \quad (4.10b)$$

trong đó:

G_v - hệ số tốc độ gió trận; đối với độ gồ ghề mặt đất loại I, II lấy bằng 1,38; loại III, IV lấy bằng 1,70

G_q - hệ số áp lực gió trận, $G_q = G_v^2$

Hệ số tốc độ gió trận nêu trong bản Hướng dẫn này, được tính theo phương pháp sau đây:

Nếu bỏ qua thành phần động đứng và ngang của gió thì tốc độ gió tức thời gọi là tốc độ gió trận được tính bằng:

$$U_g(z) = \bar{U}(z) + u(z, t) \quad (4.11a)$$

trong đó:

$\bar{U}(z)$ - tốc độ gió bình quân ở cao độ z

$u(z, t)$ - thành phần động ngang theo chiều gió

t - thời gian

Theo phương pháp Davenport [19], có:

$$U_g(z) = \bar{U}(z) + g_v(z) \sigma_u(z) = G_v(z) \bar{U}(z) \quad (4.11b)$$

$$G_v(z) = 1 + \frac{g_v(z) \sigma_u(z)}{\bar{U}(z)} \quad (4.11c)$$

$$g_v = \sqrt{2 \ln[v_u(z)T]} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln[v_u(z)T]}} \approx \sqrt{1,175 + 2 \ln[v_u(z)T]} \quad (4.11d)$$

$$v_u(x) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{v_u(x)}{\sigma_u(z)} \quad (4.11e)$$

$$\sigma_u^2 = \int_0^\infty S_u(z, n) dn \quad (4.11f)$$

$$\sigma_u^2 = \int_0^\infty (2\pi n)^2 S_u(z, n) dn \quad (4.11g)$$

trong đó: $v_u(z)$ có thể coi là tần số trung bình của phổ tần tốc độ, là số lần trung bình của độ lệch dương thông qua $\bar{U}(z)$ trong một đơn vị thời gian. $S_u(z, n)$ là hàm mật độ phổ công suất của thành phần ngang gió động.

Do trị số lớn nhất của kỳ hạn dự kiến của $U_g(z)$ là kết quả của hàng loạt quan trắc, thời gian hữu hạn của quan trắc T , và thời gian hữu hạn phản ứng của thiết bị ghi τ đã hạn chế phổ $S_u(z, n)$ thực tế, biến thành lỗ hổng của phổ, tần số thấp bị T cắt ngắn, tần số cao dựa vào τ , thời gian T của gió bình quân là 10 giây. Tốc độ gió tức thời tối đa trong thời gian hữu hạn có thể tính theo công thức:

$$U_g(z, \tau) = \bar{U}(z) + g_v(z, \tau) \sigma_u(z, \tau) = G_v(z, \tau) \bar{U}(z) \quad (4.11h)$$

$$G_v(z, \tau) = 1 + \frac{g_v(z, \tau) \sigma_u(z, \tau)}{\bar{U}(z)} \quad (4.11i)$$

trong đó: $g_v(z, \tau)$, $v_v(z, \tau)$, $\sigma_u(z, \tau)$, $\sigma_v^2(z, \tau)$ tính theo các công thức (4.11d, e, f, g),

Hàm mật độ phổ công suất trong thành phần ngang của gió động $S_u(z, n)$ trong các công thức trên được thay bằng công thức:

$$S_u(z, n, \tau) = S_u(z, n) \chi(n, \tau) \quad (4.11k)$$

$$\chi(n, \tau) = \frac{\sin^2(\pi n \tau)}{(\pi n \tau)^2} \quad \chi = 1 \text{ với } \pi n \tau = 0 \quad (4.11l)$$

Dùng phổ Karmal để tính khi ở độ cao 10 m, tốc độ gió 30 và 50 m/s (đều tính đối địa hình loại II, $T = 10$ giây) và khoảng cách thời gian τ là 1 giây thì qua hệ số gió trận với các chiều cao cầu khác nhau, loại mặt đất khác nhau (bảng 4.7, 4.8) ta thấy rằng tốc độ gió và chiều cao cầu ít ảnh hưởng đến hệ số gió trận còn ảnh hưởng của địa hình là tương đối lớn. Căn cứ vào kết quả này, bản Hướng dẫn đề nghị đối với mặt đất loại I và loại II thì hệ số gió trận lấy gần đúng là 1,38, còn mặt đất loại III và loại IV hệ số gió trận lấy là 1,7.

Bảng 4.7: Kết quả tính toán hệ số gió trận ($\bar{U}_{10} = 30$ m/s)

Cao độ cầu	$z = 40$ (m)	$z = 60$ (m)
Mặt đất loại I	1,34	1,33
Mặt đất loại II	1,43	1,40
Mặt đất loại III	1,65	1,60
Mặt đất loại IV	1,77	1,69

Bảng 4.8: Kết quả tính toán hệ số gió trận ($\bar{U}_{10} = 50$ m/s)

Cao độ cầu	$z = 40$ (m)	$z = 60$ (m)
Mặt đất loại I	1,34	1,33
Mặt đất loại II	1,42	1,40
Mặt đất loại III	1,64	1,59
Mặt đất loại IV	1,76	1,69

4.4.3. Tải trọng gió lực tĩnh

4.4.3.1. Cao độ tiêu chuẩn

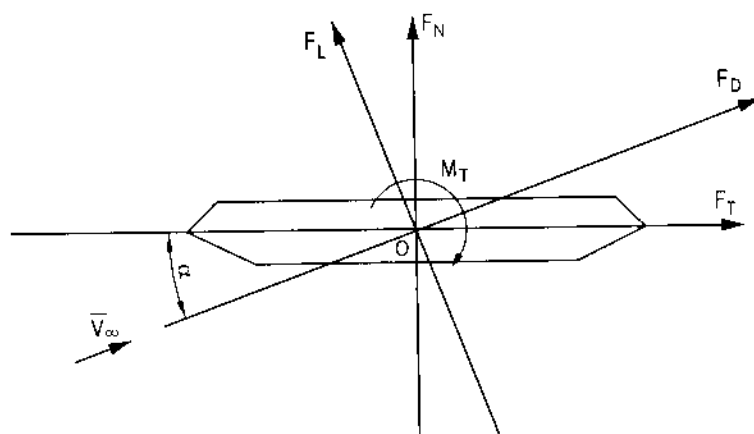
Căn cứ vào bảng 4.9 để tính cao độ tiêu chuẩn của các cấu kiện cầu, rồi tính tốc độ gió theo cao độ này.

Bảng 4.9: Quy định cao độ tiêu chuẩn các cấu kiện

Loại hình cầu		Cầu treo, cầu dây văng	Các loại cầu khác
Độ cao tiêu chuẩn (m)			
Z	Dầm chủ	Cao độ bình quân mực nước hàng năm thiết kế (hoặc bề mặt đất hoặc trên mặt biển) cách nhịp chủ mặt cầu	Lấy trị số lớn hơn trong 2 trị số sau: (1) Chiều cao bình quân gối tựa + (Chiều cao tối đa kết cấu – Chiều cao bình quân gối tựa) $\times 0.8$; (2) Cao độ thiết kế cầu
	Thanh treo, cáp treo	Cao độ bình quân của đỉnh tháp đến mặt cầu dầm chủ giữa nhịp	
	Tháp (trụ) cầu	Ở cao độ 65% chiều cao tháp (trụ)	

4.4.3.2. Tải trọng gió lực tĩnh trên dầm chủ

(1) Tải trọng gió lực tĩnh tác dụng lên một đơn vị chiều dài dầm chủ cần tính từng tải trọng theo 3 phương của hệ trục tọa độ không gian của vật thể như hình 4.4.



Hình 4.4: Trục gió và hệ tọa độ thân trục cùng với hướng lực khí động của chúng

Tải trọng gió theo phương ngang:
$$P_T = \frac{1}{2} \rho U_d^2 C_T D \quad (4.12a)$$

Tải trọng gió theo phương thẳng đứng:
$$P_N = \frac{1}{2} \rho U_d^2 C_N B \quad (4.12b)$$

Mô men xoắn:

$$M = \frac{1}{2} \rho U_d^2 C_M B^2 \quad (4.12c)$$

trong đó:

C_T, C_N, C_M - hệ số cản, nâng, mô men xoắn theo các phương của dầm chủ.

D, B - chiều cao hình chiếu cạnh và chiều rộng dầm chủ (m).

(2) Gió mạnh trong tầng khí quyển chủ yếu là theo phương nằm ngang, nhưng cũng có thể có thay đổi nhỏ trong phạm vi góc tác dụng $+3^\circ$ đến -3° . Các hệ số C_T, C_N, C_M trong các công thức (4.12) thay đổi theo góc tác dụng, nói chung nên thiên về an toàn lấy trị số tối đa trong phạm vi $+3^\circ$ đến -3° .

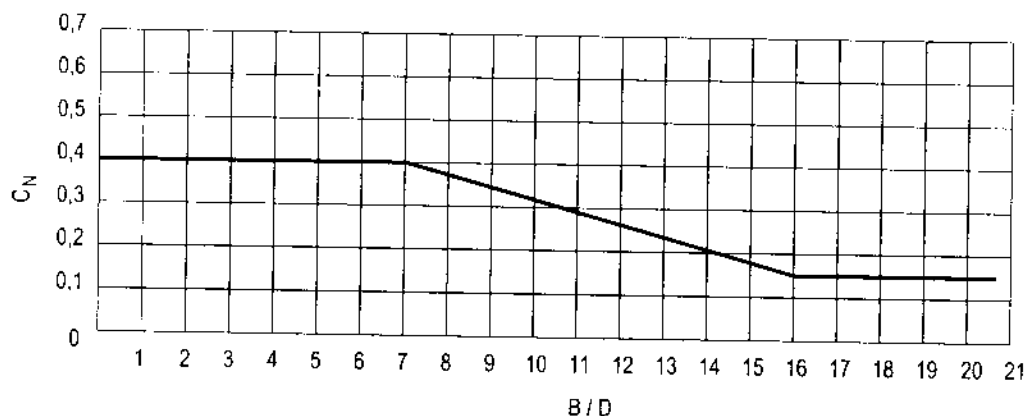
(3) Đối với các dầm chủ có mặt cắt tù như hình chữ I, chữ Π hoặc hình hộp, hệ số lực cản nằm ngang C_T có thể tính theo công thức sau:

$$C_T = 2,1 - 0,1 \left(\frac{B}{D} \right) \quad 1 \leq \left(\frac{B}{D} \right) < 8$$

$$C_T = 1,3 \quad \left(\frac{B}{D} \right) \geq 8 \quad (4.13)$$

4.3.2.4. Chiều cao hình chiếu D của cầu phải tính vào chiều cao thực của lan can hoặc hệ lan can chống va đập và các vật thể khác phụ thuộc vào cầu.

4.3.2.5. Khi góc tác dụng nhỏ hơn 10° thì hệ số lực nâng thẳng đứng C_N của dầm chủ có thể lấy ở hình 4.5, khi góc tác dụng $1^\circ \sim 5^\circ$ thì C_N lấy bằng 0,75 lần trong hình 4.5.



Hình 4.5. Hệ số khí động lực thẳng đứng C_N của dầm chủ

4.3.2.6. Hệ số C_T, C_N, C_M của những cầu quan trọng và của mặt cắt dầm chủ có hình dạng phức tạp cần phải được xác định qua thí nghiệm Hầm gió.

4.4.3.3. Tải trọng gió tĩnh tác dụng lên trụ cầu, tháp cầu, thanh treo và trên cáp chủ

(1) Tải trọng gió tác dụng lên trụ cầu, tháp cầu, thanh treo và trên cáp chủ tính theo công thức:

$$P_D = q C_D A_n \quad (4.14)$$

trong đó:

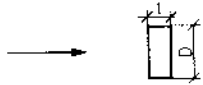
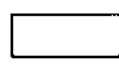
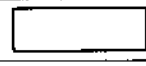
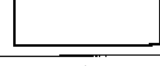
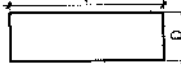
q - áp lực động (Pa), $q = \frac{1}{2} \rho U_d^2$

C_D - hệ số lực cản

A_n - diện tích hình chiếu trên đơn vị chiều dài (m^2/m)

(2) Hệ số cản C_D của trụ cầu có thể chọn dùng theo bảng 4.10

Bảng 4.10: Hệ số lực cản trụ cầu

Hình dạng mặt cắt	$\frac{t}{b}$	Trị số C_D trụ cầu với tỷ lệ cao rộng khác nhau						
		1	2	4	6	10	20	40
	$\leq \frac{1}{4}$	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,9	2,1
	$\frac{1}{3} \div \frac{1}{2}$	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2
	$\frac{2}{3}$	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2
	1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0
	$1 \frac{1}{2}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7
	2	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
	3	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,2
	≥ 4	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	1,1
 Hình 4 cạnh hoặc hình 8 cạnh 		1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,4
 Hình 12 cạnh		0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,3
 Hình tròn có bề mặt bóng tròn $tV_c \geq 6m^2/s$		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
 Hình tròn có bề mặt bóng tròn $tV_c < 6m^2/s$ hình tròn có bề mặt nhám hoặc bề mặt lỗ		0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2

(3) Mặt cắt ngang trụ tháp cầu thường là hình chữ nhật, hệ số cản của chúng lấy khoảng $2,0 \div 2,7$. Khi có góc vuốt tròn có thể lấy $1,8 \div 2,2$, khi cự ly giữa tâm hai trụ tháp liền kề nhỏ hơn 4 lần chiều dài cạnh mặt hứng gió thì tổng tải trọng gió có thể lấy bằng 1,5 trị số của tải trọng gió tác dụng lên một trụ. Đối với cầu đặc biệt quan trọng hoặc trụ có mặt cắt tương đối phức tạp thì hệ số cản được xác định qua thí nghiệm hầm gió.

(4) Trường hợp cự ly giữa tâm hai cáp lớn gấp 4 lần đường kính trở lên thì cần xét riêng tải trọng gió của từng sợi dây cáp, hệ số cản của chúng là 0,7. Trường hợp cự ly giữa tâm các cáp chủ lớn hơn chưa đến 4 lần đường kính thì không cần tính riêng từng sợi mà tính với một sợi theo hệ số cản là 1,0.

(5) Trường hợp cự ly giữa tâm các dầm treo lớn hơn 4 lần đường kính trở lên thì hệ số cản của mỗi thanh treo lấy bằng 0,7.

4.4.4. Tải trọng gió động lực

(1) Khi phân tích ảnh hưởng dao động vẩy cần phải xét tới các yếu tố như: tương quan không gian và đặc tính tần số của gió giật, cũng như đặc tính dao động vẩy của kết cấu v.v... Hiệu ứng dao động vẩy có thể tìm được qua phân tích dao động vẩy biến đổi hoặc bằng thí nghiệm Hầm gió. Phân tích dao động vẩy cần bao quát các loại dao động chủ yếu do phản xung dòng rối gây nên.

(2) Trị số cực trị của lực quán tính dao động vẩy của loại dao động bậc thứ i là:

$$F_{di}(x) = m(x)\omega_i^2 g\sigma_i(x) \quad (4.15)$$

trong đó:

F_{di} - lực quán tính dao động vẩy theo phương nằm ngang, phương thẳng đứng và lực quán tính dao động vẩy xoắn vặn T_d, N_d, M_d của loại dao động bậc thứ i (tính theo N hoặc $N.m$)

$m(x)$ - khối lượng dầm chủ trên đơn vị chiều dài hoặc mô men quán tính khối lượng (đối với M_d) (kg/m hoặc $kg.m^2/m$)

g - hệ số cực trị, thường lấy bằng 4 (thiên về an toàn)

ω_i - tần số góc loại dao động bậc thứ i

$\sigma_i(x)$ - phương sai căn bậc hai hiệu ứng chuyển vị của dao động vẩy loại dao động bậc thứ i , phương pháp tính xem mục 4.7.1.2

x - toạ độ trục cầu

(3) Nội lực dao động vẩy của các mặt cắt do tải trọng gió động lực gây ra là:

$$F = \sqrt{(F_1^2 + F_2^2 + \dots + F_n^2)} \quad (4.16)$$

trong đó:

F - tổng nội lực dao động vẩy, biểu thị bằng lực dọc trục, lực cắt hoặc mô men uốn, mô men xoắn (đơn vị N hoặc N.m)

F_i - nội lực của loại dao động bậc i

4.4.5. Kiểm tra ổn định tĩnh

4.4.5.1. Uốn ngang của cầu treo

(1) Tải trọng giới hạn uốn ngang do áp lực gió tác dụng lên dầm chủ cầu treo gây nên, chỉ tác dụng lên dầm tăng cường. Đối với cầu treo một nhịp thì tốc độ gió tới hạn uốn dạng phản đối xứng bậc 1 có thể tính theo công thức sau;

$$U_{fb} = K_{fb} f_t B \quad (4.17a)$$

trong đó:

$$K_{fb} = \sqrt{\frac{\pi^3 \left(\frac{B}{H}\right) \mu \left(\frac{r}{b}\right)}{C_D \varepsilon \sqrt{K} \sqrt{\left(K + 1 + \frac{C'_L B_C}{C_D H}\right)}}} \quad (4.17b)$$

$$K = \frac{1}{4} \left(\frac{4\pi^2}{3} + 1 \right) = 3,54$$

trong đó:

C_D - hệ số cản dầm gia cường, tìm được qua thí nghiệm Hầm gió

C'_L - độ lệch hệ số lực nâng dầm gia cường tìm được qua thí nghiệm Hầm gió

ε - tỷ số tần số xoắn vẩy $\varepsilon = \frac{f_t}{f_b}$

B_C - khoảng cách giữa các cáp chủ (m)

(2) Công thức kiểm toán thiết kế độ uốn ngang

$$U_{fb} < U_g \quad (4.18)$$

4.4.5.2. Uốn ngang của cầu dây văng

Đối với cầu dây văng khẩu độ tương đối lớn, cần phải kiểm toán ổn định lực tĩnh dưới tác dụng tải trọng gió ngang.

4.4.5.3. Sự phát tán xoắn lực tĩnh của cầu treo dây võng

(1) Tốc độ gió tới hạn phát tán xoắn

Tốc độ tới hạn phát tán xoắn của cầu treo dây võng, có thể tính theo công thức:

$$U_{td} = \sqrt{\frac{2K_{\alpha}}{\rho B^2 C'_{M0}}} \quad (4.19a)$$

trong đó:

U_{td} - tốc độ gió tới hạn phát tán xoắn (m/s)

K_{α} - độ cứng chống xoắn tổng thể của kết cấu (N.m²)

C'_{M0} - độ lệch hệ số mô men xoắn C_M khi góc tác dụng $\alpha = 0^\circ$, tìm được qua thí nghiệm Hầm gió.

Cũng có thể tính tốc độ gió tới hạn phát tán xoắn theo công thức:

$$U_{td} = K_{td} f_l B \quad (4.19b)$$

trong đó:

$$K_{td} = \sqrt{\left(\frac{\pi^3}{2} \mu \left(\frac{r}{b} \right)^2 \frac{1}{C'_{M0}} \right)}$$

$$\mu = \frac{M}{\pi \rho b^2} \quad b = B/2$$

$$\frac{r}{b} = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{I_m}{m}}$$

với: m - khối lượng trên một đơn vị chiều dài cầu (kg/m)

I_m - mô men quán tính khối lượng trên một đơn vị chiều dài của cầu (kg.m²/m)

f_l - thường lấy là tần số xoắn đối xứng bậc 1 (Hz)

(2) Công thức tính toán thiết kế phát tán xoắn lực tĩnh

$$U_{td} > U_g \quad (4.20)$$

4.4.6. Phương pháp đặt tải trọng gió và tổ hợp tải trọng

4.4.6.1. Trạng thái cầu đã hoàn thành

(1) Tải trọng gió lực tĩnh của dầm chủ tác dụng vào vị trí tim dầm chủ.

(2) Đối với dây cáp dầm treo chỉ xét tải trọng gió lực tĩnh của phương ngang cầu và được phân bố đều trên đường trục của cầu kiện.

(3) Tải trọng gió tĩnh đối với tháp cầu, trụ cầu lấy theo trị số tải trọng tác dụng lên đường trục, tại chỗ 65% chiều cao của tháp hoặc trụ cầu.

4.4.6.2. Giai đoạn thi công

Đối với cầu thi công theo công nghệ hẫng, ngoài việc phải đặt tải đối xứng, còn phải xét tới trường hợp đặt tải không đối xứng. Hệ số áp lực gió không đối xứng thường lấy là 0,5.

4.4.6.3. Xét tổ hợp tải trọng

Tổ hợp của tải trọng gió tham gia vào tải trọng dài hạn và các tải trọng ngắn hạn khác, xem trong Tiêu chuẩn 22TCN 272-05.

4.5. ĐẶC TÍNH ĐỘNG LỰC CỦA CÁC KẾT CẤU CẦU

4.5.1. Quy định thông thường

Do tác dụng ngẫu hợp rất mạnh của uốn ngang và xoắn trong dao động sẵn có của cầu khẩu độ lớn, nhất là đối với cầu dây văng làm cho việc phán đoán loại hình dao động, mà xoắn là chủ yếu, trở nên khó khăn, có khi đưa ra kết luận sai lầm. Qua việc tính toán khối lượng và mômen quán tính khối lượng ứng với các thức (mode) dao động, có thể xác định được tỷ lệ phân phối năng lượng dao động, nhờ đó phán đoán chính xác tính chất dao động, làm cơ sở để phân tích dao động gió.

4.5.1.1. Việc phân tích đặc tính động lực học kết cấu có chính xác hay không phụ thuộc vào mô hình động lực học của chúng, bao gồm các điều kiện cơ bản có thể hiện chính xác sự làm việc của kết cấu hay không, cũng như đảm bảo sự đồng đều về độ cứng và chất lượng của kết cấu và sự phân bố không gian của chúng trong quá trình trừu tượng hoá và đơn giản hoá các kết cấu một cách hợp lý.

4.5.1.2. Khi phân tích đặc tính động lực học kết cấu, nói chung có thể sử dụng chương trình phân tích động lực học theo mô hình các phần tử hữu hạn không gian tuyến tính. Trụ tháp cầu và dầm chủ có thể phân chia thành ba phần tử, các dây xiên hoặc cáp treo có thể coi như một phần tử nhưng phải xét đến độ cứng hình học của cáp chịu lực dọc trục không đổi ban đầu để tránh việc xuất hiện dao động cục bộ dây mềm không bình thường trong khi tính toán.

4.5.1.3. Điều quan trọng nhất đối với việc thiết kế chống gió cho cầu là 6 mô hình trạng thái: uốn đứng, uốn ngang, xoắn đối xứng và phản đối xứng bậc thấp nhất của dầm chủ. Đối với cầu dây văng, uốn ngang và xoắn của dầm chủ thường trùng hợp; cần tránh sự ngộ nhận loại dao động uốn ngang là chính có một ít xoắn, thành loại dao động xoắn. Khi khó phán đoán được loại dao động, đề nghị tính riêng khối lượng theo nghĩa rộng và mô men quán tính khối lượng của 6 trạng thái vận động của từng bậc dao động. Qua so sánh, có thể nhận định được chính xác hơn tính chất dao động.

4.5.1.4. Tần số dao động riêng chủ yếu, tìm được qua phân tích đặc tính động lực học, cần đem so sánh với kết quả tính toán và đo đạc thực tế của một cầu có khẩu độ tương tự đã xây dựng xong để đảm bảo độ tin cậy của kết quả phân tích.

4.5.2. Lựa chọn mô hình động lực học dầm chủ

Việc chọn mô hình phân tích động lực học cầu dầm có ảnh hưởng rất lớn đến kết quả tính toán đặc tính động lực kết cấu cầu. Đối với mặt cầu có dầm hộp kín, có thể dùng mô hình kiểu dầm đơn kiểu xương sống, đối với mặt cắt hở và mặt cắt nửa hở có hộp bên lắp ghép thì có thể dùng mô hình 3 dầm dọc.

5.2.1. Mô hình dầm chủ kiểu xương cá

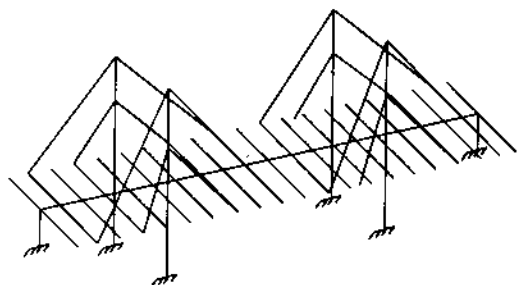
Mô hình dầm chủ thường dùng nhất là mô hình dầm đơn kiểu xương cá, đường trục của chúng đi qua tâm xoắn mặt cắt dầm chủ, toàn bộ độ cứng của dầm chủ (độ cứng dài EA, độ cứng chống uốn EJ_x , EJ_y của hai phương và độ cứng xoắn vặn tự do xoay theo đường trục EJ_d) cũng như khối lượng phân bố m và mômen quán tính khối lượng I_m đều tập trung trên đường trục.

Dầm chủ của cầu dầm văng loại hai mặt dầm lại thông qua hình thức nối liền của dầm ngang ngăn cứng với cáp dầm hình thành mô hình kiểu xương cá (hình 4.6).

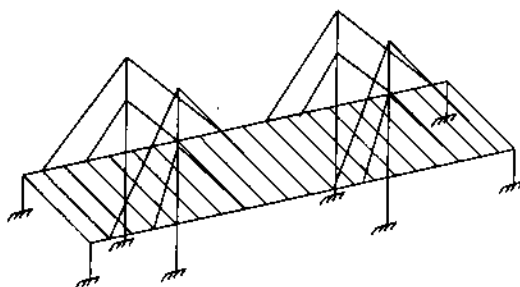
Loại mô hình này không thể xét ảnh hưởng của độ cứng xoắn vặn ràng buộc dầm chủ, vì vậy chỉ thích hợp với mặt cắt dầm hộp kín (một khoang hoặc nhiều khoang) có độ cứng xoắn vặn tự do tương đối lớn.

4.5.2.2. Mô hình dầm chủ kiểu dầm đôi

Đối với mặt cắt dầm chủ nửa hở, có dầm hộp bên lắp ghép, thì có thể dùng mô hình kiểu dầm đôi (hình 4.7). Nhưng khi xác định vị trí dầm chủ của mô hình, không thể bố trí một cách đơn giản trên mặt phẳng dầm mà phải chú ý thỏa mãn tính tương đương của mô men quán tính khối lượng và tính tương đương của độ cứng xoắn vặn ràng buộc do độ cứng chống uốn thẳng đứng của dầm biên cung cấp.



Hình 4.6: Mô hình tính toán kiểu xương cá

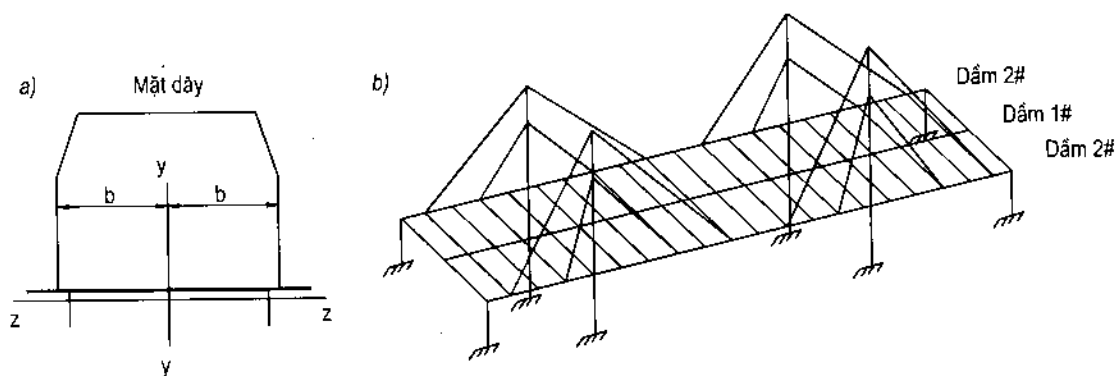


Hình 4.7: Mô hình tính toán kiểu dầm đôi

Nhược điểm của mô hình kiểu dầm đôi là khung giàn phẳng nối tiếp bằng dầm ngang cứng ở phương bên là một kết cấu kiểu cắt, rất khó xử lý về tính đối của độ cứng chống uốn ngang. Vì uốn ngang và xoắn vặn cầu dầm văng là tổ hợp ngẫu nhiên mãnh liệt, nên sự mất chính xác biến dạng ngang có thể làm mất đi sự chính xác của tần số xoắn cơ bản mà tần số này có tác dụng quan trọng.

5.2.3. Mô hình dầm chủ kiểu 3 dầm

Đối với mặt cắt dầm chủ nửa hờ có dầm hộp bên lắp ghép, nhất là các mặt cắt hờ có độ cứng tự do tương đối nhỏ như mặt cắt kiểu bản có dầm bên đặc và các mặt cắt dầm chủ hờ có dầm bên hình chữ I liên hợp với bản mặt cầu, thì để xét chính xác độ cứng chống xoắn ràng buộc nên dùng mô hình kiểu 3 dầm. Tức là dầm giữa (1#) ở trên đường tim cầu, và 2 dầm bên (2#) ở trên hai mặt phẳng dầm tạo thành mô hình dầm chủ kiểu giá, đồng thời phân phối hợp lý khối lượng và độ cứng để thoả mãn nguyên tắc đồng nhất (xem hình 4.8).



Hình 4.8. Mô hình tính toán kiểu 3 dầm

(1) Diện tích A của dầm chủ và độ cứng chống uốn ngang đều tập trung vào dầm giữa tức là:

$$\begin{aligned} A_2 &= J_{y2} = 0 \\ A_1 &= A, \quad J_{y1} = J_y \end{aligned} \quad (4.21a)$$

Việc tránh ảnh hưởng do biến dạng cắt mang tới, làm cho quan hệ tính đối của độ cứng phương bên vừa rõ ràng lại vừa hợp lý.

(2) Độ cứng chống uốn thẳng đứng của dầm chủ phân phối sao cho độ cứng thẳng đứng của dầm chủ bên đủ độ cứng chống xoắn ràng buộc cần thiết tức là:

$$\begin{aligned} J_{x1} + 2J_{x2} &= J_x \\ 2J_{x2} b^2 &= J_w \end{aligned} \quad (4.21b)$$

Đặt mặt cắt dầm chủ là xoắn vặn cứng (đường cố định mặt cắt không thay đổi).

(3) Độ cứng xoắn tự do của mặt cắt hở tương đối nhỏ, có thể phân phối một cách tự do cho 3 dầm, nhưng phải bảo đảm tính đối xứng hai bên trái, phải.

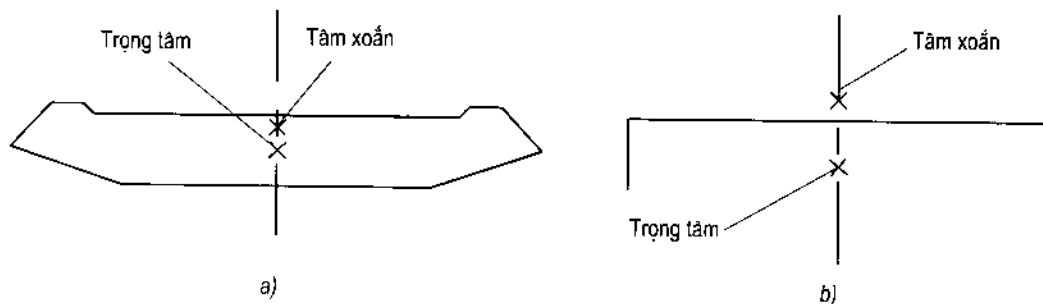
(4) Toàn bộ khối lượng và mô men quán tính khối lượng có thể tập trung vào dầm giữa, cũng có thể phân phối cho cả 3 dầm, khối lượng của các dầm chủ bên phải thoả mãn điều kiện về mô men quán tính:

$$\begin{aligned} M_1 + 2M_2 &= M \\ 2M_2 b^2 &= I_m \end{aligned} \quad (4.21c)$$

Thực tế, tính toán theo phương pháp (1).

4.5.2.4. Trọng tâm và tâm xoắn mặt cắt dầm chủ

Mặt cắt dầm chủ nói chung đều có trục đối xứng thẳng đứng, tức là 2 bên mặt cắt đối xứng nhau. Trọng tâm và tâm xoắn (hoặc gọi là tâm cắt hoặc tâm uốn) không nhất thiết trùng nhau. Khoảng cách giữa hai tâm này tương đối nhỏ trong trường hợp mặt cắt kín, còn ở mặt cắt hở lại tương đối lớn (xem hình 4.9).



Hình 4.9: Trọng tâm và tâm xoắn của mặt cắt dầm chủ

a) mặt cắt khép kín; b) mặt cắt hở

Về nguyên tắc trục tọa độ của mô hình lực học dầm chủ đi qua tâm xoắn của mặt cắt, lúc đó quán tính chuyển động của mặt cắt cũng hướng vào tâm xoắn. Vì dầm chủ cầu khẩu độ lớn có hình dạng tương đối dẹt, tỷ số giữa chiều rộng và chiều cao nói chung thường lớn hơn 7 nên trục tọa độ dầm chủ đặt ở trọng tâm cũng không có gì sai lệch rõ rệt.

Kết luận:

1- Độ cứng chống xoắn có xét liên kết ngang của dầm chủ đối với đặc tính động lực cố hữu và đặc tính động lực cố hữu uốn bên có thành phần xoắn vận của cầu dây văng có ảnh hưởng nhất định.

2- Cầu dây văng có mặt cắt hở dạng vách mỏng, do độ cứng chống xoắn vận tự do của chúng tương đối nhỏ, độ cứng chống vận xoắn có xét liên kết ngang của dầm chủ đối với tần suất xoắn có ảnh hưởng tương đối lớn, phải có sự cân nhắc, nếu không thì không cần xem xét.

4.5.3. Các công thức gần đúng của tần số cơ bản

Các công thức gần đúng của tần số cơ bản thường dùng khi kiểm tra chống gió ở giai đoạn thiết kế sơ bộ. Đối với dao động cầu dây văng có hình thức kết cấu chung ít khác nhau thì độ chính xác của công thức gần đúng tương đối cao. Còn đối với cầu dây văng, vì hình dạng cáp của cầu dây văng biến đổi nhiều, hệ thống dây lại bố trí theo các kiểu khác nhau, nên các tài liệu tham khảo của các nước đều chỉ căn cứ các số liệu thống kê đưa ra công thức kinh nghiệm sơ lược để tham khảo. Trong thực tiễn thiết kế thường phải phân tích động lực học trực tiếp bằng các chương trình phần tử hữu hạn (ví dụ SAP 2000, MIDAS) để tính toán các thức (mode) dao động và tần số dao động.

4.5.3.1. Để phán đoán nhanh tính năng chống gió của kết cấu, có thể dùng các công thức gần đúng dự đoán các tần số cơ bản (tần số uốn thẳng đứng bậc 1 và tần số xoắn bậc 1).

4.5.3.2. Tần số cơ bản của cầu treo dây văng

(1) Tần số uốn thẳng đứng bậc 1 của cầu treo dây văng, trong phạm vi tỷ số đường tên thường dùng, thường là phản đối xứng. Đối với cầu treo có dầm tăng cường nhịp giữa là dầm giản đơn, thì công thức gần đúng của tần số uốn thẳng đứng phản đối xứng bậc 1 là:

$$\omega_b^a = 2\pi f_b^a = \frac{2\pi}{L} \sqrt{\frac{EJ + H_g \left(\frac{L}{2\pi}\right)^2}{m}} \quad (4.22)$$

trong đó:

L - khẩu độ, (m)

EJ - độ cứng uốn đứng dầm gia cường, giả thiết là hằng số, (Nm²)

H_g - lực kéo nằm ngang dây chủ, tải trọng không đổi, (N)

m - tổng khối lượng trên một đơn vị chiều dài của mặt cầu và cáp chủ

$$m = m_d + 2m_c$$

m_d - khối lượng trên đơn vị chiều dài mặt cầu (kg/m)

m_c - khối lượng trên đơn vị chiều dài một sợi đơn cáp chủ (kg/m)

(2) Đối với cầu treo dây văng khẩu độ lớn trên 500 m, tỷ số độ cứng giữa dầm tăng cường và độ cứng trọng lực tương đối nhỏ, nếu bỏ qua độ cứng dầm tăng cường thì công thức (4.22) có thể đơn giản hơn:

$$f_b^a = \frac{\omega_b^a}{2\pi} = \frac{1,11}{\sqrt{f}} \quad (4.23)$$

trong đó: f - chiều cao đường tên cáp chủ

(3) Tần số uốn đối xứng thẳng đứng bậc 1 của cầu treo dây võng có thể tính theo công thức:

$$f_b^s = \frac{0,3}{L} \sqrt{\frac{E_c A_c}{W}} \quad (4.24)$$

trong đó:

E_c - mô đun đàn hồi cáp chủ (N/m^2)

A_c - diện tích mặt cắt một sợi cáp chủ (m^2)

W - trọng lượng một đơn vị dài của cầu (N/m)

(4) Đối với cầu treo dây võng có dầm tăng cường nhịp giữa là dầm giản đơn, công thức tính tần số xoắn phản đối xứng bậc 1 là:

$$f_t^s = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{EJ_\omega \left(\frac{2\pi}{L} \right)^2 + \left(GJ_d + \frac{H_g B_c^2}{2} \right)}{m_d r^2 + \frac{B_c^2}{2} m_c}} \quad (4.25)$$

trong đó:

EJ_ω, GJ_d - độ cứng chống xoắn ràng buộc và độ cứng chống xoắn tự do của dầm tăng cường ($N.m^4, N.m^2$); đối với dầm hộp kín có thể bỏ qua độ cứng chống xoắn ràng buộc.

r - bán kính quán tính dầm gia cường, (m)

B_c - cự ly giữa tim cáp chủ 2 bên, (m)

(5) Tần số xoắn đối xứng bậc 1 cầu treo dây võng có thể tính theo công thức:

$$f_t^s = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{GJ_d + 0,05256 E_c A_c B_c^2}{m_d r^2 + \frac{B_c^2}{2} m_c}} \quad (4.26)$$

(6) Gọi $\varepsilon = \frac{\omega_t}{\omega_b}$ là tỷ số giữa tần số xoắn bậc 1 và tần số uốn đứng bậc 1, thì trị số ε

biến đổi trong phạm vi dưới đây theo các mặt cắt dầm chủ:

(1) Dầm chủ có mặt cắt hở $\varepsilon = 1,3 \div 1,5$

(2) Dầm tăng cường dạng dàn của mặt cắt kín $\varepsilon = 1,5 \div 2,0$

(3) Dầm hộp kín $\varepsilon = 2,0 \div 3,0$

(tuỳ theo chiều cao dầm)

(7) Đối với cầu treo dây võng khẩu độ lớn có dầm chủ dạng dầm hộp chiều cao thấp thì uốn cong phương thẳng đứng và tần số xoắn vận có thể đều là đối xứng, cần phải tính toán theo trình tự phân tích động lực học để tìm các tần số chủ yếu nhất.

4.5.3.3. Tần số cơ bản của cầu dây văng

(1) Công thức kinh nghiệm tính tần số uốn thẳng đứng bậc 1 cho cầu dây văng tháp đôi:

Khi tiến hành ước tính chống gió ở giai đoạn thiết kế sơ bộ, có thể dùng các công thức kinh nghiệm qua các tài liệu thống kê sau đây:

+ Cầu dây văng không có mố trụ: $f_{b1} = \frac{110}{L_c}$ (4.27a)

+ Cầu dây văng có mố trụ; $f_{b1} = \frac{150}{L_c}$ (4.27b)

trong đó: L_c - khẩu độ chính.

(2) Công thức tính toán rút gọn của tần số uốn cong đối xứng thẳng đứng bậc 1 của cầu dây văng tháp đôi:

$$f_{b1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_b}{m}} \quad (4.28a)$$

trong đó:

$$K_b = \left(\frac{\pi}{L_c} \right)^4 (E_g I_g + 2E_t I_t) + \frac{E_c A_c}{2aL_s} \sin^2 \alpha \quad (4.28b)$$

với: E_c - mô đun đàn hồi của dây văng (MPa)

A_c - diện tích mặt cắt dây văng dài nhất tại giữa nhịp (m^2)

L_s - chiều dài dây văng dài nhất tại giữa nhịp (m)

a - cự ly cáp trung bình (m)

α - góc nghiêng của cáp dài nhất ở nhịp giữa ($^\circ$)

E_g - mô đun đàn hồi của vật liệu dầm chủ (MPa)

E_t - mô đun đàn hồi của vật liệu chân trụ (MPa)

I_g - mô men quán tính theo phương đứng của mặt cắt dầm chủ (m^4)

I_t - mô men quán tính hướng dọc cầu tại mặt cắt chân tháp (m^4)

(3) Công thức kinh nghiệm về tần số xoắn bậc 1 cầu dây văng

Trong giai đoạn thiết kế sơ bộ, khi tiến hành ước tính chống gió, có thể dùng công thức kinh nghiệm sau đây để ước tính tần số xoắn vận bậc 1 cầu dây văng tháp đôi:

$$f_{t1} = \frac{C}{\sqrt{L_c}} \quad (4.29)$$

trong đó: C - hệ số phụ thuộc vào hình dạng tháp cầu, dầm chủ, vật liệu dầm chủ, có thể lấy trị số ở bảng 4.11.

Bảng 4.11: Giá trị hệ số C

Mặt dây cáp	Hình dạng mặt cắt dầm chủ	Cầu thép	Cầu bê tông
Mặt dây ngang	Hở	10	9
	Nửa hở	11 ÷ 13	12
	Kín	-	-
Mặt dây xiên	Hở	12	11
	Nửa hở	13 ÷ 15	12
	Kín	20	-

4.5.3.4. Hệ số cản (giảm chấn) của cầu

(1) Khi phân tích dao động gió cầu và thí nghiệm hầm gió, thông thường thiên về an toàn lấy cận dưới của các trị số thống kê về độ giảm chấn của kết cấu.

(2) Nếu không có hiệu số đo đạc thực tế, thì khi phân tích dao động gió, nói chung có thể lấy cận dưới các trị số ở bảng 4.12.

Bảng 4.12

Loại cầu	Hệ số cản	Tỷ suất suy giảm $\delta = 2\pi\xi$	Phạm vi thống kê ξ
Cầu thép	0,005	0,031	0,5% ÷ 1%
Cầu liên hợp	0,01	0,063	1% ÷ 1,5%
Cầu bê tông	0,02	0,125	2% ÷ 3%

4.6. ỔN ĐỊNH KHÍ ĐỘNG LỰC HỌC CỦA CẦU**4.6.1. Dao động tròng trành (Flutter)****4.6.1.1. Quy định chung**

Dao động tròng trành (Flutter) của mặt cắt có hình dạng khí động học và dao động tròng trành xoắn dòng phân ly của mặt cắt phi khí động học là hai hình thức dao động tròng trành khác nhau, cơ chế chuyển động cũng khác nhau.

Dạng dao động tròng trành thứ nhất là một loại do uốn xoắn kết hợp, qua độ cứng không khí làm thay đổi hai tần số uốn và xoắn làm chúng tiếp cận nhau và ngẫu hợp thành một tần số dao động tròng trành duy nhất, làm dao động lan truyền đi.

Dạng dao động tròng trành thứ hai là do sức cản (giảm chấn) âm của không khí không ngừng chống lại sức cản dương của kết cấu, cuối cùng làm dao động lan truyền. Đại bộ phận mặt cắt cầu có hình dạng nằm giữa hai loại: hình dạng khí động học và hình dạng phi khí động học, nên có thể nói rằng cả hai loại hình dao động tròng trành này

đều có khả năng xuất hiện, chỉ là trước hay sau tùy theo các điều kiện xuất hiện nào của chúng được thoả mãn trước.

Loại mặt cắt có hình dạng khí động học, nhẹ dễ phát sinh dao động tròn tròn ngẫu hợp, còn loại mặt cắt dạng "tù", nặng lại phát sinh khí động học có góc cạnh hoặc có lan can thì do mặt cắt đã bị "tù" hoá, cũng dễ xuất hiện dao động tròn tròn xoắn trước, các điều này được xác định qua thí nghiệm tỉ mỉ trong hầm gió và khi phân tích dao động tròn tròn.

(1) Tùy theo dạng mặt cắt cầu, dao động tròn tròn có 2 loại cơ chế hoạt động.

- Đối với mặt cắt phẳng dẹt có hình dạng khí động học có thể phát sinh dao động tròn tròn ngẫu hợp cổ điển, tốc độ gió tới hạn của loại dao động này tương đối cao. Lúc đó, hiệu ứng về độ cứng do gió tốc độ cao gây nên làm thay đổi tần suất uốn và xoắn của kết cấu; dưới tác dụng tốc độ gió giới hạn, làm chúng ngẫu hợp thành tần số dao động tròn tròn thống nhất và thúc đẩy lan truyền dao động.

- Đối với mặt cắt không có hình dạng "khí động học", thì dễ phát sinh dao động tròn tròn xoắn. Do sự chuyển động xoắn của mặt cắt do gió di chuyển gây nên, tạo thành một loại hiệu ứng cản âm; Khi đạt tới tốc độ gió tới hạn cản âm của không khí sẽ khắc phục cản dương của bản thân kết cấu dẫn tới sự lan truyền dao động.

(2) Do đặc tính dòng rối của gió tự nhiên gần mặt đất, nên gió mạnh có thể có góc tác dụng nhất định. Khi kiểm tra tính ổn định dao động tròn tròn của cầu khẩu độ lớn cần xét tới ảnh hưởng bất lợi của góc tác dụng đối với tốc độ gió tới hạn. Góc tới hạn làm cho chiều cao hình chiếu đứng của mặt cắt phẳng, dẹt hình dạng khí động học dài thêm, sinh ra hiệu ứng tày hoá, có thể phát sinh dao động tròn tròn xoắn dòng phân ly do cản âm của không khí gây ra giống như đối với loại mặt cắt không có hình dạng khí động học. Hai loại dao động tròn tròn ngẫu hợp và dao động tròn tròn xoắn có sự cạnh tranh nhau, vì vậy cần phải so sánh, phân tích để xét dao động tròn tròn bất lợi nhất.

4.6.1.2. Dao động tròn tròn ngẫu hợp cổ điển

(1) Công thức gần đúng của tốc độ gió tới hạn của dao động tròn tròn ngẫu hợp đối với bản phẳng:

$$V_{co} = \left[1 + (\varepsilon - 0,5) \sqrt{\frac{r}{b} 0,72\mu} \right] \omega_b b \quad (4.30a)$$

hoặc: $V_{co} = T_{ho}^{-1} f_t B \quad (4.30b)$

Suy ra: $T_{ho}^{-1} = \frac{\pi \left[1 + (\varepsilon - 0,5) \sqrt{\left(\frac{r}{b} \right) 0,72\mu} \right]}{\varepsilon} \quad (4.30c)$

trong đó:

$$\varepsilon - \text{tỷ số tần số uốn, } \varepsilon = \frac{f_t}{f_b} = \frac{\omega_t}{\omega_b}$$

$$\mu - \text{tỷ số khối lượng riêng của cầu và không khí, } \mu = \frac{m}{\pi \rho b^2}$$

$$r/b - \text{tỷ số bán kính quán tính mặt cắt cầu, } \frac{r}{b} = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{I}{m}}$$

V_{co} - tốc độ gió tới hạn dao động tròn thành bản phẳng, (m/s)

b - nửa chiều rộng cầu, (m)

$\frac{V_{co}}{\omega_b b}$ - tốc độ gió tới hạn tính đối

$\delta = 2\pi\xi$ - tỷ suất suy giảm hoặc tỷ số cản của kết cấu

Kết quả chính xác cho tốc độ gió tới hạn của dao động tròn thành bản phẳng.

Biểu đồ đơn tốc độ gió tới hạn dao động tròn thành ngẫu hợp của bản phẳng mỏng.

Do tỷ số cản của kết cấu không nhảy cảm với dao động tròn thành của bản phẳng

mỏng nên chú ý rằng họ đường cong $\frac{V_{co}}{\omega_b b} - \varepsilon$, có liên quan tới hai tham số m và $\frac{r}{b}$, có thể coi gần đúng như họ đường thẳng gặp nhau tại một điểm, vì vậy qua kết hợp, ta được công thức gần đúng về tốc độ gió tới hạn (công thức Vanderput):

$$V_{co} = \left[1 + (\varepsilon - 0,5) \sqrt{\frac{r}{b} \times 0,72\mu} \right] \omega_b b \quad (4.31)$$

Công thức này đơn giản, dễ sử dụng, có độ chính xác cao có thể lấy làm trị số cơ sở khi tính tốc độ gió tới hạn ngẫu hợp bản phẳng có xét thêm các nhân tố hiệu chỉnh khác. Quy phạm ECCS ở châu Âu cũng sử dụng công thức này.

Công thức trong quy phạm ECCS ở châu Âu:

$$V_{co} = \pi f_b B \left[1 + \left(\frac{f_a}{f_b} - 0,5 \right) \sqrt{\frac{1,5\sqrt{mI}}{\rho B^2}} \right] \quad (4.32a)$$

Tương ứng với:

$$V_{co} = \left[1 + (\varepsilon - 0,5) \sqrt{\frac{r}{b} \times 0,59\mu} \right] \omega_b b \quad (4.32b)$$

Tức là hệ số kết hợp đường thẳng từ 0,72 giảm xuống còn 0,59 làm cho trị số tính toán tốc độ gió tới hạn tương đối nhỏ.

(2) Tỷ số khối lượng riêng μ

Tỷ số khối lượng riêng $\mu = \frac{m}{\pi \rho b^2}$ là một tham số không thứ nguyên, là tỷ số phản

ánh khối lượng kết cấu cầu so với khối lượng không khí xung quanh, nó có ảnh hưởng lớn đến dao động tròn tránh ngẫu hợp. Khi tính toán tỷ số khối lượng của cầu dây văng, nói chung người ta bỏ qua khối lượng dây văng mà chỉ ghi khối lượng trên đơn vị dài mặt cầu. Nhưng khi tính cầu treo khẩu độ lớn, vì cáp chủ và mặt cầu dao động đồng bộ với nhau, nên khối lượng kết cấu cần có cáp chủ:

$$m = m_d + 2m_c \quad (4.33)$$

trong đó:

m - tổng khối lượng đơn vị dài mặt cầu và cáp chủ (kg/m)

m_d - khối lượng một đơn vị dài mặt cầu (kg/m)

m_c - khối lượng một đơn vị dài cáp chủ (kg/m)

Để tính toán chính xác hơn, phải xét tới sự chuyển động của toàn cầu. Từ dao động uốn bậc 1 $h(x)$ và xoắn bậc 1 $a(x)$ theo công thức:

$$m_{eq} = \frac{\int_{\text{Toàn cầu}} m(x)h^2(x)dx}{\int_{\text{Toàn cầu}} h^2(x)dx} \quad (4.34a)$$

$$I_{eq} = \frac{\int_{\text{Toàn cầu}} I(x)\alpha^2(x)dx}{\int_{\text{Toàn cầu}} \alpha^2(x)dx} \quad (4.34b)$$

Tính ra khối lượng và mômen quán tính từ đó xác định tỷ số mật độ và tỷ số bán kính quán tính đẳng hiệu:

$$\mu_{eq} = \frac{m_{eq}}{\pi \rho b^2} \quad (4.34c)$$

$$\frac{r_{eq}}{b} = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{I_{eq}}{m_{eq}}} \quad (4.34d)$$

Cuối cùng, từ đó tính ra tốc độ gió tới hạn.

Ta thấy rằng sự biến đổi ε không nhạy cảm lắm, điều này chứng tỏ trong dao động tròn tránh ngẫu hợp của bản mỏng phẳng, tần số xoắn có tác dụng chủ đạo. Ngược lại

tỷ số mật độ có ảnh hưởng lớn đến T_{ho}^{-1} phản ánh tính năng dao động tròn thành của mặt cắt bản mỏng. Khi $\mu = 10$ (tương đương mặt cắt cầu thép nhẹ) tăng lên $\mu = 40$ (tương đương với mặt cắt BTCT) thì T_{ho}^{-1} tăng từ 6 lên 12; chứng tỏ hiệu ứng rõ rệt của khối lượng. Trị số T_{ho}^{-1} trong bảng 4.13.

Bảng 4.13

μ	ε	T_{ho}^{-1} (Vanderput)	
10	1,50	6,36	6,4
	2,00	6,38	
	2,50	6,38	
	3,00	6,39	
20	1,50	8,13	8,5
	2,00	8,37	
	2,50	8,51	
	3,00	8,60	
30	1,50	9,49	10,2
	2,00	9,89	
	2,50	10,14	
	3,00	10,30	
40	1,50	11,64	12,8
	2,00	12,32	
	2,50	12,72	
	3,00	12,99	

Công thức Vanderput có thể sửa đổi thành:

$$V_{co} = T_{ho}^{-1} f_t B$$

Lúc đó:

$$T_{ho}^{-1} = \frac{\pi \left[1 + (\varepsilon - 0,5) \sqrt{\left(\frac{r}{b} \right)^{0,72\mu}} \right]}{\varepsilon}$$

Để loại bỏ hệ số nhạy cảm trong công thức, đồng thời để giảm bớt sai số ta cần tiến hành điều chỉnh công thức một cách hợp lý, ta thu được biểu thức đơn giản hơn:

$$T_{ho}^{-1} = 2,5 \sqrt{\mu \left(\frac{r}{b} \right)}$$

Qua đó phản ánh ảnh hưởng quan trọng của tỷ số mật độ μ và bán kính quán tính $\frac{r}{b}$.

Khi $\frac{r}{b} = 0,577$ (bản phẳng), trị số T_{ho}^{-1} xem bảng 4.14.

Bảng 4.14

	μ	10	20	30	40
T_{ho}^{-1}	Công thức đơn giản hoá	6,0	8,5	10,4	13,4
	Công thức Vanderput	6,4	8,5	10,2	12,8

(3) Công thức đơn giản tính dao động tròn tránh ngẫu hợp bản phẳng

Bỏ qua ảnh hưởng của tham số ε , với sự điều chỉnh thích hợp độ lệch ta có công thức tính T_{ho}^{-1} đơn giản hơn:

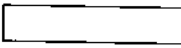
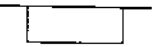
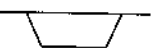
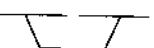
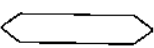
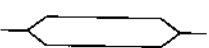
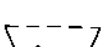
$$T_{ho}^{-1} = 2,5 \sqrt{\mu \left(\frac{r}{b} \right)} \quad (4.35)$$

(4) Nói chung tính năng khí động của mặt cắt cầu đều kém hơn bản phẳng, sau khi tìm được tốc độ gió tới hạn qua thí nghiệm khí động lực, có thể tìm được hệ số triết giảm hình dạng mặt cắt. Hệ số hình dạng η_s và hệ số hiệu dụng η_o ở trong bảng 4.15 là trị số trung bình tính đối qua thống kê hàng loạt tốc độ gió tới hạn trong thí nghiệm khí động lực, trong đó có thể thấy được tình hình chung tính năng khí động của các mặt cắt các loại cầu điển hình. Cầu có cánh hẫng, có tám bản bụng xiên, máng hở giữa v.v... đều có thể nâng cao tính năng khí động.

Đối với mặt cắt cầu thực tế không phải bản phẳng, nói chung qua thí nghiệm khí động lực để xác định hệ số triết giảm hình dạng η_s và hệ số triết giảm tác dụng V_{co} so với tốc độ gió tới hạn bản phẳng. Trong giai đoạn thiết kế sơ bộ có thể lấy ở bảng 4.15 Tốc độ gió tới hạn dao động tròn tránh của mặt cắt cầu thực tế là:

$$U_{cr} = \eta_s \eta_o V_{co} \quad (4.36)$$

Bảng 4.15

Hình dạng mặt cắt	Hệ số hình dạng η_s	Hệ số hình dạng η_α
1  Bản phẳng	1	
2  Hình chữ nhật	0,43	0,75
3  Cánh treo	0,62	
4  Bán bụng xiên	0,85	
5  Máng hờ	0,98	
6  Miệng gió	0,91	0,80
7  Bán dẫn dòng	0,83	0,80
8  Bán hộp bụng xiên tách rời	0,80	0,80
9  Dầm bản hờ	0,70	1
10  Bán hộp dẹt hờ rãnh	1,21	

4.6.1.3. Dao động tròn tránh xoắn dòng phân ly

Theo lý luận dao động tròn tránh xoắn dòng phân ly đối với mặt cắt cầu hình phức tạp được Scanlan đề xuất thì khi sức cản âm của không khí vượt quá cản dương của kết cấu sẽ sinh ra dao động tròn tránh lan truyền, tức có điều kiện xảy ra dao động như sau:

$$A_2^*(K) \geq \frac{4I_{pi}\xi_i}{\rho B^4 G_{aiqi}}$$

Qua công thức trên cũng thấy được ảnh hưởng của mômen quán tính khối lượng I_p và sức cản ξ đối với ổn định dao động tròn tránh xoắn.

(1) Đơn giản hoá điều kiện nhận biết

Trong điều kiện bình thường, lực cản âm kích thích dao động xoắn chủ yếu từ lực cản khí động xoắn có liên quan đến đạo hàm khí động $A_2^*(K)$. Điều kiện nhận biết sinh ra dao động tròn tránh có thể đơn giản thành:

$$A_2^*(K) \geq \frac{4I_{pi}\xi_i}{\rho B^4 G_{ai ai}} \quad (4.37)$$

trong đó:

$A_2^*(K)$ - đạo hàm khí động tương ứng với phần dương chuyển vị xoắn tìm được qua thí nghiệm khí động lực.

K - tần suất tính đối tượng ứng với dao động bậc i , $K = \frac{\omega_i \cdot B}{U}$

I_{pi} - mô men quán tính khối lượng của dầm chủ đối với dao động bậc i ($\text{kg.m}^2/\text{m}$).

$G_{ai ai}$ - hệ số tham gia dao động của phần lượng xoắn α_i trong dao động bậc i .

$$G_{ai ai} = \int \alpha_i^2(x) dx$$

ω_i, ξ_i - tần số góc đo xoắn có (Hz) và tỷ số cản của loại dao động bậc i .

ω_i thoả mãn điều kiện (6.1.3.1) gọi là tần số dao động tròn thành, còn loại hình dao động tương ứng với ω_i gọi là hình thái dao động tròn thành.

(2) Tốc độ gió tới hạn xoắn của dao động tròn thành

Trị số thoả mãn (4.37) gọi là trị số tới hạn của K , ký hiệu là K_{cr} . Từ K_{cr} tìm được tốc độ gió tới hạn dao động tròn thành:

$$U_{cr} = \frac{B\omega_i}{K_{cr}} \quad (4.38a)$$

Ở giai đoạn thiết kế sơ bộ, có thể bỏ qua ảnh hưởng của độ giảm chấn (độ cản) của kết cấu, lấy trị số K_{cx} thoả mãn $A_2^*(K) = 0$ (thiên về an toàn), rồi tìm trị số tốc độ gió tới hạn V_{cr} :

$$U_{cr} = T_h^{-1} B f_i \quad (4.38b)$$

trong đó:

T_h^{-1} - số Theodorson, tìm được qua thí nghiệm khí động lực

f_i - tần số xoắn cơ bản

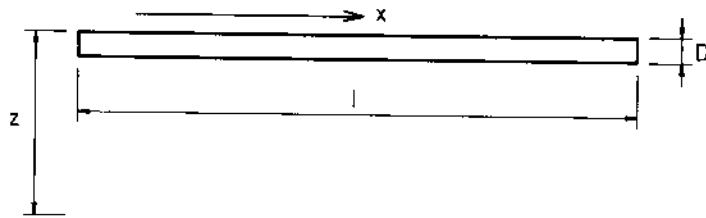
4.6.1.4. Tốc độ gió kiểm tra dao động tròn thành

Tốc độ gió kiểm tra dao động tròn thành nêu trong bản Hướng dẫn này áp dụng công thức:

$$[U_{cr}] = K \mu_f U_d \quad (4.39)$$

trong đó: μ_f - hệ số hiệu chỉnh có xét tới đặc tính tương quan ngang động của tốc độ gió.

Phương pháp tính μ_f như sau:



Hình 4.10

Kết cấu có chiều nằm ngang như hình 4.10. Tại x , thời gian t , áp lực của một đơn vị dài là:

$$p(x, t) = \frac{1}{2} \rho C_D (U + u)^2 \approx \bar{p} + \frac{2\bar{p}}{U} u(x, t) \quad (4.40a)$$

trong đó:

ρ - mật độ không khí.

C_D - hệ số cản.

D - chiều cao dầm.

U - tốc độ gió trung bình tại độ cao z (tốc độ gió chuẩn thiết kế).

$u(x, t)$ - thành phần gió động theo phương ngang.

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \rho C_D D U^2$$

Vậy tổng áp lực tác dụng lên cầu là:

$$P_w(t) = \int_0^l p(x, t) dx = \bar{p} l + \int_0^l \frac{2\bar{p}}{U} u(x, t) dx = \bar{p} l + P(t) \quad (4.40b)$$

trong đó: $\bar{P} = \bar{p} l$

l - chiều dài khẩu độ chính.

Đem bộ phận áp lực động trong công thức trên biến đổi Fourier và giả sử có ánh xạ sau:

$$P^T(t): t < -T \text{ hoặc } t > T \text{ có } P^T(t) = 0$$

$$-T \leq t \leq T \text{ có } P^T(t) = P(t)$$

Vậy biến đổi Fourier của áp lực động có thể viết thành:

$$\begin{aligned} F_p(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} P^T(t) e^{-i2\pi f t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^l \frac{2\bar{p}}{U} u^T(x, t) e^{-i2\pi f t} dt dx \\ &= \frac{2\bar{p}}{U} \int_0^l F_u(x, f) dx \end{aligned} \quad (4.40c)$$

$$F_u(x, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} u^T(x, t) e^{-i2\pi ft} dt$$

trong đó: $F_u(x, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} u^T(x, t) e^{-i2\pi ft} dt$ là biến đổi Fourier của áp lực động $u^T(x, t)$.

Phức số cộng $F_p^*(f)$ của $F_p(f)$ là:

$$F_p^*(f) = \int_{-T}^T P^T(t) e^{i2\pi ft} dt = \frac{2\bar{p}}{U} \int_{-T}^T F_u^*(x, f) dx \quad (4.40d)$$

trong đó: $F_u^*(x, f)$ là phức số cộng của $F_u(x, f)$.

Hàm mật độ phổ công suất của $P(t)$ là:

$$\begin{aligned} S_p(f) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} E[F_p(f).F_p^*(f)] \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left(\frac{2\bar{p}}{U} \right)^2 \int_0^1 \int_0^1 E[F_u(x_1, f).F_u^*(x_2, f)] dx_1 dx_2 \\ &= \left(\frac{2\bar{p}}{U} \right)^2 \int_0^1 \int_0^1 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} E[F_u(x_1, f).F_u^*(x_2, f)] dx_1 dx_2 \\ &= \left(\frac{2\bar{p}}{U} \right)^2 \int_0^1 \int_0^1 S_u(x_1, x_2, f) dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (4.40e)$$

trong đó: $S_u(x_1, x_2, f)$ - mật độ phổ công suất tương hỗ của cầu tại x_1, x_2 .

Theo công thức do Davenport đề xuất, có:

$$S_u(x_1, x_2, f) = e^{\frac{-\lambda f}{U}|x_1 - x_2|} S_u(f) \quad (4.40f)$$

nên công thức (4.40e) có thể viết:

$$\begin{aligned} S_p(f) &= \left(\frac{2\bar{p}}{U} \right)^2 S_u(f) \int_0^1 \int_0^1 e^{\frac{-\lambda f}{U}|x_1 - x_2|} dx_1 dx_2 \\ &= \left(\frac{2\bar{p}}{U} \right)^2 S_u(f) |x_u(f)|^2 \end{aligned} \quad (4.40g)$$

trong đó: $|x_u(f)|^2$ - biểu thị tương quan không gian của tốc độ gió động theo phương trục cầu, có ý nghĩa.

$$\begin{aligned} |\chi_u(f)|^2 &= \frac{1}{l^2} \int_0^l \int_0^l e^{\frac{-\lambda f}{U} |x_1 - x_2|} dx_1 dx_2 \\ &= \frac{2}{\gamma^2} (\gamma - 1 + e^{-\gamma}) \end{aligned} \quad (4.40h)$$

$$\gamma = \frac{\lambda f}{U}$$

Vậy phương sai căn của áp lực gió động là:

$$\sigma_p = \left[\int_0^\infty S_p(f) df \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.40i)$$

Theo lý luận của Davenport, thì trị số kỳ vọng của áp lực gió tối đa là:

$$E[P_{to\max}] = \bar{P} + g\sigma_p \quad (4.40k)$$

$$g = \sqrt{2 \ln(n_0 T)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(n_0 T)}} \quad (4.40l)$$

$$n_0 = \frac{\left[\int_0^\infty f^2 S_p(f) df \right]^{\frac{1}{2}}}{\sigma_p} \quad (4.40m)$$

Vậy hệ số hiệu chỉnh μ_f tốc độ gió kiểm tra dao động tròn thành:

$$\mu_f = \sqrt{\frac{E[P_{to\max}]}{\bar{P}}} = \sqrt{1 + g\sigma_p \sqrt{\bar{P}}} \quad (4.40n)$$

Theo Tiêu chuẩn thiết kế chống gió cho cầu của Nhật Bản thì với điều kiện tốc độ gió cơ bản $U_{10} = 40(m/s)$, $\lambda = 7$, phổ gió ngang Hino, tìm được hệ số điều chỉnh tốc độ gió kiểm tra dao động tròn thành m với các chiều cao mặt cầu và khẩu độ khác nhau như ở bảng 4.16.

Bảng 4.16: Hệ số hiệu chỉnh tốc độ gió kiểm tra dao động tròn thành

$l(m) =$	100	200	300	400	500	650	800	1000	1200	1500	1800
$h = 20$	1,24	1,21	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11
$h = 40$	1,23	1,21	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11
$h = 60$	1,23	1,20	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11
$h = 80$	1,22	1,20	1,18	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17

Căn cứ theo phổ gió ngang Kaimal, tính được hệ số hiệu chỉnh tốc độ gió kiểm tra dao động tròn tròn với các tốc độ gió cơ bản khác nhau, điều kiện địa hình và địa mạo khác nhau, và thấy rằng với cùng một loại địa hình thì hệ số điều chỉnh μ_f thay đổi ít theo sự biến đổi của tốc độ gió; hơn nữa dù cho hệ số điều chỉnh μ_f có biến đổi theo sự biến đổi chiều cao dầm nhưng sự biến đổi đó cũng nhỏ.

Các cầu khẩu độ lớn nói chung, chiều cao của chúng trong khoảng 40÷60 m, tốc độ gió cơ bản 30÷60 m/s, vì vậy đề nghị sử dụng kết quả với tốc độ gió cơ bản $\bar{u} = 40 \text{ (m/s)}$, chiều cao mặt cầu 40(m) cho các loại mặt đất khác nhau.

Trong mục 4.6.1.4(1) là kết quả tính toán với tốc độ gió cơ bản $U_{10} = 40 \text{ (m/s)}$, sử dụng phổ gió ngang Karmal, hệ số tương quan $\lambda = 7$, cao độ mặt cầu 40m. Qua phân tích thấy rằng hệ số μ_f , ít nhạy cảm với sự biến đổi tốc độ gió và chiều cao cầu và độ gồ ghề mặt đất. Theo Tiêu chuẩn thiết kế chống gió của Nhật Bản tính toán với phổ gió Hino, kết quả nhìn chung tương đương với kết quả tính toán phổ Kaimal khi $z_0 = 0,003 \text{ (m)}$, thấp hơn trị số z_0 với mặt đất loại I quy định trong bản Hướng dẫn này.

Châu Âu sử dụng Tiêu chuẩn xét dao động tròn tròn trên cơ sở phân tích độ tin cậy, nếu dùng xác suất mất mát $P_F = 10^{-7}$ thì kết quả tính toán tốc độ gió kiểm tra dao động tròn tròn đại thể cũng tương đương với tính toán theo bản Hướng dẫn này, nhưng lớn hơn kết quả tính toán theo chuẩn thiết kế chống gió của Nhật Bản.

(1) Tốc độ gió kiểm tra dao động tròn tròn

$$[U_{cr}] = K\mu_f U_d \quad (4.41)$$

trong đó:

$[U_{cr}]$ - tốc độ gió kiểm tra dao động tròn tròn.

U_d - tốc độ gió chuẩn thiết kế.

μ_f - hệ số hiệu chỉnh, là đại lượng không thứ nguyên nhằm xét tới đặc tính tương quan của ảnh hưởng động của tốc độ gió với phương nằm ngang. Xem bảng 4.17.

K - hệ số an toàn tổng hợp, có xét tới các nhân tố như sai số trong thí nghiệm khí động lực, sai sót trong thiết kế, thì công. $K = 1,2$.

Bảng 4.17: Hệ số hiệu chỉnh μ_f

Hệ số hiệu chỉnh μ_f Độ gồ ghề mặt đất	100	200	300	400	500	650	800	1000	1200	1500	1800
I	1,30	1,27	1,26	1,24	1,23	1,22	1,21	1,20	1,20	1,19	1,18
II	1,36	1,33	1,31	1,29	1,28	1,27	1,26	1,25	1,24	1,22	1,21
III	1,43	1,39	1,37	1,35	1,33	1,31	1,30	1,28	1,27	1,25	1,24
IV	1,49	1,44	1,42	1,40	1,38	1,36	1,35	1,33	1,31	1,29	1,28

μ_f phụ thuộc vào loại bề mặt đất và khẩu độ nhịp (m).

(2) Biểu thức kiểm tra dao động tròn tròn

Biểu thức kiểm tra dao động tròn tròn:

$$U_{cr} \geq [U_{cr}] \quad (4.42)$$

trong đó: U_{cr} - tốc độ gió tới hạn dao động tròn tròn của cầu (m/s)

4.6.1.5. Phân cấp ổn định dao động tròn tròn

Phân cấp ổn định dao động tròn tròn là một loại dự đoán mức độ cấp thiết của việc chống gió khi thiết kế cầu và qua đó đề xuất các yêu cầu khác nhau về thí nghiệm khí động và các biện pháp chống gió.

$\min T_h^{-1}$ là chỉ số tổng hợp phản ánh tình hình gió tại vị trí cầu, chiều rộng cầu (số làn xe), xe và tần số xoắn. Chỉ số càng lớn, yêu cầu chống gió càng cao, thoả mãn tính ổn định dao động tròn tròn càng khó khăn, đòi hỏi giải quyết chắc chắn qua việc thí nghiệm mô hình toàn cầu và chọn loại hình khí động chi tiết.

Để phán đoán nhanh tính ổn định chống gió của cầu khẩu độ lớn, có thể dùng công thức gần đúng dự đoán tần số xoắn bậc 1; căn cứ tài liệu khí tượng ở địa điểm cầu, dự đoán tính tốc độ gió kiểm tra dao động, sau đó dùng công thức sau tìm trị số nhỏ nhất T_h^{-1} cần thiết cho mặt cắt dầm chủ:

$$\min T_h^{-1} = \frac{[U_{cr}]}{f_1 B} \quad (4.43)$$

Căn cứ trị số $\min T_h^{-1}$, đối chiếu bảng 4.18, có thể biết được tính ổn định chống gió của cầu. Khi mặt cầu rộng, tốc độ gió ở vị trí cầu nhỏ, thì trị số $\min T_h^{-1}$ cần thiết sẽ nhỏ, tính ổn định chống gió của cầu càng dễ thoả mãn.

Bảng 4.18: Bảng phân cấp tính ổn định chống gió của cầu

Phân cấp	$\min T_h^{-1}$	Tính ổn định chống gió	Yêu cầu thí nghiệm chống gió và biện pháp chống gió
I	< 2.5	Rất an toàn	Không cần thí nghiệm Hãm gió
II	2.5 - 4	Nhìn chung thoả mãn yêu cầu	Phân tích dao động tròn tròn, thí nghiệm Hãm gió
III	4.0 - 7.5	Cần thận trọng	Thí nghiệm mô hình phân đoạn, phân tích dao động và thí nghiệm toàn cầu về khí động
IV	> 7.5	Cần có biện pháp chống gió	Thí nghiệm mô hình phân đoạn toàn diện. Chọn loại hình khí động; phân tích dao động tròn tròn, thí nghiệm mô hình toàn cầu, khi cần thiết dùng biện pháp kỹ thuật khống chế dao động tròn tròn

4.6.2. Dao động

4.6.2.1. Quy định chung

(1) Kết cấu có phát sinh dao động hay không chủ yếu là do hình dạng mặt cắt ngang của kết cấu. Kết cấu có thể sinh dao động gọi là kết cấu không ổn định đối với dao động.

(2) Trụ độc lập bằng thép tự ổn định trong giai đoạn thi công, có khả năng sinh ra dao động uốn với bậc dao động thấp. Đối với các kết cấu và cấu kiện có tỷ số dài, rộng tương đối lớn cũng cần kiểm tra dao động.

(3) Đối với trụ cầu hai cột bằng bê tông cốt thép cao dưới 150 m không cần kiểm tra dao động.

4.6.2.2. Tốc độ gió kiểm tra dao động

(1) Tốc độ gió kiểm tra dao động

Để phản ánh một cách tổng hợp các nhân tố như sai số trong thí nghiệm khí động, tính chắc chắn trong thiết kế, thi công và tầm quan trọng kết cấu v.v... người ta quy định tốc độ gió kiểm tra dao động gấp 1,2 lần tốc độ gió chuẩn thiết kế:

$$[U_{cg}] = 1,2U_d \quad (4.44)$$

trong đó: $[U_{cg}]$ - tốc độ gió kiểm tra dao động (m/s).

(2) Biểu thức kiểm tra dao động

Tốc độ tối hạn của dao động U_{cg} cần thỏa mãn điều kiện:

$$U_{cg} \geq [U_{cg}] \quad (4.45)$$

4.6.2.3. Dự đoán tốc độ gió tới hạn tốc độ dao động

(1) Đối với cấu kiện có mặt cắt đều bố trí nằm ngang, khi $(C'_L + C_D) \geq 0$ thì phát sinh dao động. Khi $(C'_L + C_D) < 0$ thì có thể xuất hiện dao động, khi đó tốc độ gió tới hạn dao động có thể tính như sau:

$$U_{cg} = -\frac{4m\omega_1\xi_1}{\rho D} \times \frac{1}{(C'_L + C_D)} \quad (4.46)$$

trong đó:

m - khối lượng một đơn vị dài của kết cấu (kg/m)

ω_1 - tần số góc uốn bậc 1 của kết cấu (Hz)

ξ_1 - tỷ số cản của kết cấu

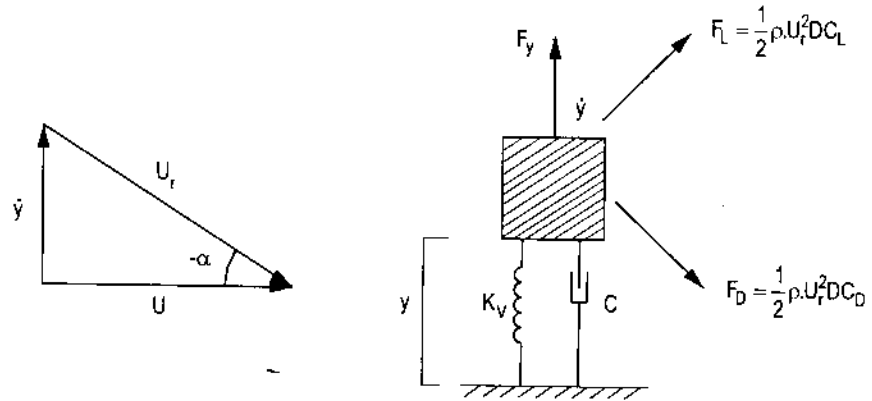
D - chiều rộng mặt hứng gió của mặt cắt (m)

C'_L - độ lệch của hệ số lực nâng đối với góc tác dụng: $C'_L = \frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$

ρ - tỷ trọng không khí (kg/m^3)

Hình 4.11 là mô hình phân tích dao động của hệ một bậc tự do.

Trong đó: U là tốc độ gió trung bình, $\dot{y}$ là tốc độ gió dao động của kết cấu, U_r là tốc độ gió tương đối.



Hình 4.11. Mô hình dao động hệ một bậc tự do

Từ hình vẽ ta có:

$$U_r^2 = U^2 + \dot{y}^2 \quad (4.47a)$$

$$\alpha = -\text{tg}^{-1} \left(\frac{\dot{y}}{U} \right) \approx -\frac{\dot{y}}{U} \quad (4.47b)$$

F_y - lực dao động có thể biểu thị:

$$F_y = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_y \quad (4.47c)$$

trong đó:

C_y là hệ số lực theo hình vẽ ta có:

$$C_y = \frac{U_r^2}{U^2} (C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha) \quad (4.47d)$$

Rõ ràng rằng C_y là hàm của tốc độ gió và góc tác dụng.

Dưới tác dụng của lực dao động, phương trình chuyển động của kết cấu như sau:

$$\ddot{y} + 2\xi_y \omega_y \dot{y} + \omega_0^2 y = \frac{F_y}{m} = \frac{\rho}{2m} U^2 D C_y \quad (4.47e)$$

Khi chỉ xét tính ổn định của kết cấu, α nhỏ, nên lực dao động khi $\alpha = 0$ được khai triển như sau:

$$F_y = F_y(\alpha = 0) + \left. \frac{\partial F_y}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \alpha \quad (4.47g)$$

Số hạng thứ nhất là tải trọng tĩnh, có thể bỏ qua, lúc đó ta có:

$$F_y = \left. \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \alpha = \frac{1}{2} \rho U^2 D \left[\left. \frac{\partial C_y}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} + C_D(\alpha = 0) \right] \frac{\dot{y}}{U} \quad (4.47h)$$

Đem (4.47h) thay vào (4.47g), ta được:

$$\ddot{y} + 2\xi_T \omega_y \dot{y} + \omega_y^2 y = 0 \quad (4.47i)$$

trong đó:

$$2\xi_T \omega_y = 2\xi_y \omega_y + \frac{1}{2} \frac{U \rho D}{m} \left(\left. \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} + C_D \right) \quad (4.47k)$$

Với: ξ_T - tổng sức cản kết cấu và sức cản khí động.

Khi $2\xi_T \omega_y > 0$ - kết cấu ổn định,

Khi $2\xi_T \omega_y < 0$ - kết cấu dao động, không ổn định,

Khi $2\xi_T \omega_y = 0$ - kết cấu dao động, ở trạng thái giới hạn.

Từ trạng thái dao động giới hạn tìm ra tốc độ gió tới hạn của dao động kết cấu:

$$U_{cg} = -\frac{4m\omega_y \xi_y}{\rho D} \times \frac{1}{\left(\left. \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} + C_D \right)} \quad (4.47l)$$

Đó là công thức (4.46) trong bản Hướng dẫn này.

(2) Công thức tính tốc độ gió tới hạn của dao động của trụ cầu có mặt cắt đều trong trường gió cắt có số mũ α của mặt cắt gió:

$$U_{cg} = \frac{-2M_1 \xi_1 \omega_1}{Q} \quad (4.48a)$$

trong đó:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{\rho}{2} 10^{-\alpha} (C'_L + C_D) D \frac{L^{\alpha+1}}{\alpha+3} \quad (4.48b)$$

$$M_1 = \overline{M}_1 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{z_i}{L} \right)^2 \overline{M}_i \quad (4.48c)$$

trong đó:

$\overline{M}_1$ - tổng khối lượng trụ cầu (kg)

$\overline{M}_i$ - khối lượng dầm thứ i (kg)

α - chỉ số mũ mặt cắt gió

L - chiều cao trụ (m)

n - số trụ

N - số dầm ngang

z_i - chiều cao từ dầm ngang thứ i đến trụ (m)

Nói chung, mố trụ cầu đều tương đối cao, mà gió tự nhiên lại thay đổi lớn theo chiều cao (xem Mục 4.3) nên khi tính toán đặc tính dao động trụ cầu, cần xét tới tốc độ gió trung bình phân bố theo hàm số mũ với số mũ là α . Để đơn giản, giả thiết mặt cắt trụ cầu không đổi theo chiều cao và không xét lực khí động tại dầm ngang.

Do đặc tính của dao động, ta có phương trình chuyển động bậc 1 của trụ cầu:

$$M_1 (\ddot{y}_1 + 2\xi_1 \omega_1 \dot{y}_1 + \omega_1^2 y_1) = \sum_{i=1}^n \int_0^L F_y(z) \varphi_i(z) dz \quad (4.49a)$$

trong đó: $M_1 = \int_0^L m(z) \varphi_1^2(z) dz$

$m(z)$ - khối lượng đơn vị dài của trụ cầu, kể cả khối lượng ở vị trí dầm ngang

$\varphi_1(z)$ - loại hình dao động bậc 1 của cầu.

Để đơn giản việc tính toán, giả thiết

$$\varphi_1(z) = \frac{z}{L} \quad (4.49b)$$

$$F_y(z) = \frac{1}{2} \rho U^2(z) D C_y = -\frac{1}{2} \rho U^2(z) D \varphi_1(z) \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} + C_D \right) \frac{\dot{y}}{U(z)} \quad (4.49c)$$

trong đó: $U(z)$ - tốc độ gió ở cao độ z ;

$$U(z) = U_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (4.49d)$$

U_{10} - tốc độ gió ở cao độ 10 m;

α - chỉ số mũ mặt cắt gió phụ thuộc độ gồ ghề mặt đất;

Đem các trị số từ (4.49b đến 4.49d) thế vào công thức tính tải trọng được:

$$\sum_{i=1}^n \int_0^L F_y(z) \varphi_i(z) dz = \sum_{i=1}^n \frac{L^{\alpha+1}}{\alpha+3} \quad (4.49e)$$

Đem (4.49b) thế vào công thức tính khối lượng:

$$M_l = \overline{M}_{Tru} + \sum_{i=1}^N \left(\frac{z_i}{M_L} \right)^2 \overline{M}_i \quad (4.49g)$$

trong đó:

z_i - cao độ của dầm ngang thứ i

$\overline{M}_i$ - khối lượng mỗi dầm ngang

N - số dầm ngang

$\overline{M}_{Tru}$ - tổng khối lượng trụ

Đem (4.49e) và (4.49g) thế vào (4.49a), rồi theo phương pháp đã trình bày mục 4.6.2.3(1) được:

$$U_{cg} = \frac{-2M_l \xi_1 \omega_1}{Q} \quad (4.49h)$$

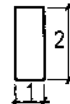
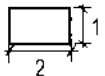
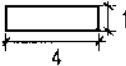
trong đó:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{\rho}{2} 10^{-\alpha} \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} + C_D \right) D \frac{L^{\alpha+1}}{\alpha+3}$$

(3) Hệ số lực dao động

Hệ số lực dao động ($C'_L + C_D$) của mặt cắt kết cấu, nói chung tìm được qua thí nghiệm ống khí động. Hệ số lực dao động của mặt cắt xem bảng 4.19.

Bảng 4.19: Hệ số lực dao động của các mặt cắt điển hình

Hình dạng mặt cắt	$C'_L + C_D$	Hình dạng mặt cắt	$C'_L + C_D$
	-2,7		0
	0		0,5
	-3,0		-0,66
	10,0		

4.7. DAO ĐỘNG BIÊN ĐỘ HẠN CHẾ

4.7.1. Dao động gập (rung lắc) - (Buffeting)

4.7.1.1. Quy định chung

(1) Gió động và gió trung bình tác dụng đồng thời lên kết cấu, sức cản không khí và độ cứng khí động do gió trung bình gây ra làm cho sức cản bề mặt và tần số của kết cấu

thay đổi theo tốc độ gió. Vì vậy khi phân tích dao động gập cần xét tới ảnh hưởng của gió trung bình.

(2) Ảnh hưởng của dao động gập của cầu là hiện tượng rất phức tạp. Khi luồng gió thổi qua cầu, do sự tác động tương hỗ giữa thành phần và khối lượng chuyển động của dòng khí, do sự tác động lẫn nhau giữa các loại gió gây dao động, do sự ngẫu hợp khí động của các thành phần khí chuyển động và sự ngẫu hợp của các cấp dao động v.v... nên việc tính toán chính xác ảnh hưởng của dao động gập rất khó khăn. Nói chung, dao động gập của cầu chủ yếu là do tự dao động uốn thẳng đứng tạo nên. Đứng trên góc độ chống gió cho công trình để xét thì có thể bỏ qua sự ngẫu hợp và tác dụng tương hỗ mà chỉ xét riêng dao động gập của các loại hình dao động cơ bản (uốn đứng, xoắn và uốn ngang).

(3) Hiện nay việc phân tích dao động gập của cầu nói chung theo phương pháp phân tích trong lĩnh vực tần số xét đồng thời tác dụng của lực dao động gập và lực tự kích thích. Lực tự kích thích tìm được qua thí nghiệm khí động. Lực dao động gập tìm được trên đường cong biểu diễn quan hệ giữa góc tác dụng và hệ số lực không khí, lực này đo được qua thí nghiệm 3 phần lực trong Hàm gió, sau đó qua đạo hàm khí động để xét. Cuối cùng, từ phổ tốc độ gió, dựa vào lý luận dao động tìm phương sai căn của ảnh hưởng dao động gập.

4.7.1.2. Tính toán phổ phản ứng dao động gập của cầu

(1) Tính toán phổ phản ứng dao động gập của cầu

Do các tham số gió động dùng trong phân tích dao động gập còn sơ lược nên qua việc lược bỏ một số nhân tố thứ yếu, ta có thể dùng phương pháp tính toán thực dụng phổ phản ứng dao động gập tương tự như trong lý luận phổ phản ứng địa chấn để tính toán phương sai căn của dao động gập của cầu.

Các công thức tính toán thực dụng phổ phản ứng dao động gập nêu ra dưới đây thích hợp với việc đánh giá dao động gập của các loại dao động đối xứng cho cầu đã xây dựng xong.

(2) Công thức tính phổ phản ứng dao động gập uốn đứng

Dao động gập uốn đứng là loại thường thấy ở cầu có khẩu độ lớn. Công thức tính phổ phản ứng của nó gồm 6 hệ số; trị số lớn nhất của phương sai căn chuyển vị dao động gập uốn đứng ở một bậc nào đó của dầm chủ là:

$$R_h(K_h) = C_{wh} \times C_{Ah} \times C_{Sh} \times \psi(\beta) \times \mu(K) \times \Phi_w(f) \quad (4.50a)$$

trong đó:

$$C_{wh} = \frac{1}{\ln \left| \frac{z}{z_0} \right|} \quad (4.50b)$$

$$C_{Ah} = C_L + \frac{D}{B} C_D \approx C_L \quad (4.50c)$$

$$C_{Sh} = \frac{0,44^2 \sqrt{Z.B}}{\mu \sqrt{\left(1 - 0,637 \frac{H_1^*}{\mu S}\right) \xi}} \quad (4.50d)$$

$$\Phi_w(f) = \frac{1}{1 + 4f} \quad (4.50e)$$

$$K = \frac{2\pi nB}{U} \quad (4.50g)$$

$$\beta = \frac{\lambda L_C K}{2\pi B} \quad (4.50h)$$

$$f = \frac{nZ}{U} \quad (4.50i)$$

với: $\Phi(\beta)$ - hệ số có liên quan đến hàm tiếp thu liên hợp, có liên quan đến loại hình dao động.
Xem bảng 4.20.

$\mu(K)$ - hệ số có liên quan đến hàm số, dùng để xét hiệu ứng bất bình thường của lực dao động gập.

$$\mu(K) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{K^3(1 + \pi K)}} \\ K^{-\frac{3}{2}} \end{cases}$$

U - tốc độ gió ở chiều cao cầu, (m/s)

Z - chiều cao dầm chủ cách mặt đất hoặc mặt nước, (m)

Z_0 - chiều cao độ gồ ghề (gồ ghề) của mặt đất (m)

λ - hệ số trung bình trường gió, thường lấy thiên về an toàn là 7

m - khối lượng 1 đơn vị dài dầm chủ (kg/m)

B - bề rộng dầm chủ (m)

D - chiều cao dầm chủ (m)

n - tần số cầu (Hz)

ξ - tỷ số cản cầu

L_C - khẩu độ chính (m)

C_D - hệ số lực ngang mặt cắt dầm chủ, tìm được qua thí nghiệm trong ống thử khí động.

C'_L - độ lệch hệ số lực thẳng đứng mặt cắt dầm chủ, tìm được qua thí nghiệm trong ống thử khí động.

H_1^* - đạo hàm dao động gập thẳng đứng của mặt cắt dầm chủ cần tìm qua thí nghiệm khí động.

Bảng 4.20

β	$\phi(\beta)$	β	$\phi(\beta)$
10	0,29	80	0,11
20	0,21	100	0,10
30	0,18	120	0,09
40	0,16	140	0,08
50	0,14	180	0,07
60	0,13	240	0,06
70	0,12	340	0,05

Lấy thí dụ dao động gập uốn đứng. Cầu nằm trong trường gió tự nhiên chịu tác dụng đồng thời của lực khí động tự kích thích $F_{ae}(x, t)$ và lực dao động gập do dòng động gây ra $F_b(x, t)$. Trong đó $F_{ae}(x, t)$ thường biểu thị dưới hình thức tần số, khi phân tích dao động gập thường bỏ qua ảnh hưởng đạo hàm H_2^* , H_3^* của dao động tròn thành ngẫu hợp, tức là:

$$F_{ae} = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left[KH_1^*(K) \frac{h}{U} \right] \quad (4.51a)$$

trong đó:

$$B - \text{chiều rộng mặt cầu} \quad K = \frac{B\omega}{U}$$

h - tốc độ dao động đứng của dầm chủ

$$F_b = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[2C_L \frac{u(x, t)}{U} + \left(C_L' + \frac{A}{B} C_D \right) \frac{\omega(x, t)}{U} \right] \quad (4.51b)$$

trong đó:

C_L, C_L', C_D - lần lượt là hệ số lực nâng, hệ số lực cản và hệ số lực nâng tại một vị trí góc tác dụng tính toán nào đó

$u(x, t), \omega(x, t)$ - thành phần đứng của gió động.

A - diện tích hình chiếu bằng trên một đơn vị dài dầm chủ trên mặt phẳng vuông góc với tốc độ gió U .

Phương trình chuyển động dao động gập bậc i của kết cấu, có thể viết:

$$\ddot{P}_i + 2\xi\omega\dot{P}_i + \omega^2 P_i = \frac{1}{M_i} \left[\int_0^L F_{ae}(x, t) \varphi_i(x) dx + \int_0^L F_b(x, t) \varphi_i(x) dx \right] \quad (4.51c)$$

trong đó: P_i - toạ độ bậc i kết cấu, mối quan hệ với toạ độ $h(x, t)$ như sau:

$$h(x, t) = \sum_{i=1}^h P_i(t) \varphi_i(x) \quad (4.51d)$$

$$\varphi_i(t) - \text{hàm dao động bậc } i: \quad M_i = \int_0^L m(x) \varphi_i^2(x) dx \quad (4.51e)$$

Căn cứ vào lý luận dao động tìm lời giải cho (4.51c) và căn cứ (4.51d) có thể tìm được chuyển vị phương sai căn tối đa của dao động gập bậc i của dầm chủ, tính theo công thức:

$$R_{hi} = \frac{\rho U B}{\omega_{hi}^2} |\varphi_i(x)|_{\max} \sqrt{\frac{\pi \omega_{hi}}{4 \xi_{hi}} |J_{hi}(\omega_{hi})|^2 S_L(\omega_{hi}) \gamma(\omega_{hi})} \quad (4.51f)$$

$$\text{trong đó: } \bar{\xi}_{hi} = \xi_{hi} - \frac{\rho B^2}{2m} H_1^* \quad (4.51g)$$

$$J_{hi}(\omega_{hi}) = \int_0^L \int_0^L \varphi_i(x_1) \varphi_i(x_2) e^{-\frac{\lambda \omega_{hi}}{2\pi U} |x_1 - x_2|} dx_1 dx_2 \quad (4.51h)$$

$$S_L(\omega_{hi}) = C_L^2 S_u(\omega_{hi}) + \frac{1}{4} \left(C_L' + \frac{A}{B} C_D \right)^2 S_w(\omega_{hi}) \quad (4.51i)$$

với: λ - hệ số tương quan không gian trường gió, thường lấy là 7.

$S_u(\omega)$, $S_w(\omega)$ - lần lượt là các hàm mật độ phổ công suất của $u(x, t)$, $w(x, t)$

$\gamma(\omega)$ - hàm khí động

Khi tính toán dao động gập, công thức (4.51f) quá phức tạp. Để đơn giản hoá, ta dùng phương pháp phổ phản ứng địa chấn (4.51f).

(1) Đầu tiên lấy tần số $K = \frac{\omega B}{U}$ làm biến số, thì R_{hi} có thể viết đơn giản:

$$R_{hi} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \rho B^2 |\varphi_i(x)|_{\max} \frac{1}{K_{hi}} \sqrt{\frac{1}{\xi_{hi}} |J_{hi}(K_{hi})|^2 \frac{S_L(K_{hi})}{\omega_{hi}}} \quad (4.51k)$$

$$\text{trong đó: } K_{hi} = \frac{B}{U} \omega_{hi}$$

$$\frac{S_L(K_{hi})}{\omega_{hi}} = \frac{1}{4} \left(C_L + \frac{A}{B} C_D \right)^2 \frac{S_w(K_h)}{\omega_h} [1 + \varepsilon_h \eta(K_{hi})] |\gamma(K_{hi})|^2 \quad (4.51l)$$

(2) Chú ý rằng, đối với mặt cắt cầu, phần lớn $C_L' \gg C_L$ nên $C_L' \gg \frac{A}{B} C_D$ thì trong

công thức trên $\varepsilon_h = \left(\frac{2C_L}{C_L' + \frac{A}{B} C_D} \right)^2$ rất nhỏ, thường nhỏ hơn 0,04. Bỏ qua $\varepsilon_h \eta(K_{hi})$ làm

cho công thức trên đơn giản hơn.

(3) Nếu đem hàm dao động uốn bậc 1 $\phi_i(x)$ biểu thị bằng hàm sin dương thì:

$$|J_{hi}(K_h)|^2 = \frac{4}{m^2 |\phi_i(x)|_{\max}^2} \times \frac{1}{P^2 + \beta^2} \left[\beta + \frac{2P^2}{P^2 + \beta^2} \right] \quad (4.51m)$$

trong đó: $\beta = \frac{\lambda L K_{hi}}{2\pi B}$

Đối với dao động đối xứng $P = \pi$, phản đối xứng $P = 2\pi$

Căn cứ trình bày trên, có thể đơn giản công thức (4.51k) thành công thức (4.50a) trong bản Hướng dẫn này.

(3) *Tính phổ phản ứng dao động gập uốn ngang*

Trị số lớn nhất phương sai căn dao động gập ngang một bậc nào đó của dầm chủ tính theo công thức:

$$R_p(K_p) = C_{wp} \times C_{Ap} \times C_{Sp} \times \psi(\beta) \times \mu(K) \times \Phi_u(f) \quad (4.52a)$$

trong đó:

$$C_{wp} = \frac{l}{\ln \frac{z}{z_0}} \quad (4.52b)$$

$$C_{Ap} = \frac{A}{B} C_D \quad (4.52c)$$

$$C_{Sp} = \frac{5,09^2 \sqrt{Z.B}}{\mu \sqrt{(1 - 0,637 \frac{P_1^*}{\mu \xi}) \xi}} \quad (4.52d)$$

$$\Phi_u(f) = \frac{1}{(1 + 50f)^{\frac{5}{6}}} \quad (4.52e)$$

$$P_1^* = -\frac{2}{K} C_D \quad (4.52f)$$

với: A là diện tích hình chiếu cạnh dầm chủ của một đơn vị dài (m^2)

(4) *Phương sai căn chuyển vị dao động gập của bất kỳ mặt cắt nào của dầm chủ*

Phương sai căn chuyển vị dao động gập uốn đứng bậc i tại vị trí x của bất kỳ mặt cắt dầm chủ theo phương trục cầu:

$$\sigma_i(x) = R_{hi} \phi_i(x) \quad (4.53a)$$

$$\phi_i(x) = \sin \frac{k\pi x}{L_C} \quad (4.53b)$$

trong đó:

$\Phi_i(x)$ - loại hình dao động bậc i tại x

R_{hi} - trị số phương sai căn lớn nhất của chuyển vị dao động gập loại dao động uốn đứng bậc i

k - hệ số đối với loại hình dao động đối xứng bậc 1 lấy là 1, còn loại dao động phản đối xứng bậc 1 lấy là 2.

4.7.2. Cộng hưởng xoáy khí (*Vortex-Shedding*)

4.7.2.1. Nguyên lý cộng hưởng xoáy khí

(1) Luồng gió bị tách ra khi thổi qua kết cấu tày, do đó hai bên kết cấu sinh ra những xoáy khí không đối xứng, làm xuất hiện áp lực dương, âm thay đổi nhau ở hai bên bề mặt kết cấu. Hợp lực của chúng biểu hiện là lực khí động (lực kích thích xoáy khí) theo chiều ngang gió tác dụng lên kết cấu, gây ra dao động ngang kết cấu gọi là dao động xoáy khí.

(2) Lực kích thích xoáy khí nói chung là lực phổ đơn giản, tần số của nó là tần số xoáy khí. Khi tần số này bằng với tần số vốn có của kết cấu thì xảy ra cộng hưởng. Khi khối lượng và sức cản của kết cấu đều nhỏ thì biên độ cộng hưởng có thể rất lớn.

(3) Khi kết cấu phát sinh cộng hưởng biên độ lớn, thì dao động của kết cấu sẽ tác dụng ngược lại với lực kích thích xoáy khí, làm cho trong một phạm vi tốc độ gió nào đó, tần số xoáy khí bị tần số tự dao động của kết cấu khống chế, hiện tượng này gọi là "khóa chặt".

Sự "khóa chặt" này làm tăng thêm tính tương quan của lực xoáy 3 chiều của kết cấu, sinh ra sức cản khí động làm giảm sức cản vốn có của kết cấu.

(4) Kết cấu cầu nếu thường xuyên phát sinh cộng hưởng xoáy khí sẽ bị phá hoại do mỏi, con người mỗi một xe chạy mất an toàn v.v... nên cần có biện pháp xử lý.

(5) Đối với cầu có dầm gia cường khung chịu lực, có thể không xét tới cộng hưởng của dầm chủ, nhưng cần kiểm tra các cấu kiện có thể phát sinh cộng hưởng xoáy khí.

4.7.2.2. Xét nguy cơ xảy ra cộng hưởng xoáy khí

(1) Tần số xoáy khí và số Strouhal

Tần số xoáy khí có liên quan tới hình dạng mặt cắt ngang đặc trưng kích thước của mặt cắt và tốc độ gió. Đối với một kết cấu nhất định các tham số không thứ nguyên của nó là một trị số cố định, tức là:

$$S_t = \frac{f_v D}{U} \quad (4.54)$$

trong đó: S_t - số Strouhal, tìm được qua thí nghiệm trong hầm gió. Trong bảng 4.21 có nêu ra trị số Strouhal của một số kết cấu điển hình.

f_v - tần số xoáy khí (Hz).

D - kích thước đặc trưng mặt cắt ngang kết cấu.

U - tốc độ gió (m/s).

(2) Dự tính tốc độ gió sinh cộng hưởng

Công thức tính tốc độ phát sinh cộng hưởng xoáy khí đứng của mặt cắt cầu

$$U_{cvh} = 2,0 f_h B \quad (4.55a)$$

trong đó:

U_{cvh} - tốc độ gió sinh cộng hưởng đứng (m/s)

f_h - tần số uốn đứng (Hz)

B - chiều rộng mặt cầu (m)

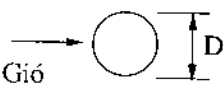
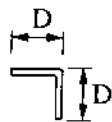
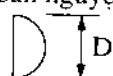
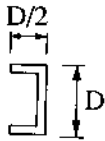
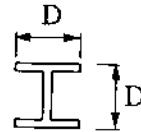
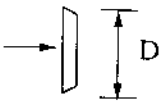
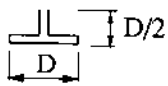
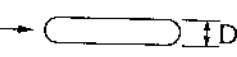
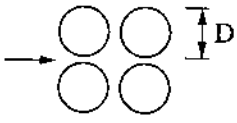
Tốc độ gió phát sinh cộng hưởng xoáy khí:

$$U_{cv0} = 1,33 f_l B \quad (4.55b)$$

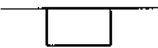
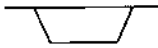
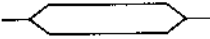
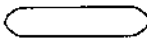
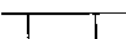
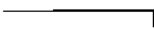
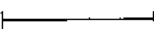
trong đó: U_{cv0} - tần số gió phát sinh cộng hưởng xoáy khí (m/s)

f_l - tần số dao động xoáy khí (Hz)

Bảng 4.21a: Số Strouhal của các mặt cắt điển hình

Hình dáng mặt cắt	S_t					Hình dáng mặt cắt	S_t
 Gió	R_e	<30	50	500	10^3	 Hình góc vuông	→ 0,13
	S_t	0	0,13	0,20	0,21		← 0,24
	R_e	10^4	10^5	10^6	10^7		↗ 0,13
	S_t	0,20	0,19	0,21	0,23		
Hình bán nguyệt						 Dầm chữ U	→ 0,14
Hình vuông							← 0,13
Hình bán mỏng	R_e	40	200	10^3		 Dầm chữ I	→ 0,14
	S_t	0,13	0,17	0,15			↑ 0,12
	R_e	10^4	10^5				
	S_t	0,14	0,13				
Hình tam giác cân						 Dầm chữ T	→ 0,14
					↑ 0,14		
Hình bản ép sau là hình tù							0,2 < S < 0,5
Ghi chú					Tốc độ gió lấy trị số lưu tốc ghi giữa ống		

Bảng 4.21b: Số Strouhal của mặt cắt cầu

	Hình dạng mặt cắt	S_t	T_h	$\frac{1}{T_h}$
1		0,12 ~ 0,14	0,102 ~ 0,256 (0,167)	6
2		0,11 ~ 0,19	0,033 ~ 0,226 (0,115)	8,9
3		—	0,101 ~ 0,153 (0,119)	8,4
4		—	0,070 ~ 0,103 (0,085)	11,2
5		—	0,055 ~ 0,138 (0,086)	11,6
6		0,05 ~ 0,13		
7		0,11	—	
8		0,17 ~ 0,19	0,045 ~ 0,200 (0,138)	7,25
9		0,16	—	
10		0,15	—	

(3) Dự tính biên độ cộng hưởng dao động xoáy khi

Biên độ cộng hưởng xoáy thẳng đứng của cầu kiểu bản bụng đặc có thể tính theo công thức:

$$h_c = \frac{E_h E_{th}}{2\pi m_r \xi_{\zeta_h}} B \quad (4.56a)$$

trong đó:

$$E_{th} = 1 - 15\beta_t \left(\frac{B}{D} \right)^{\frac{1}{2}} I_u^2 \geq 0 \quad (4.56b)$$

$$E_h = 0,065\beta_{ds} \left(\frac{B}{D} \right)^{-1} \quad (4.56c)$$

$$m_r = \frac{m}{\rho B^2} \quad (4.56d)$$

với:

m - khối lượng một đơn vị dài của cầu (kg/m); đối với cầu có mặt cắt thay đổi lấy trị số trung bình ở 1/4 khẩu độ; đối với cầu dây văng lấy 1/2 khối lượng dây văng; đối với cầu treo dây văng lấy toàn bộ khối lượng cáp chủ.

ρ - mật độ không khí (kg/m³)

ξ_h - tỷ số cản (giảm chấn) dao động uốn đứng

β_{ds} - hệ số hiệu chỉnh hình dạng:

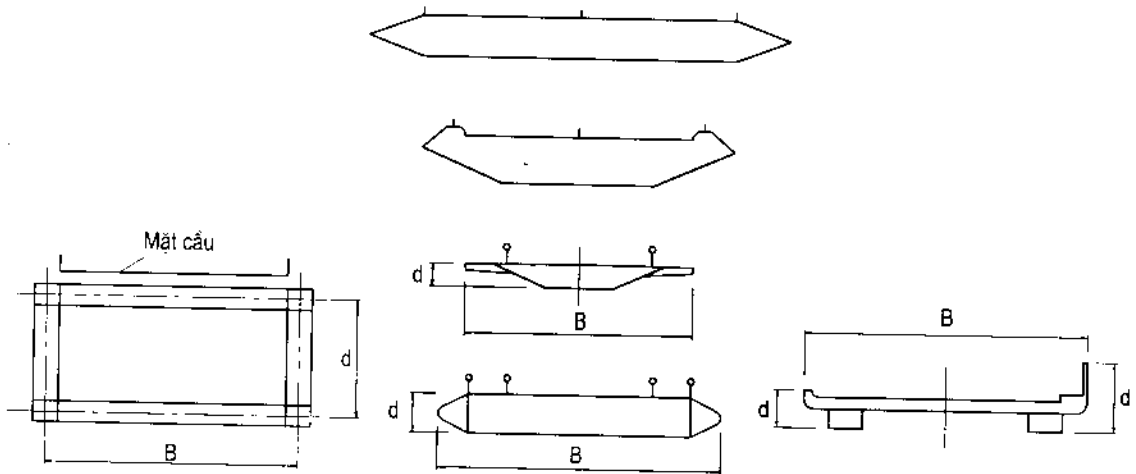
- đối với mặt cắt chữ nhật có chiều rộng nhỏ hơn 1/4 chiều cao hữu hiệu hoặc mặt cắt chữ nhật có bản bụng thẳng đứng thì hệ số lấy là 2;

- đối với mặt cắt hình 6 cạnh (hình 4.12) hoặc mặt cắt chữ nhật có chiều rộng lớn hơn 1/4 chiều cao hữu hiệu hoặc mặt cắt tày có bản bụng xiên thì hệ số lấy là 1.

D - chiều cao có hiệu của dầm chủ (m) (hình 4.12)

β_1 - hệ số hình dạng, đối với hình 6 cạnh lấy là 0, các mặt cắt khác lấy là 1.

I_u - cường độ dòng rối



Hình 4.12. Chiều cao hữu hiệu dầm chủ

(4) Tính biên độ cộng hưởng xoắn

Biên độ cộng hưởng xoắn của cầu kiểu bản bụng đặc có thể tính theo công thức:

$$\theta_c = \frac{E_0 E_{t\theta}}{2\pi I_{pr} \xi_{\theta}} \quad (4.57a)$$

trong đó:

$$E_0 = 17,16\beta_{ds} \left(\frac{B}{D} \right)^{-3} \quad (4.57b)$$

$$E_{i0} = 1 - 20\beta_{ds} \left(\frac{B}{D} \right)^{\frac{1}{2}} I_{\mu}^2 \geq 0 \quad (4.57c)$$

$$I_{pr} = \frac{I_p}{\rho B^4} \quad (4.57d)$$

với:

I_p - mô men quán tính khối lượng trên một đơn vị dài cầu ($\text{kg.m}^2/\text{m}$).

- đối với cầu có mặt cắt thay đổi thì lấy trị số trung bình ở 1/4 khẩu độ;
- đối với cầu dây văng lấy 1/2 khối lượng cáp xiên;
- đối với cầu treo dây võng lấy toàn bộ khối lượng cáp chủ.

ξ_i - hệ số giảm chấn loại hình dao động xoắn.

(5) Trị số cho phép của biên độ cộng hưởng xoáy khí

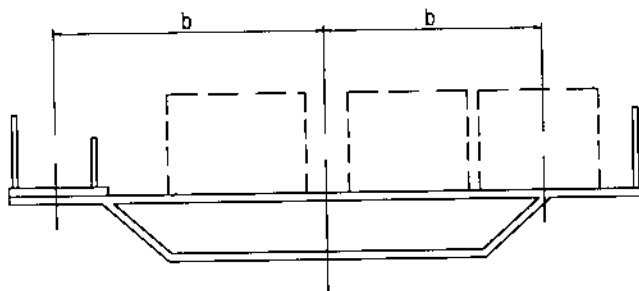
Biên độ dao động đứng xoáy phải thoả mãn yêu cầu sau:

$$h_c < [h_a] = 0,04/f_h \quad (4.58a)$$

Đối với dao động xoắn xoáy thì biên độ của nó phải thoả mãn yêu cầu:

$$\theta_c = [\theta_a] = \frac{2,28}{bf_t} \quad (4.58b)$$

b - nửa chiều rộng cầu, định nghĩa như hình 4.13.



Hình 4.13

4.7.3. Dao động của dây văng

4.7.3.1. Cộng hưởng xoáy khí của dây văng

Dao động của dây văng do gió có biên độ nhỏ gây nên có thể giải thích theo cơ chế cộng hưởng xoáy khí. Số Strouhal của mặt cắt tròn dây cáp bằng 0,2 tần số xoáy khí của

nó biến đổi tuyến tính theo tốc độ gió. Khi tần số xoáy khí và tần số dao động ngang một bậc nào đó của dây văng bằng nhau thì phát sinh cộng hưởng xoáy khí, tốc độ gió lúc này là tốc độ gió tới hạn. Do tần số dao động của dây văng phản tác dụng lại dao động xoáy khí, trong một phạm vi tốc độ gió nhất định gần với tốc độ gió tới hạn thì tần số xoáy khí bị tần số dây văng "giữ lại", làm cho phạm vi tốc độ gió gây cộng hưởng xoáy khí rộng thêm. Cộng hưởng xoáy khí quan sát được phần lớn là loại hình dao động bậc 4 hoặc bậc 5.

Do các trị số của lực kéo, đường kính, chiều dài của mỗi sợi cáp không giống nhau nên tần số dao động của chúng cũng khác nhau.

4.7.3.2. Dao động dây cáp văng do mưa và gió kết hợp (dao động khu vực đuôi)

Khi mưa, dòng nước mưa chảy theo dây văng của cầu dây văng, làm thay đổi hình dạng ban đầu của mặt cắt, từ hình tròn thành hình tam giác giống như cáp điện bị đóng băng. Với tốc độ gió tới hạn nhất định, dây cáp sẽ xuất hiện dao động.

Trong cầu dây văng có cáp xếp thành dãy, cáp sau nằm vào khu vực đuôi dãy trước, nếu lại nằm chính vào khu vực dao động không ổn định, thì dãy cáp sau (phía khuất gió) phát sinh dao động lớn hơn dãy trước (phía hứng gió). Đó là loại dao động khu vực đuôi.

4.7.3.3. Cộng hưởng tham số của dây văng

Khi dầm chủ của cầu dây văng chịu các loại kích thích bên ngoài, mặt cầu phát sinh dao động với tần số uốn chính sẽ làm cho dây cáp nối đoạn sau với mặt cầu cũng dao động dọc với cùng tần số. Khi tần số dao động mặt cầu và tần số dao động ngang của cáp thỏa mãn điều kiện là bội số của nhau thì sinh ra cộng hưởng tham số của cáp kéo. Đối với dây văng dài, dao động nhỏ của mặt cầu sẽ gây ra dao động ngang có biên độ lớn của cáp kéo.

4.7.3.4. Biện pháp đơn giản để hạn chế dao động dây văng là dùng giảm chấn vòng đệm cao su. Khi cần, có thể lắp bộ phận giảm chấn giống như giảm xóc của ô tô hoặc lắp thêm các cáp giảm chấn để hạn chế biên độ dao động của cáp chủ.

4.8. THÍ NGHIỆM KHÍ ĐỘNG

4.8.1. Quy định chung

4.8.1.1. Do mặt cắt cầu có hình dạng phức tạp, đa dạng, nếu chỉ đơn thuần dùng phương pháp phân tích lý thuyết thì rất khó tính toán đầy đủ lực khí động và dao động của gió tác dụng lên cầu. Do đó việc dùng thí nghiệm khí động trong hầm gió là biện pháp có hiệu quả trong việc thiết kế chống gió cho cầu.

4.8.1.2. Đối với cầu cần thiết kế chống gió mà không dùng được phương pháp phân tích tường tự và không dùng được kết quả thí nghiệm khí động tương tự đã có thì cần phải tiến hành thí nghiệm mô hình trong Hầm gió.

Do tính phức tạp, đa dạng của các hình dạng mặt cắt cầu và sự nhạy cảm của các đặc tính lực khí động đối với các hình dạng mặt cắt khác nhau, nên cẩn thận trong khi sử dụng kết quả của thí nghiệm khí động tương tự.

4.8.1.3. Căn cứ theo mục đích thí nghiệm mà chọn phương pháp thí nghiệm và loại mô hình cầu tương ứng. Bảng 4.22 dưới đây nêu lên các loại mô hình thí nghiệm thử khí động, phương thức đỡ, các hạng mục đo chủ yếu cùng các ưu khuyết điểm của chúng.

Bảng 4.22: Các loại mô hình thí nghiệm hầm gió đối với cầu và các hạng mục đo kiểm tra

Loại mô hình	Phương thức gối đỡ	Hạng mục đo kiểm chủ yếu	Ưu khuyết điểm
Mô hình phân đoạn cứng (dầm chủ, tháp cầu)	Gối đỡ tĩnh (gối một đầu hoặc 2 đầu)	1. Đo xác định 3 phản lực 2. Đo xác định áp lực thường xuyên 3. Đo xác định số Strouhal	1. Tỷ lệ thu nhỏ lớn, dễ làm mô hình 2. Mô phỏng chi tiết dễ dàng 3. Chi phí thấp 4. Chỉ cần dùng đến hầm gió loại nhỏ.
	Gối treo hàng (tròng tranh) lò xo (gối kê trong hầm hoặc gối kê ngoài hầm)	1. Đo kiểm hiệu ứng đàn hồi khí động (dao động riêng, dao động cưỡng bức) 2. Xác định lực khí động không thường xuyên (tham số dao hàm <i>Flutter</i> , khí động quy nạp) 3. Đo xác định áp lực không thường xuyên	1. Tỷ lệ thu nhỏ lớn, dễ làm mô hình 2. Mô phỏng chi tiết dễ dàng 3. Dễ mô phỏng cản (giảm chấn) 4. Chi phí thấp 5. Chỉ có thể mô phỏng được 3 dạng dao động trở xuống 6. Chỉ cần dùng đến Hầm gió loại nhỏ
Mô hình tổng thể kết cấu cứng (toàn cầu, tháp cầu)	Gối lực tĩnh	1. Đo xác định hợp lực của 3 phản lực 2. Xác định sự phân bố áp lực thường xuyên	1. Tỷ lệ thu nhỏ nhỏ, mô phỏng chi tiết khó khăn 2. Thích hợp với các kết cấu có mặt cắt thay đổi 3. Cần dùng đến hầm gió cỡ vừa và cỡ lớn
Mô hình cáp kéo		1. Đo xác định hiệu ứng đàn hồi khí động (dao động riêng, dao động cưỡng bức)	1. Tỷ lệ thu nhỏ nhỏ, mô phỏng chi tiết khó khăn 2. Dễ làm mô hình 3. Có thể mô phỏng dao động không gian 3 chiều của dầm chủ 4. Khó mô phỏng được dao động bậc cao 5. Chi phí vừa phải 6. Cần dùng đến Hầm gió cỡ vừa trở lên
Mô hình tổng thể đàn hồi khí động (trạng thái cầu đã hoàn hành, trạng thái lao lắc cầu, trạng thái thấp cầu độc lập)		1. Đo kiểm hiệu ứng tĩnh đàn hồi khí động (dao động riêng, dao động cưỡng bức)	1. Mô phỏng chân thực nhất cấu trúc thực tế 2. Tỷ lệ thu nhỏ nhỏ, làm mô hình khó khăn 3. Chi phí cao 4. Cần dùng đến Hầm gió cỡ lớn

4.8.1.4. Thí nghiệm mô hình cầu trong Hầm gió cần làm mô phỏng trường gió thiên nhiên. Thí nghiệm trong Hầm gió với luồng gió đều, thường có kết quả các đặc tính ổn định động lực thiên về an toàn.

4.8.2. Quy tắc xét tính tương tự của mô hình và kết cấu thực

4.8.2.1. Các tham số tương tự

Trong thí nghiệm khí động ngoài việc hình dạng hình học của mặt cắt mô hình và cấu trúc tương tự còn phải thoả mãn các điều kiện tương đương của các tham số nêu ở bảng 4.23.

Bảng 4.23: Tham số tương tự trong thí nghiệm mô hình Hầm gió

Tham số tương tự trong dòng khí gió giật		Các tham số không thứ nguyên	Tên	Ý nghĩa vật lý
	Tham số tương tự trong dòng đồng gió đều	$\frac{m}{\rho b^2}, \frac{I}{\rho b^4}$	Tham số quán tính	Lực quán tính khối kết cấu/Lực quán tính thể lỏng
		$\frac{EF}{\rho U^2 b^2}, \frac{EI}{\rho U^2 b^4}$	Tham số đàn hồi	Lực đàn hồi vật kết cấu /Lực quán tính thể chảy
		$\frac{GJd}{\rho U^2 b^4}, \frac{EJ\omega}{\rho U^2 b^6}$		
		ξ	Tham số giảm chấn (Tỷ số cản khối kết cấu)	Năng lượng tiêu hao một chu kỳ dao động/Tổng năng lượng dao động
		$\frac{\rho Ub}{\mu}$	Tham số độ nhớt (số Nêrô)	Lực quán tính thể lỏng /Lực nhớt chất lỏng
		$\frac{bg}{U^2}$	Tham số trọng lực (số Fulaơơ)	Trọng lượng khối kết cấu /Lực quán tính thể lỏng.
		$\frac{Z_cg}{b}, \frac{Z_cS}{b}$	Tham số hình học	Tỷ số kích thước hình học của trọng tâm khối kết cấu và trung tâm xoắn vặn
	Khi cần thí nghiệm trong dòng rối, ngoài các tham số trên, còn phải tìm các tham số tương tự sau đây			
	Tham số tương tự trong luồng rối	$\frac{U_z}{U_G}$	Bậc thang tốc độ gió	Sự biến đổi tốc độ gió của mặt cắt thẳng đứng tốc độ gió
		$\frac{\sigma_u}{U_z}, \frac{\sigma_v}{U_z}, \frac{\sigma_w}{U_z}$	Cường độ dòng rối	Tổng năng lượng của các thành phần tốc độ gió giật
		$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2}, \frac{nS_v(n)}{\sigma_v^2}, \frac{nS_w(n)}{\sigma_w^2}$	Phổ công suất của quy nạp đồng nhất	Phân bố tần số của năng lượng dòng rối
		$\frac{fL}{U}$	Số Strouhal hoặc tần số tính đổi	Thước đo thời gian
	Tham số tương tự giữa vật kết cấu và dòng khí dạng giật	$\frac{L}{D}$	Tỷ số kích thước	Tỷ số chiều dài giữa lớp biên giới dòng rối và khối kết cấu (hoặc thước tỷ lệ)
		$\frac{f}{f_s}$	Tỷ lệ của tần số	Tỷ lệ của tần số (hoặc tỷ lệ thời gian) giữa lớp biên giới dòng rối với khối kết cấu

4.8.2.2. Sự mở rộng các điều kiện tương tự

(1) Trong thí nghiệm khí động, mô hình khí đàn hồi của toàn kích thước cầu treo và cầu dây văng có xét tới trạng thái làm việc của cáp kéo, cần thoả mãn điều kiện như nhau của các tham số trọng lực; còn các trường hợp khác, tùy tình hình có thể mở rộng điều kiện hoặc bỏ qua.

(2) Đối với đại đa số các kết cấu cầu có mặt cắt góc cạnh thì có thể bỏ qua các điều kiện như nhau của các tham số dính. Nhưng đối với các kết cấu, cấu kiện có mặt cắt hình tròn hoặc hình "khí động lực" như dây cáp thanh treo, lan can mặt cầu, trụ mố v.v... thì cần xét tới ảnh hưởng của tham số dính.

(3) Khi một số bộ phận hoặc cấu kiện của kết cấu có thể bỏ qua một số dạng dao động nào đó đối với kết cấu thì cũng có thể mở rộng các điều kiện như nhau của các Tham số đàn hồi và Tham số quán tính tương ứng.

(4) Thoả mãn một cách chặt chẽ điều kiện như nhau của các Tham số cần thường rất khó khi thiết kế mô hình. Cần qua việc chọn vật liệu làm mô hình, cách lắp ráp để cố gắng sao cho Tham số của nó không lớn hơn trị số thiết kế.

4.8.2.3. Tỷ suất thu gọn các tham số mô hình trong thí nghiệm khí động

Bảng 4.24: Tỷ lệ thước thu nhỏ tham số mô hình

Tên thông số	Công thức biểu đạt	Tỷ lệ thước thu nhỏ	
		Thí nghiệm mô hình toàn cầu cầu treo Thí nghiệm mô hình toàn cầu dây văng*	Thí nghiệm mô hình toàn cầu về dầm cầu Thí nghiệm mô hình phân đoạn trơn trành (treo hăng bằng lò xo) Thí nghiệm mô hình dây co Thí nghiệm mô hình tháp cầu
1	2	3	4
Chiều dài	$C_l = \frac{l_m}{L_p}$	$\frac{1}{n}$	$\frac{1}{n}$
Thời gian	$C_t = \frac{t_m}{t_p}$	$\frac{1}{\sqrt{n}}$	$\frac{m}{n}$ ***
Tốc độ gió	$C_U = \frac{U_m}{U_p}$	$\frac{1}{\sqrt{n}}$	$\frac{1}{m}$
Tần suất	$C_f = \frac{f_m}{f_p}$	$\sqrt{n}$	$\frac{n}{m}$
Mật độ	$C_p = \frac{\rho_m}{\rho_p}$	1	1
Khối lượng đơn vị chiều dài	$C_M = \frac{M_m}{M_p}$	$\frac{1}{n^2}$	$\frac{1}{n^2}$

1	2	3	4
Mô men quán tính khối lượng đơn vị chiều dài**	$C_I = \frac{I_m}{I_p}$	$\frac{1}{n^4}$	$\frac{1}{n^4}$
Lực căng	$C_H = \frac{H_m}{H_p}$	$\frac{1}{n^2}$	$\frac{1}{n^2}$
Độ cứng kéo dãn	$C_{EF} = \frac{(EF)_m}{(EF)_p}$	$\frac{1}{n^3}$	$\frac{1}{m^2 n^2}$
Độ cứng uốn cong	$C_{EI} = \frac{(EJ)_m}{(EJ)_p}$	$\frac{1}{n^5}$	$\frac{1}{m^2 n^4}$
Độ cứng xoắn vặn tự do	$C_{GJd} = \frac{(GJ_d)_m}{(GJ_d)_p}$	$\frac{1}{n^5}$	$\frac{1}{m^2 n^4}$
Độ cứng xoắn vặn ràng buộc	$C_{EJm} = \frac{(EJ_\infty)_m}{(EJ_\infty)_p}$	$\frac{1}{n^7}$	$\frac{1}{m^2 n^6}$
Cân kết cấu (tỷ số suy giảm logarit)	$C_\delta = \frac{\delta_{sm}}{\delta_{sp}}$	1	1

Ghi chú:

(*) Khi không xét tới ảnh hưởng đặc tính dao động của dây kéo thì lấy cột bên phải.

(**) Khi thí nghiệm mô hình cầu treo dây võng, mô hình phân đoạn treo lò xo cầu dây văng, thí nghiệm mô hình thanh kéo, cần dùng khối lượng đồng đều, mô men quán tính khối lượng đồng đều.

(***) Trị số m có thể chọn tùy ý (trong phạm vi có thể, phù hợp với điều kiện hầm gió).

4.8.3. Các loại thí nghiệm khí động

4.8.3.1. Thí nghiệm 3 phân lực tĩnh

(1) *Mục đích thí nghiệm:* Xác định lực cản, lực nâng, mô men xoắn của mặt cắt kết cấu cầu (dầm chủ, trụ cầu v.v...) và sự biến đổi chúng theo góc tác dụng của gió dưới tác dụng của lực khí động và lực tĩnh được biểu thị bằng hệ số của phân lực.

(2) *Mô hình:* Dùng mô hình cứng, hình dạng hình học (kể cả các bộ phận phụ) yêu cầu phải giống như cầu thực. Kích thước rút gọn của mô hình không nhỏ hơn 1/100. Hai đầu mô hình cần đặt tám chân hoặc khuôn bù đủ dài có khe hở 1 mm. Tỷ lệ giữa chiều dài và chiều rộng của mô hình không nhỏ hơn 2.

(3) *Phương pháp đỡ:* Dùng kẹp đỡ lắp lên bộ đo (cân ứng biến hoặc cân cơ học), có thể dùng đỡ cánh treo một đầu hoặc đỡ đơn. Bộ phận đỡ cần có cơ cấu có thể thay đổi được góc tác dụng.

(4) *Phương pháp đo*: Phạm vi góc tác dụng trong thí nghiệm không nhỏ hơn 100. Góc tác dụng thay đổi mỗi lần 10.

Việc thí nghiệm nói chung tiến hành trong trường dòng khí đều. Việc thí nghiệm tiến hành với 2 loại tốc độ gió lớn hơn 10 m/s, và ít nhất gấp đôi nhau trở lên, với mỗi trạng thái góc tác dụng để ảnh hưởng của Tham số dính.

Kết quả thí nghiệm cần được thể hiện bằng đường cong hệ số 3 phân lực lần lượt trên hệ trục tọa độ của vật thể và hệ trục tọa độ của gió.

4.8.3.2. Thí nghiệm mô hình phân đoạn treo lò xo

(1) *Mục đích thí nghiệm*: Do các đặc tính khí động lực không bình thường của dầm chủ nên tính ổn định và dao động (dao động tròn tròn và dao động xoáy khí) dưới tác dụng khí động lực là bất bình thường.

(2) *Chuẩn tắc tương tự*: Giữa mô hình và cầu thực cần bảo đảm hình dạng hình học tương tự và điều kiện như nhau của các tham số sau:

$$\frac{I}{\rho b^4}, \frac{m}{\rho b^2}, \frac{U}{f_b b}, \frac{U}{f_l b}, \xi_b, \xi_t$$

Đối với cầu treo dây văng thì m, I cần có khối lượng như nhau (đẳng hiệu) và mômen quán tính khối lượng như nhau (xem 4.6.1.2(3)).

(3) *Mô hình*: Mô hình dầm chủ là mô hình cứng có tám đầu. Kích thước rút gọn mô hình không nhỏ hơn 1/100. Tỷ số dài/rộng của mô hình không nhỏ hơn 2.

(4) *Phương pháp giá đỡ*: Dùng lò xo và giá đỡ đem mô hình dầm chủ treo vào Hầm gió để nó có thể chuyển động thẳng đứng và chuyển động 2 độ tự do quanh trục trọng tâm. Bộ phận giá đỡ cần có cơ cấu thay đổi được góc tác dụng và ràng buộc bất kỳ độ tự do nào. Tùy theo yêu cầu, bộ phận giá đỡ còn có thể lắp thêm bộ phận giảm chấn.

(5) *Phương pháp đo*: Phạm vi góc tác dụng của thí nghiệm là $\pm 3^\circ$, trường hợp đặc biệt (như dầm chủ có góc siêu cao) có thể lấy $\pm 5^\circ$, góc tác dụng biến đổi 1° . Căn cứ vào mục đích đo, thí nghiệm lần lượt tiến hành với gió trung bình và gió luồng rối.

Tốc độ gió thí nghiệm tối thiểu cần đạt tốc độ gió kiểm tra dao động tròn tròn của cầu thực hoặc để dầm chủ sinh ra biên độ dao động xoắn $1^\circ \div 5^\circ$, biên độ dao động đứng bằng $1/100 \div 1/20$ chiều rộng dầm. Kết quả thí nghiệm biểu thị thành đồ thị quan hệ sự cản khí động. Tốc độ gió tính đối; ảnh hưởng dao động - tốc độ gió v.v... lấy góc tác dụng làm tham số.

4.8.3.3. Thí nghiệm mô hình thanh kéo

(1) *Mục đích thí nghiệm*: Chủ yếu là để bổ sung cho thí nghiệm mô hình phân đoạn, nhằm xác định cộng hưởng xoáy khí, dao động gập và dao động tròn tròn của dầm chủ dưới tác dụng gió đều và luồng gió.

(2) *Chuẩn tắc xét tính tương tự:* Giống 4.8.3.2(2). Riêng tương tự của luồng gió xem Tham số tương tự ở bảng 4.23.

(3) *Mô hình và phương pháp giá đỡ:* Dem mô hình cứng dầm chủ có chiều dài bằng chiều dài khẩu độ chính phân thành một số đoạn, dùng 2 sợi dây cung song song hoặc 2 thanh cứng, xâu lại, căng ra và cố định lên bộ phận neo chặt 2 đầu, nhờ dây cung và sức căng của nó tạo ra độ cứng uốn đúng của mô hình. Cự ly ngang giữa dây cung cầu nhỏ hơn chiều rộng dầm mô hình phân đoạn, khi cần nhờ bản thân mô hình dầm chủ có độ chống uốn nhất định để đảm bảo điều kiện này. Kích thước rút gọn của mô hình thanh kéo không nhỏ hơn 1/300.

(4) *Phương pháp đo:* Góc tác dụng của gió lấy là 0° .

Phạm vi tốc độ gió thí nghiệm tối thiểu phải bằng tốc độ gió kiểm tra dao động tròn tránh khi chuyển đổi thành cầu thực hoặc để dầm chủ sinh ra biên độ dao động xoắn $1^\circ \div 5^\circ$, biên độ dao động đúng bằng $1/100 \div 1/20$ chiều rộng dầm.

Kết quả thí nghiệm biểu thị thành đường cong tốc độ gió - biên độ dao động (trị số lớn nhất hoặc phương sai căn) tại điểm đo và công suất dao động tại điểm đo.

4.8.3.4. Thí nghiệm mô hình đàn hồi khí động của toàn cầu

(1) *Mục đích thí nghiệm:* Kiểm tra tính ổn định khí động của cầu, đo ảnh hưởng dao động gió gây ra.

(2) *Chuẩn tắc xét tính tương tự:* Giống bảng 4.23, 4.24. Các nguyên tắc nói rộng của điều kiện tương tự xem 4.8.2.2.

(3) *Mô hình:* Các mô hình bộ phận của dầm chủ, mố trụ được lắp ráp bằng các vật liệu cứng có độ cứng tương tự của cầu, mô phỏng các hình dạng của chúng và có khối lượng riêng và phân bố khối lượng tương tự. Cần tránh để các phần ngoài mô hình phát sinh độ cứng phụ và chú ý thỏa mãn điều kiện tương tự về độ cản. Mô hình đàn hồi toàn bộ được lắp ráp xong, cần thông qua việc kiểm nghiệm đặc tính động lực để xác định độ chính xác của chúng. Kích thước rút gọn đối với dầm gia cường không nhỏ hơn 1/100, dầm hộp không nhỏ hơn 1/200.

(4) *Phương pháp đo:* Việc thí nghiệm được tiến hành trong trường gió mô phỏng như đặc tính gió tự nhiên. Nhưng việc kiểm tra đặc tính ổn định khí động có thể tiến hành thiên về an toàn trong luồng gió tương đối thấp hoặc trong trường luồng gió tương đối đều.

Góc tác dụng của gió trong thí nghiệm lấy là 0° . Căn cứ tình hình địa hình ở vị trí cầu mà xét có cần mô phỏng địa hình hoặc xét ảnh hưởng của góc tác dụng gió âm, dương hay không. Phạm vi xét của góc tác dụng gió nói chung $-3^\circ \div +3^\circ$. Gió thí nghiệm, ngoài

gió ngang vuông góc với trục cầu, lúc cần còn xét tới ảnh hưởng của góc lệch so với phương nằm ngang của hướng gió.

Phạm vi tốc độ gió thí nghiệm không nhỏ hơn tốc độ gió kiểm tra dao động tròn thành của cầu hoặc làm cho dầm chủ phát sinh biên độ dao động xoắn $1^\circ \div 5^\circ$, biên độ uốn bằng $1/100 \div 1/20$ chiều rộng dầm chủ.

Kết quả thí nghiệm được biểu thị bằng đường cong tốc độ gió - biên độ dao động (trị số lớn nhất hoặc phương sai căn) của điểm đo và biểu thị bằng phổ công suất dao động của điểm đo.

4.8.3.5. Thí nghiệm mô hình trụ cầu

(1) *Mục đích thí nghiệm:* Kiểm tra ổn định khí động của trụ cầu và dao động do gió gây ra.

(2) *Chuẩn tắc xét tính tương tự:* Ngoài việc các kích thước hình học tương tự, còn phải thỏa mãn:

- Đối với mô hình cứng giá đỡ đàn hồi: $\frac{I_T}{\rho D^5}, \frac{U}{fD}, \xi_s$

- Đối với mô hình đàn hồi khí động toàn trụ: $\frac{\rho_s}{\rho}, \frac{EJ}{\rho U^2 D^4}, \xi_s$

với:

I_T - mô men quán tính khối lượng của mô hình cứng quanh điểm đỡ

D - kích thước đặc trưng mặt cắt trụ cầu

(3) *Mô hình và phương pháp giá đỡ:* Mô hình cứng giá đỡ đàn hồi cũng giống như mô hình cứng phân đoạn của dầm chủ, giá đỡ đàn hồi cần đảm bảo tần số dao động của mô hình tương tự tần số uốn bậc thấp nhất của trụ ở trạng thái độc lập.

Việc mô phỏng mô hình đàn hồi khí động giống như phương pháp mô phỏng trụ cầu ở mục 4.8.3.4(3) Kích thước rút gọn của mô hình trụ cầu không nên nhỏ hơn $1/250$.

(4) *Phương pháp đo:* Việc thí nghiệm được tiến hành cùng trong trường gió tương tự đặc tính gió tự nhiên (luồng cắt đặc tính luồng).

Về nguyên tắc, phạm vi góc gió nằm ngang trong thí nghiệm không nhỏ hơn góc kẹp 90° giữa trụ ngang của cầu và trục dọc cầu của mặt cắt trụ. Góc tác dụng của gió nói chung có thể lấy thay đổi 10° , ở vùng phụ cận góc gió tác dụng lớn nhất có thể lấy nhỏ hơn.

Phạm vi tốc độ gió thí nghiệm không nhỏ hơn tốc độ gió thiết kế ở trạng thái bắc cầu hoặc làm trụ sinh ra biên độ dao động xoắn 5° , biên độ dao động uốn bằng $1/50$ chiều cao trụ.

Mô hình cứng giá đỡ đàn hồi thích hợp với việc thí nghiệm dao động xoay khí; mô hình đàn hồi khí động thích hợp với việc kiểm tra toàn diện tích ổn định và ảnh hưởng dao động do gió gây ra.

Kết quả thí nghiệm được biểu thị bằng đường cong tốc độ gió - biên độ dao động (trị số lớn nhất hoặc phương sai căn).

4.9. KHỐNG CHẾ DAO ĐỘNG DO GIÓ GÂY RA ĐỐI VỚI CẦU DÂY

Nói chung, đối với cầu treo khẩu độ lớn, dầm chủ có thể chọn mặt cắt hơi dẹt, thậm chí mặt cắt có rãnh giữa để nâng cao tính ổn định khí động. Về kết cấu, dùng dầm hộp kín và tháp cầu chữ "A" có thể nâng cao độ cứng chống uốn của cầu. Khi cần, có thể đặt thêm các tấm bản ổn định phụ hoặc bộ giảm chấn để nâng cao tính ổn định chống gió và giảm ảnh hưởng dao động.

4.9.1. Quy định chung

4.9.1.1. Có thể dùng các biện pháp khí động hoặc các biện pháp cơ học để khống chế các dao động do gió gây ra vượt quá giới hạn.

4.9.1.2. Biện pháp khí động là biện pháp dùng bộ phận phụ trợ phía ngoài hoặc sửa đổi đôi chút hình dạng của dầm chủ, trụ, thanh treo và dây kéo để thay đổi sự lưu động của dòng khí quanh các kết cấu cầu đó, nhờ đó nâng cao năng lực chống gió. Biện pháp khí động chủ yếu dùng nâng cao tính ổn định khí động của cầu (dao động tròn trành, dao động ...) và hạ thấp dao động xoay khí.

4.9.1.3. Biện pháp cơ học là biện pháp tăng thêm độ cứng kết cấu, giảm chấn hoặc bố trí thêm vật nặng có khối lượng nhất định để giảm ảnh hưởng dao động gió. Biện pháp giảm chấn bao gồm 2 loại: khống chế bị động và khống chế chủ động. Bộ giảm chấn kiểu khống chế bị động không dùng nguồn năng lượng bên ngoài, còn Bộ giảm chấn kiểu khống chế chủ động cần có nguồn năng lượng bên ngoài.

4.9.2. Biện pháp khí động

4.9.2.1. Dầm chủ

(1) Ngoài việc thỏa mãn yêu cầu về kết cấu và công năng ra, hình dạng mặt cắt chủ yếu của dầm chủ cầu treo khẩu độ lớn phải hết sức cố gắng chọn hình dạng tương đối tốt về tính ổn định khí động.

(2) Trường hợp mặt cắt cơ bản của dầm chủ không thỏa mãn yêu cầu về tính ổn định khí động hoặc xuất hiện biên độ dao động xoay khí không chấp nhận được thì có thể dùng bộ phận phụ cải thiện tính năng động lực học không khí, nhằm nâng cao tính ổn định khí động hoặc giảm bớt biên độ dao động xoay khí.

(3) Khi chọn trang bị khí động, cần dùng thí nghiệm khí động kiểm tra trang bị đã chọn về tính ổn định khí động, ảnh hưởng của dao động xoáy khí, phân tích lợi hại đối với dao động gập.

4.9.2.2. Trụ cầu

Góc vát mặt cắt hoặc bộ phận dẫn dòng có thể cải thiện tính ổn định dao động của trụ cầu và ức chế được dao động xoáy khí.

Trên cơ sở không tăng tính phức tạp của kết cấu, hình dạng của trụ cầu cần tận dụng hình dạng có góc cắt.

4.9.2.3. Khi chọn và bố trí trang bị khí động, cần xét tới ảnh hưởng đối với mỹ quan của cầu.

Các thiết bị khí động có thể đặt liên tiếp dọc theo khẩu độ cầu hoặc theo chiều cao trụ, cũng có thể bố trí dẫn cách tùy theo hiệu quả giảm dao động.

4.9.2.4. Biện pháp giảm dao động cho dây văng

Biện pháp khí động. Gia công thêm vào cáp có bề mặt nhẵn một lớp bọc có vân hình lõm, hình chữ V hoặc vân xoắn ốc để tăng thêm độ gồ ghề bề mặt cáp, nhằm phá sự hình thành xoáy khí có tính chu kỳ, để phòng phát sinh cộng hưởng xoáy khí. Đồng thời nhờ có vân xoắn có thể ngăn chặn được hoặc phá hoại được sự hình thành sợi nước lúc mưa nhằm đề phòng sự phát sinh dao động do mưa.

4.9.3. Các biện pháp cơ học

4.9.3.1. Dầm chủ

(1) Khi khối lượng và độ cứng của kết cấu không thể thay đổi, nhưng mặt cắt cơ bản của cầu đáp ứng được yêu cầu tính ổn định khí động thì có thể dùng phương pháp cơ học để hạn chế dao động có biên độ hạn chế (dao động xoáy khí và dao động gập) do tác động của gió.

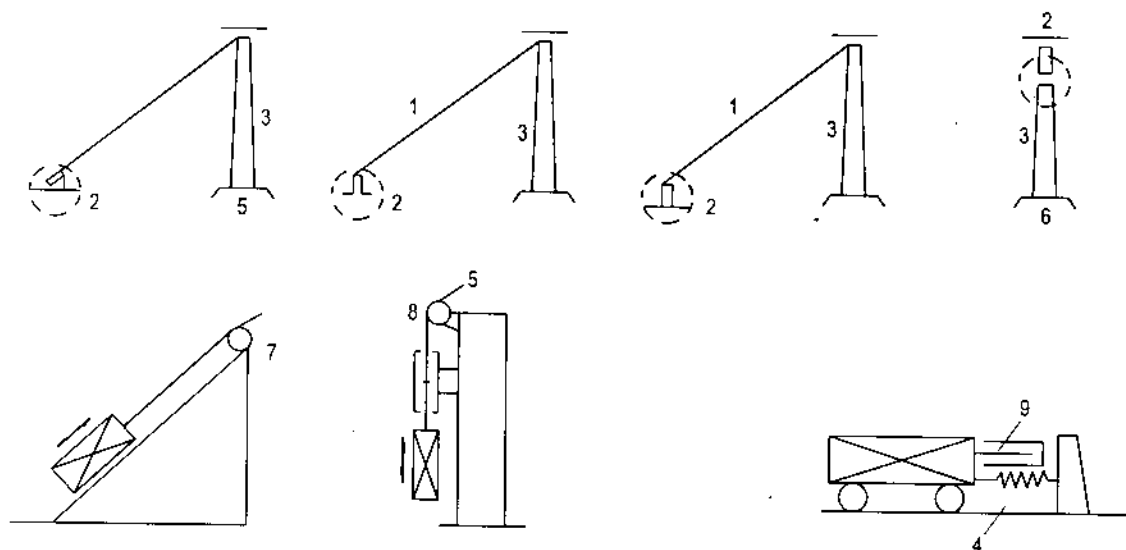
(2) Có thể dùng bộ giảm chấn kiểu điều chỉnh khối lượng (TMD) để khống chế dao động đứng xoáy khí và dao động xoắn của dầm chủ.

(3) Có thể dùng bộ giảm chấn kiểu điều chỉnh khối lượng (TMD) để khống chế dao động gập thẳng đứng và dao động gập xoắn của dầm chủ.

(4) Có thể dùng giảm chấn kiểu điều chỉnh khối lượng (TMD), giảm chấn kiểu điều chỉnh chất lỏng (TLD) và giảm chấn kiểu điều chỉnh cột chất lỏng (TLCD) để khống chế dao động gập uốn ngang của dầm chủ.

4.9.3.2. Trụ tháp cầu

Có thể dùng các loại bộ giảm chấn kiểu TMD, TLD, TLCD, và các phương pháp cơ học khác để khống chế dao động do gió gây ra đối với trụ cầu (4.14)



Hình 4.14. Phương pháp cơ học khống chế dao động do gió của tháp cầu

- | | | |
|--------------------|-------------------------|-----------------|
| 1: Cáp | 2: Thiết bị giảm chấn | 3: Tháp |
| 4: Thỏi khối lượng | 5: Palăng trượt | 6: Lò xo |
| 7: Bệ trượt | 8: Bộ giảm chấn nén dầu | 9: Bộ giảm chấn |
- 10: - Phương thức thỏi khối lượng trong nước
 - Phương thức bộ giảm chấn nửa khối lượng
 - Phương thức cáp gió

4.9.3.3. Dây văng

(1) *Cơ cấu liên kết chống gió*: Dùng cơ cấu liên kết để liên kết hai dây văng đặt song song nằm ngang, nhờ hiệu ứng can thiệp để ngăn ngừa dao động cuối của dây văng sau hướng gió.

Dùng cáp hỗ trợ để liên kết một số dây kéo xiên, lợi dụng đặc điểm là chúng không phát sinh dao động đồng thời, qua cáp hỗ trợ để truyền năng lượng từ đó đạt được mục đích giảm dao động.

(2) *Bộ giảm chấn*: Lắp bộ giảm chấn ở vị trí thích hợp trên dây văng để tăng tỷ số giảm chấn của dây văng, đây là biện pháp có hiệu quả để giảm biên độ cộng hưởng xoáy và để phòng xuất hiện cộng hưởng tham số của dây văng.

4.9.3.4. Tham số tối ưu, vị trí lắp đặt và điều kiện ràng buộc bộ giảm chấn bị động

(1) Tần số, tỷ số cản của bộ giảm chấn kiểu điều chỉnh phổ, có thể lấy theo công thức sau:

$$\frac{\omega_0}{\omega_s} = 1 - \frac{\mu}{2} \quad (4.59a)$$

$$\xi_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\mu} \quad (4.59b)$$

trong đó:

ω_0, ξ_0 - tần số góc (Hz) và tỷ số cản bộ giảm chấn.

ω_s - tần số góc (Hz) của cầu.

μ - tỷ số giữa khối lượng của bộ giảm chấn và của cầu tính theo công thức:

$$\mu = \frac{m_0 \Phi_1^2(x_0)}{\int_0^L m(x) \Phi_1^2(x) dx} \quad (4.59c)$$

với:

L - chiều dài khẩu độ cầu hoặc chiều cao trụ (m)

m_0 - khối lượng bộ giảm chấn (kg)

$m(x)$ - khối lượng trên một đơn vị dài cầu (kg/m)

$\Phi_1(x)$ - trị số loại hình dao động

x_0 - vị trí lắp bộ giảm chấn

$\Phi_1(x_0)$ - trị số loại hình dao động của $\Phi_1(x)$ tại vị trí lắp bộ giảm chấn

(2) Bộ giảm chấn nên lắp ở khu vực có trị số loại dao động lớn nhất

(3) Bộ giảm chấn kiểu điều chỉnh khối lượng (TMD) có sử dụng lò xo, vật nặng, bộ giảm chấn cần được kiểm tra các yêu cầu về cường độ lực tĩnh, cường độ mỗi lực động của lò xo, chuyển vị cho phép của vật nặng, không gian lắp đặt.

4.9.3.5. Tần số cơ bản và tỷ số cản của bộ giảm chấn loại điều chỉnh phổ

(1) Đối với hệ thống TMD (hình 4.15) được cấu tạo bởi lò xo, vật nặng, bộ giảm chấn, thì tần số và tỷ số cản tính theo công thức sau:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_0}} \quad (4.60a)$$

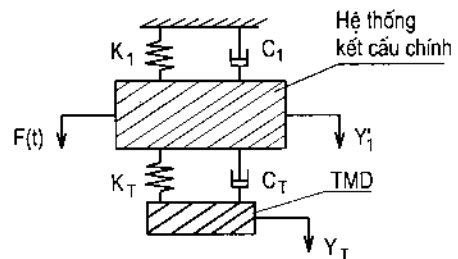
$$\xi_0 = \frac{C}{2m_0\omega_0} \quad (4.60b)$$

trong đó:

K - hệ số độ cứng lò xo (MPa)

m_0 - khối lượng bộ giảm chấn (kg)

C - hệ số cản bộ giảm chấn

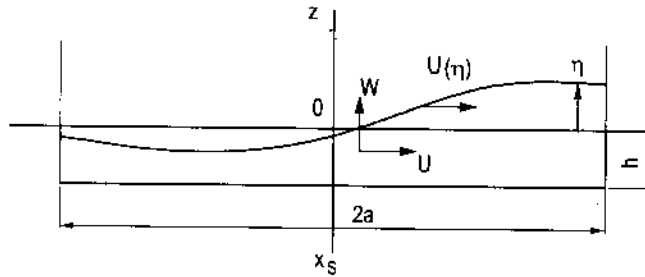


Hình 4.15: Bộ giảm chấn kiểu điều chỉnh khối lượng (TMD)

f_0 - tần số dao động hệ thống TMD (Hz)

ξ_0 - tỷ số cản hệ thống TMD.

(2) Tần số và tỷ số cản của bộ TLD (hình 4.16) có hộp đựng nước hình chữ nhật được tính theo công thức sau;



Hình 4.16: Bộ giảm chấn kiểu điều chỉnh chất lỏng (TLD)

$$f_{on} = \frac{\omega_{on}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2n-1}{2\alpha} \pi g \tanh\left(\frac{2n-1}{2\alpha} \pi h\right)} \quad (n = 1, 2, \dots, n) \quad (4.61a)$$

$$\xi_{on} = \frac{1}{\alpha \varepsilon} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v}{\omega_{on}}} \left(1 + \frac{2h}{b} + S\right) \quad (4.61b)$$

trong đó:

f_{on} - tần số bậc n của TLD (Hz)

ω_{on} - tần số góc bậc n của TLD (Hz)

$2a$ - chiều dài ống nước theo hướng sóng của TLD (m)

h - chiều sâu nước (m)

g - gia tốc trọng trường (m/s^2)

ξ_{on} - tỷ số cản của tần số bậc n; $\varepsilon = h/\alpha$

v - hệ số độ nhớt chất lỏng, đối với nước: $v = 0,01 \text{ cm}^2/s$

b - bề rộng thùng nước (m)

S - hệ số tiêu hao bề mặt, thường lấy là 1.

(3) Tần số và tỷ số cản của bộ giảm chấn kiểu điều chỉnh chất lỏng được tính theo công thức:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L}} \quad (4.62a)$$

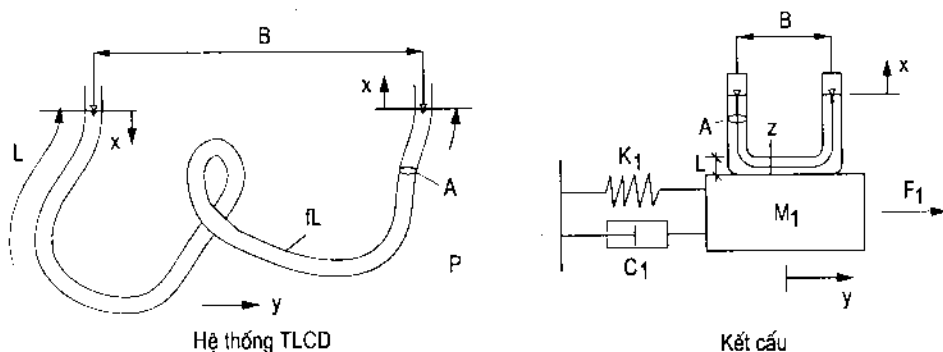
$$\xi_0 = \frac{2Kx_0}{3\pi L} \quad (4.62b)$$

trong đó:

L - chiều dài cột chất lỏng (m)

K - hệ số tổn hao áp lực, không chế bằng lưới. Xác định qua thí nghiệm.

x_0 - chuyển vị tối đa của kết cấu chịu khống chế khi chưa khống chế (m)



Hình 4.17: Bộ giảm chấn điều chỉnh chất lỏng kiểu ống thủy (TLCD)

4.10. KIỂM TRA CHỐNG GIÓ TRONG GIAI ĐOẠN THI CÔNG

4.10.1. Nguyên tắc chung

4.10.1.1. Cầu dây kiểu Extradosed và cầu cứng

Đối với cầu kiểu Extradosed có phần dầm liên tục khẩu độ lớn thi công bằng công nghệ hẫng và cầu cứng liên tục mố mềm hai lớp vỏ mỏng, thì trạng thái hai cánh hẫng dài nhất là trạng thái chống gió bất lợi nhất, nên cần kiểm tra nội lực tải trọng gió và ứng suất của đáy bệ mố, móng và phần dưới cánh treo ở trạng thái này.

4.10.1.2. Đối với cầu dây văng

Cần kiểm tra tính ổn định chống gió và nội lực tải trọng gió ở mặt cắt bất lợi nhất của trụ trần, của 2 cánh hẫng dài nhất và của cánh hẫng đơn.

4.10.1.3. Đối với cầu treo khẩu độ lớn lắp ráp từ giữa ra hai bên

Cần kiểm tra tính ổn định chống gió ở các giai đoạn mức lắp ráp dưới 40%.

4.10.2. Phương pháp kiểm tra chống gió ở giai đoạn thi công

4.10.2.1. Tốc độ gió chuẩn thiết kế ở giai đoạn thi công

Tốc độ gió chuẩn thiết kế quy định trong bản hướng dẫn này là tốc độ gió của chu kỳ tái hiện 100 năm, còn ở giai đoạn thi công, tùy tình hình cụ thể, có thể lấy nhỏ hơn. Vì Việt Nam chưa có thống kê đầy đủ, căn cứ tham khảo Tiêu chuẩn Châu Âu và Trung Quốc: nếu lấy 100 năm làm chuẩn thì tỷ số áp lực gió của các chu kỳ tái hiện khác nhau là:

$$\mu_T = 0,305 \log T_0 + 0,389 \quad (4.63)$$

trong đó: T_0 - chu kỳ tái hiện (năm)

Dựa vào công thức trên tính tỷ số áp lực gió ở các chu kỳ tái hiện khác nhau, và tỷ số tốc độ gió η (bảng 4.25).

Bảng 4.25: Tỷ số áp lực gió μ_T và tỷ số tốc độ gió η của các chu kỳ tái hiện khác nhau

Chu kỳ tái hiện T_0	100	50	40	30	20	10	5
M_i	1,0	0,91	0,88	0,85	0,77	0,71	0,61
η	1,0	0,95	0,94	0,92	0,88	0,84	0,78

Khi kiểm tra chống gió ở giai đoạn thi công đề nghị lấy tốc độ gió ở chu kỳ tái hiện là 10 năm.

Tốc độ gió chuẩn thiết kế ở giai đoạn thi công có thể chọn theo công thức sau trên cơ sở xét chu kỳ thi công và chu kỳ tái hiện khác nhau của hai tốc độ gió:

$$U_d^S = \eta U_d \quad (4.64)$$

trong đó:

U_d^S - tốc độ gió chuẩn thiết kế ở giai đoạn thi công (m/s)

U_d - tốc độ gió chuẩn thiết kế ở trạng thái cầu xây xong (m/s)

η - hệ số tái hiện tốc độ gió. Xem bảng 4.26.

4.10.2.2. Hệ số tái hiện tốc độ gió

Khi kiểm tra sự chống gió ở giai đoạn thi công, tùy theo tầm quan trọng của cầu và tần số phát sinh bão ở địa điểm cầu mà xác định chu kỳ tái xuất của tốc độ gió chuẩn thiết kế. Nói chung, lấy tốc độ gió chuẩn thiết kế ở chu kỳ tái xuất hiện là 10 năm.

Bảng 4.26

Chu kỳ tái hiện (năm)	5	10	20	30	50
η	0,78	0,84	0,88	0,92	0,95

4.10.2.3. Khi kiểm tra cường độ chiều ngang cầu ở giai đoạn thi công

Cần tính nội lực hướng ngang cầu theo tải trọng gió trận.

4.10.2.4. Trong trạng thái hai cánh hẫng dài tối đa

Cần tính nội lực tải trọng gió với áp lực gió trận và theo 2 phương gia tải:

- Gia tải đều đối xứng.
- Gia tải không đối xứng, hệ số không đối xứng thường lấy 0,5.

Chương 5

MỘT SỐ VÍ DỤ THIẾT KẾ CHỐNG GIÓ CẦU DÂY

5.1. THIẾT KẾ CHỐNG GIÓ CẦU TREO HỒ MÔN (QUẢNG ĐÔNG - TRUNG QUỐC)

5.1.1. Các số liệu cơ bản

5.1.1.1. Kích thước kết cấu

Khẩu độ:	$L = 888 \text{ (m)}$
Chiều rộng dầm:	$B = 35,6 \text{ (m)}$
Chiều cao dầm:	$H = 3,012 \text{ (m)}$
Khoảng cách giữa các cáp chủ:	$B_c = 33 \text{ (m)}$
Tỷ số:	$\frac{f}{L} = 10,5$

Chiều cao cách mặt nước của dầm gia cường: $z = 60 \text{ (m)}$

5.1.1.2. Dầm cứng

Diện tích:	$A = 1,229 \text{ (m}^2\text{)}$
Mô men quán tính xoắn:	$J_d = 5,0955 \text{ (m}^4\text{)}$
Mô men quán tính ngang:	$J_2 = 124,3917 \text{ (m}^4\text{)}$
Mô men quán tính đứng:	$J_3 = 1,9786 \text{ (m}^4\text{)}$
Trọng lượng đơn vị dài của dầm:	$m = 18,3357 \times 10^3 \text{ (kg/m)}$
Mô men quán tính theo trọng lượng đơn vị dài của dầm:	$J_m = 1743,03 \times 10^3 \text{ (kg.m}^2\text{/m)}$
Mô đun đàn hồi :	$E = 2,1 \times 10^5 \text{ (MPa)}$
Mô đun cắt:	$G = 8,077 \times 10^4 \text{ (MPa)}$

5.1.1.3. Cáp chủ

Diện tích:	$A_c = 0,2853 \text{ (m}^2\text{)}$
Khối lượng đơn vị dài:	$m_c = 2,3969 \times 10^3 \text{ (kg/m)}$
Mô đun đàn hồi:	$E_c = 2,0 \times 10^5 \text{ (MPa)}$

5.1.2. Xác định tốc độ gió cơ bản, tốc độ gió chuẩn thiết kế, tốc độ gió kiểm tra

5.1.2.1. Tốc độ gió cơ bản

Theo bản đồ phân bố áp lực gió toàn Trung Quốc trong cuốn "Quy phạm thông dụng thiết kế cầu cống đường bộ", của Bộ Giao thông Trung Quốc (JTJ 021-89) thì khu vực Hồ Môn nằm ở đường đẳng áp 1000Pa. Theo điều 4.3.2.1(2) thì:

$$U_{20} = \sqrt{1,6W_0} = 40 \text{ (m/s)}$$

$$U_{10} = 0,836U_{20} = 33,45 \text{ (m/s)}$$

Lấy tốc độ gió cơ bản khu vực Hồ Môn: $U_{10} = 33,45 \text{ (m/s)}$

5.1.2.2. Tốc độ gió chuẩn thiết kế

Địa hình vị trí cầu có độ gồ ghề loại I, chỉ số mật cắt tốc độ gió $\alpha = 0,12$, chiều cao mật cắt cầu $z = 60 \text{ (m)}$ thì tốc độ gió chuẩn thiết kế của cầu treo Hồ Môn tính theo điều 4.3.3.3 của bản hướng dẫn là:

$$U_d = K_1 U_{10}$$

Hệ số điều chỉnh: $K_1 = 1,47$ thì: $U_d = 1,47 \times 33,45 \approx 50 \text{ (m/s)}$

Và tốc độ gió chuẩn thiết kế ở giai đoạn thi công: $U_d^s = 0,84U_d = 42 \text{ (m/s)}$

5.1.2.3. Tốc độ gió kiểm tra dao động

Theo điều 4.1.4.1. trong bản Hướng dẫn, tốc độ gió kiểm tra dao động là:

$$[U_{cr}] = 1,2\mu_r U_d$$

Hệ số điều chỉnh theo bảng 4.17 bản hướng dẫn, lấy $m_r = 1,206$ thì tốc độ gió kiểm nghiệm dao động cầu Hồ Môn là:

$$[U_{cr}] = 1,2 \times 1,206 \times 50 = 72,4 \text{ (m/s)}$$

5.1.2.4. Tốc độ gió trận

Theo điều 4.4.2.2 trong bản Hướng dẫn tốc độ gió trận dùng trong tính nội lực theo phương ngang được lấy là:

$$U_g = G_v \times U_d = 1,38 \times 50 = 69 \text{ (m/s)}$$

5.1.3. Tính toán đặc tính động lực

5.1.3.1. Tần suất uốn thẳng đứng đối xứng bậc 1, tính theo điều 4.5.3.2(3) trong bản Hướng dẫn này là:

$$f_b^s = \frac{0,3}{L} \sqrt{\frac{E_c A_c}{W}} = \frac{0,3}{888} \sqrt{\frac{2,0 \times 10^8 \times 0,2853}{(18,35 + 2 \times 2,397) \times 10}} = 0,1678 \text{ (Hz)}$$

5.1.3.2. Tần suất uốn thẳng đứng phản đối xứng bậc 1, tính theo điều 4.5.3.2(2)

$$f_b^a = \frac{1,11}{\sqrt{f}} = \frac{1,11}{\sqrt{84,57}} = 0,1207 \text{ (Hz)}$$

5.1.3.3. Tần suất xoắn đối xứng bậc 1, tính theo điều 4.5.3.2(5)

$$f_t^s = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{GJ_d + 0,05256 E_c A_c \left(\frac{B_c}{2}\right)^2}{m_d r^2 + m_c \frac{B_c^2}{2}}} = 0,3573 \text{ (Hz)}$$

5.1.3.4. Tần suất xoắn phản đối xứng bậc 1 tính theo điều 4.5.3.2(4)

$$f_t^a = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{GJ_d + 2H_g \left(\frac{B_c}{2}\right)^2}{m_d r^2 + m_c \frac{B_c^2}{2}}}$$

trong đó: $H_g = \frac{(m_d + 2m_c)gl^2}{16f} = \frac{\sum mgl}{16} \times \frac{l}{f} = \frac{23,1295 \times 9,81 \times 888 \times 10,5}{16} = 132226 \text{ (kN)}$

$$\text{Vậy: } f_t^a = \frac{1}{888} \sqrt{\frac{8,077 \times 10^7 \times 5,0955 + 2 \times 132226 \times \left(\frac{33}{2}\right)^2}{3048}} = 0,4485 \text{ (Hz)}$$

Bảng sau so sánh kết quả tính toán theo công thức gần đúng của bản Hướng dẫn với phương pháp phần tử hữu hạn:

Loại chấn động	Uốn thẳng đứng phản đối xứng bậc 1	Uốn thẳng đứng đối xứng bậc 1	Xoắn phản đối xứng bậc 1	Xoắn đối xứng bậc 1
Công thức ở bản Hướng dẫn	0,1207	0,1678	0,4485	0,3573
Trị số tính toán theo SAP5	0,1117	0,1715	0,4260	0,3612
Sai số	8%	-2%	5%	-1%

5.1.4. Dự đoán tính ổn định dao động

Tốc độ gió tới hạn dao động tính toán ở điều 4.6.1.2(1), trước hết tính tốc độ gió dao động tới hạn của bản phẳng:

$$V_{co} = T_{ho}^{-1} f_t B$$

trong đó:

$$T_{ho}^{-1} \text{ tính theo công thức 4.35: } T_{ho}^{-1} = 2,5 \sqrt{\mu \left(\frac{r}{b} \right)}$$

$$m = 23,24 \times 10^3 \text{ (kg/m)}$$

$$\mu = \frac{m}{\pi \rho b^2} = 18,68$$

$$I_m = 3079 \times 10^3 \text{ (kg.m}^2\text{/m)}$$

$$\frac{r}{b} = 0,65$$

$$b = \frac{B}{2} = 17,8 \text{ (m)}$$

$$T_{ho}^{-1} = 2,5 \sqrt{18,68 \times 0,65} = 8,711$$

Khi xoắn đối xứng:

$$f_t^s = 0,357 \text{ (Hz) có } V_{co} = 8,711 \times 0,3573 \times 35,6 = 110,8 \text{ (m/s)}$$

Khi xoắn phản đối xứng:

$$f_t^a = 0,4485 \text{ (Hz) có } V_{co} = T_{ho}^{-1} f_t B = 139 \text{ (m/s)}$$

Tốc độ gió tới hạn dao động của bản phẳng phải được điều chỉnh mới trở thành tốc độ gió tới hạn của cầu thực, khi góc tác dụng của gió là 0° . Từ bảng 4.15, hệ số triết giảm η_s lấy bằng 0,91 thì tốc độ gió tới hạn dao động là:

$$U_{cr} = \eta_s V_{co} = 0,91 \times 110,8 = 101 \text{ (m/s)} > [U_{cr}]$$

Lại xét thêm hệ số chiết giảm hiệu ứng của góc công η_α thường thường khi lấy $+3^\circ$ thì $\eta_\alpha = 0,8$, vậy tốc độ gió tới hạn là:

$$U_{cr} = \eta_s \eta_\alpha V_{co} = 0,91 \times 0,8 \times 110,8 = 81 > [U_{cr}] = 72 \text{ (m/s)}$$

Bảng sau đây so sánh tốc độ gió tới hạn tính gần đúng theo bản Hướng dẫn này với tốc độ gió tới hạn theo thí nghiệm khí động mô hình phân đoạn và mô hình toàn cầu của cầu treo Hồ Môn.

Tốc độ gió tới hạn dao động của cầu treo Hồ Môn (m/s)

Góc tác dụng của gió	$+3^\circ$	0°
Công thức trong bản Hướng dẫn	81	101
Thí nghiệm mô hình phân đoạn	79	89
Thí nghiệm mô hình toàn cầu	72	88

Theo điều 4.6.1.5 của bản Hướng dẫn, cấp bậc an toàn dao động có thể phán đoán công thức:

$$\min T_{ho}^{-1} = \frac{[U_{cr}]}{f_t B} = \frac{72}{0,3573 \times 35,6} = 5,7$$

Theo bảng 4.18 cấp bậc an toàn dao động cầu treo Hồ Môn là cấp III vì vậy cầu này cần tiến hành phân tích chọn hình dạng khí động và chấn động và thí nghiệm khí động mô hình toàn cầu.

5.1.5. Phân tích tải trọng gió theo phương ngang

Trong giai đoạn thiết kế sơ bộ có thể lấy tải trọng gió trận để tính nội lực ngang của dầm.

Tải trọng trận gió hướng ngang tác dụng lên dầm tính theo công thức:

$$P_g = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_T H$$

trong đó:

$\rho = 1,225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ - mật độ không khí

$U_g = G_v U_d = 69 \text{ (m/s)}$ - tốc độ trận gió

$H = 3,012 \text{ (m)}$ - chiều cao dầm

C_T - hệ số lực hướng ngang dầm, theo điều 4.4.3.2(3) của bản Hướng dẫn có thể lấy là 1,3

Vậy:
$$P_g = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 69^2 \times 1,3 \times 3,012 = 11428 \text{ (N/m)}$$

Khi tính tải trọng gió tác dụng lên cáp chủ, thì tốc độ gió lấy trị số tại vị trí trung bình chiều cao cáp chủ. Hệ số lực cản cáp chủ theo điều 4.4.3.3(3) lấy bằng 0,7, đường kính cáp chủ 0,6m, vì vậy tải trọng gió hướng ngang lên cáp chủ là:

$$P_{cg} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 72,4^2 \times 0,7 \times 0,6 = 1350 \text{ (N/m)}$$

Sau khi tính toán tải trọng gió như trên, có thể dùng các phương pháp thông thường để tính nội lực theo phương ngang của dầm.

5.1.6. Kiểm tra ổn định lực tĩnh

5.1.6.1. Kiểm tra sự phát tán xoắn do lực tĩnh

Căn cứ điều 4.4.5.3(2) của bản Hướng dẫn này, tính tốc độ gió tới hạn phát tán xoắn của cầu:

$$U_{td} = K_{td} f_t B$$

trong đó:

$$K_{td} = \sqrt{\frac{\pi^3}{2} \mu \left(\frac{r}{b}\right)^2 \frac{1}{C'_{Mo}}}$$

C'_{Mo} - độ lệch của hệ số mô men trong dầm khi góc $\alpha = 0^\circ$, lấy theo thí nghiệm khí động của mô hình phân đoạn

$$K_{td} = \sqrt{\frac{\pi^3}{2} 18,68(0,65)^2 \frac{1}{1,07}} = 10,69$$

Thì tốc độ gió tới hạn phát tán xoắn của cầu treo Hồ Mên là:

$$U_{td} = 10,69 \times 0,3573 \times 35,6 = 136 \text{ (m/s)} > U_g = 69 \text{ (m/s)}$$

5.1.6.2. Kiểm tra uốn cong theo hướng ngang do lực tĩnh

Tốc độ gió tới hạn uốn cong hướng ngang của cầu treo tính theo điều 4.4.5.1(1)

$$U_{lb} = K_{lb} f_t B$$

trong đó:

$$K_{lb} = \sqrt{\frac{\pi^3 \left(\frac{B}{H}\right) \mu \left(\frac{r}{b}\right)}{C_D \varepsilon \sqrt{K} \sqrt{K+1} + \frac{C'_L B_c}{C_D H}}}$$

C_D - hệ số lực cản của dầm, lấy theo thí nghiệm khí động

C'_L - hiệu độ lệch của hệ số lực nâng dầm, lấy theo thí nghiệm Hầm gió

$\varepsilon = \frac{f_t}{f_b}$ - tỷ số tần suất uốn xoắn

$$K = \frac{1}{4} \left(\frac{4\pi^2}{3} + 1 \right) = 3,45$$

B_c - cự ly giữa các cáp chủ

Đối với cầu treo Hồ Mên, $C_D = 0,812$

$$C'_L = 4,57$$

$$\varepsilon = \frac{0,3573}{0,1678} = 2,13$$

$$B_c = 33$$

$$\text{Vậy: } K_{fb} = \sqrt{\frac{\pi^3 \times \left(\frac{35,6}{3,012}\right) \times 18,68 \times 0,65}{0,812 \times 2,13 \sqrt{3,54} \times \sqrt{3,54 + 1 + \frac{4,57 \times 33}{0,812 \times 3,012}}}} = 13,0$$

Tốc độ gió tới hạn uốn cong theo hướng của cầu treo Hồ Môn:

$$U_{fb} = K_{fb} f_t B = 13 \times 0,3573 \times 35,6 = 165 \text{ (m/s)} > U_g = 69 \text{ (m/s)}$$

5.1.7. Dự đoán ảnh hưởng chuyển vị dao động rung

Đối với cầu treo, chuyển vị dao động theo phương thẳng đứng trong phạm vi $L/2$ chủ yếu do dao động đứng đối xứng bậc 1 gây ra, còn tại $L/4$ chủ yếu do dao động đứng phản đối xứng gây ra.

Các số liệu cơ bản tính toán dao động rung đối với cầu treo Hồ Môn như sau:

Tỷ số tắt dần kết cấu $\xi_h = 0,005$, cao độ thô ráp mặt đất $z_0 = 0,01$.

Hệ số tương quan $I = 7$, tốc độ gió $U_d = 50 \text{ (m/s)}$, tần suất uốn thẳng đứng đối xứng bậc 1 $f_h^b = 0,1678 \text{ (Hz)}$

Tần suất uốn thẳng đứng phản đối xứng bậc 1: $f_h^a = 0,1207 \text{ (Hz)}$, các hệ số còn lại tìm được do thí nghiệm mô hình phân đoạn.

$$K_h^a = \frac{B}{U} \omega_h^a = 0,540$$

$$K_h^s = \frac{B}{U} \omega_h^s = 0,751$$

$$H_1^* = -2,5 \quad (K_h^s = 0,751)$$

$$H_1^* = -3,5 \quad (K_h^s = 0,540)$$

$$\beta = \frac{\lambda L K_h}{2\pi B} = \begin{cases} 20,86 & (K_h^s) \\ 15,01 & (K_h^a) \end{cases}$$

Theo điều 4.7.1.2(2) trị số phương sai căn tối đa của chuyển vị dao động uốn thẳng đứng loại dao động bậc i:

$$R_h(K_h) = C_{wh} C_{xh} C_{zh} \psi(\beta) \mu(K) \phi_w(f)$$

trong đó:

$$C_{wh} = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = 0,1149$$

$$C_{xh} = C'_L + \frac{A}{B} C_D \approx C'_L = 4,57$$

Do thí nghiệm 3 phần lực của phân đoạn được:

$$C_{sh} = \frac{0,44\sqrt{ZB}}{\mu\sqrt{\delta_h - 0,637\frac{H_1^*}{\mu}}} = \begin{cases} 3,59 (K_h^*) \\ 3,06 (K_h^*) \end{cases}$$

Tra bảng 4.21, ta có:
$$\psi(\beta) = \begin{cases} 0,21(K_h^s) \\ 0,25(K_h^a) \end{cases}$$

Từ phần 4.7.1.2(2) ta có:
$$\mu(K) = \begin{cases} 0,84(K_h^s) \\ 1,48(K_h^a) \end{cases}$$

Có xét tới dẫn khí, và không xét tới dẫn khí >
$$\phi_w(f) = \frac{1}{1 + 4\frac{n.Z}{U}} = \begin{cases} 0,554(K_h^s) \\ 0,633(K_h^a) \end{cases}$$

$$R_h(K_h) = C_{wh} C_{ah} C_{sh} \psi(\beta) \mu(K) \phi_w(f)$$

$$= \begin{cases} 0,1149 \times 4,57 \times 3,59 \times 0,21 \times 0,84 \times 0,554 = 0,184 \text{ (m)} \\ 0,1149 \times 4,57 \times 3,06 \times 0,25 \times 1,48 \times 0,633 = 0,376 \text{ (m)} \end{cases}$$

Tức là phương sai căn của chuyển vị dao động thẳng đứng ở giữa nhịp - cầu Hồ Môn là 0,184 (m) còn ở vị trí L/4 là 0,376 (m).

5.1.8. Kết luận

5.1.8.1. Cấp an toàn dao động lật của cầu treo Hồ Môn là cấp III, đòi hỏi phải chọn loại hình khí động, phân tích dao động, và thí nghiệm mô hình khí động toàn cầu trong hầm gió.

5.1.8.2. Một số công thức dùng tính đặc tính động lực cầu treo có độ chính xác nhất định, có thể làm căn cứ tính toán lực động ở giai đoạn thiết kế sơ bộ.

5.1.8.3. Khi phân tích ổn định tĩnh học và rung chấn phải dựa vào số liệu thí nghiệm khí động. Vì vậy phải tiến hành phân tích ổn định tĩnh học và tác động rung chấn do tác động của gió. Thí nghiệm phân đoạn là không thể thiếu đối với cầu nhịp lớn cần phải được kiểm tra bằng mô hình toàn cầu trong Hầm gió.

5.1.8.4. Tính an toàn chống gió ở giai đoạn thi công có lúc rất quan trọng nhưng tính toán phức tạp, cần thông qua việc phân tích đặc tính tự dao động, phân tích dao động và thí nghiệm mô hình toàn cầu.

5.2. THIẾT KẾ CHỐNG GIÓ CẦU DÂY VẰNG DƯƠNG PHỐ (THƯỢNG HẢI - TRUNG QUỐC)

5.2.1. Các số liệu căn bản

Nhịp chính:	$L = 602 \text{ (m)}$
Chiều rộng dầm chủ:	$B = 30,35 \text{ (m)}$
Chiều cao dầm chủ:	$H = 3,02 \text{ (m)}$
Cầu cao:	$z = 60 \text{ (m)}$
Khối lượng dầm chủ:	$m = 4,4 \times 10^4 \text{ (kg/m)}$
Mô men quán tính:	$I_m = 2,879 \times 10^{10} \text{ (kg.m}^2\text{/m)}$
Độ cứng chống uốn hướng thẳng đứng	$EI_2 = 3,491 \times 10^5 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
Độ cứng xoắn:	$GJ_d = 3,18 \times 10^5 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
Bán kính quán tính cực:	$r = 9,75 \text{ (m)}$

5.2.2. Xác định tốc độ gió cơ bản, tốc độ gió chuẩn thiết kế, tốc độ gió kiểm tra dao động

5.2.2.1. Tốc độ gió cơ bản

Căn cứ tài liệu tốc độ gió đo cục khí tượng Thượng Hải cung cấp, lấy tốc độ gió cơ bản khu vực Thượng Hải $U_{10} = 32 \text{ (m/s)}$

5.2.2.2. Tốc độ gió chuẩn thiết kế cầu

Địa điểm cầu thuộc địa hình có độ gồ ghề loại III, chỉ số mật cắt tốc độ gió $\alpha = 0,22$, chiều cao mặt cầu $z = 60 \text{ (m)}$ thì tốc độ gió chuẩn thiết kế của cầu treo dây văng Dương Phố căn cứ theo mục 4.3.3.3 là:

$$U_d = K_1 U_{10}$$

Hệ số hiệu chỉnh theo bảng 4.3 lấy $K_1 = 1,15$

$$\text{Vậy: } U_d = 1,15 \times 32 = 37 \text{ (m/s)}$$

$$\text{Tốc độ gió chuẩn ở giai đoạn thi công: } U_d^s = 0,84 U_d = 31 \text{ (m/s)}$$

5.2.2.3. Tốc độ gió kiểm tra dao động

Theo điều 4.6.1.4(1) thì tốc độ gió này là:

$$[U_{cr}] = 1,2 \mu_f U_d$$

Hệ số điều chỉnh ở bảng 4.17 lấy nội suy là $\mu_f = 1,32$. Vậy tốc độ gió kiểm tra dao động của cầu Dương Phố là: $[U_{cr}] = 1,2 \times 1,32 \times 36,8 = 59 \text{ (m/s)}$.

5.2.2.4. Tốc độ gió trận

Theo mục 4.4.2.2 tốc độ gió này là $U_g = G_v U_d$

Độ gồ ghề mặt đất loại III: $G_v = 1,7$ vậy $U_d = 1,7 \times 37 = 63 \text{ (m/s)}$

5.2.3. Tính toán đặc trưng động học

2.3.1. Tần suất uốn thẳng đứng đối xứng bậc 1

Cầu Dương Phổ là loại cầu treo dây văng có hai mặt phẳng dây riêng biệt, có trụ neo, dầm thép bê tông liên hợp mặt cắt hình hộp. Theo mục 4.5.3.3(3), tần suất uốn thẳng đứng đối xứng bậc 1 là:

$$f_b^s = \frac{150}{L_c} = \frac{150}{602} = 0,249 \text{ (Hz)}$$

5.2.3.2. Tần suất xoắn đối xứng bậc 1

Theo điều 4.5.3.3(3), tính:

$$f_{t1}^s = \frac{C}{\sqrt{L_c}} = \frac{13}{\sqrt{602}} = 0,529 \text{ (Hz)}$$

So sánh kết quả phân tử hữu hạn và công thức gần đúng trong bản Hướng dẫn.

Loại dao động	Uốn thẳng đứng bậc 1	Xoắn bậc 1	Loại dao động	Uốn thẳng đứng bậc 1	Xoắn bậc 1
Theo công thức của bản hướng dẫn	0,294	0,529		-9%	+3,7%
Tính theo phân tử hữu hạn	0,273	0,510			

So sánh kết quả của hai cách tính trên, thấy chênh lệch về tần suất uốn thẳng đứng đối xứng bậc 1 là khá cao.

5.2.4. Kiểm toán tính ổn định dao động

Theo điều 4.6.1.2(1), trước hết tính tốc độ gió tới hạn dao động

$$V_{cn} = T_{ho}^{-1} f_1 B$$

$$T_{ho}^{-1} \text{ tính theo điều 4.6.1.2(4): } T_{ho}^{-1} = 2,5 \sqrt{\mu \left(\frac{r}{b} \right)}$$

$$b = B/2 = 15,125 \text{ (m)}$$

$$\mu = \frac{m}{\pi \rho b^2} = \frac{44 \times 10^3}{3,14 \times 1,225 \times 15,125^2} = 50$$

$$\text{Vậy: } T_{ho}^{-1} = 2,5 \sqrt{50 \times \frac{9,75}{15,125}} = 14,193$$

$$V_{co} = T_{ho}^{-1} f_l B = 14,193 \times 0,529 \times 30,35 = 228 \text{ (m/s)}$$

Tốc độ gió nói trên sau khi chiết giảm thành tốc độ gió tới hạn của cầu thực tế. Hệ số chiết giảm khi góc tác dụng của gió bằng 0° theo bảng 4.15 lấy $\eta_s = 0,43$. Vậy tốc độ gió tới hạn đối với cầu thực là:

$$U_{cr} = \eta_s V_{co} = 0,43 \times 228 = 98 \text{ (m/s)}$$

Lại xét hệ số chiết giảm hiệu ứng góc tác dụng thường lấy $+3^\circ$ thì lấy $\eta_\alpha = 0,75$ và tốc độ gió tới hạn

$$U_{cr} = \eta_s \eta_\alpha V_{co} = 0,43 \times 0,75 \times 228 = 72 \text{ (m/s)}$$

Biểu sau so sánh kết quả tính toán theo "Bản hướng dẫn" với kết quả thí nghiệm khí động theo mô hình phân đoạn và mô hình toàn cầu của cầu Dương Phố.

Tốc độ gió tới hạn dao động gập của cầu dây văng Dương Phố - Thượng Hải

Góc tác dụng của gió	$+3^\circ$	0°
Theo công thức trong bản Hướng dẫn	72	98
Thí nghiệm mô hình phân đoạn	64	85
Thí nghiệm mô hình phân đoạn	-	81

Kết quả thí nghiệm ống khí động trên mô hình phân đoạn là 64(m/s) nhỏ hơn 72(m/s) theo điều 4.6.1.5, cấp bậc an toàn dao động gập có thể dựa vào công thức:

$$\min T_{ho}^{-1} = \frac{[U_{cr}]}{f_l B} = \frac{59}{0,529 \times 30,35} = 3,8$$

Theo bảng 4.18, cấp bậc ổn định chống gió cầu Dương Phố là cấp II đòi hỏi phải phân tích dao động và thí nghiệm khí động mô hình phân đoạn và toàn cầu.

5.2.5. Tính toán tải trọng gió ngang

Giai đoạn thiết kế sơ bộ, có thể dùng tải trọng gió trận để tính nội lực ngang của dầm

Tải trọng tác dụng lên dầm do gió trận theo phương ngang:

$$P_g = \frac{1}{2} \rho U_g^2 C_T H$$

trong đó:

$\rho = 1,225 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ - mật độ không khí

$U_g = G_v U_d = 63 \text{ (m/s)}$ - tốc độ gió trận

$H = 3,02$ (m) - chiều cao dầm

$C_T = 1,3$ - hệ số lực hướng ngang dầm, theo 4.4.3.2(3).

Vậy: $P_g = 0,613 \times 63^2 \times 1,3 \times 3,02 = 9552$ (N/m)

Sau khi tính tải trọng gió nói trên, có thể tính nội lực ngang của dầm theo các phương pháp thông thường trong quy trình.

5.2.6. Kiểm toán ổn định lực tĩnh

Phát tán xoắn lực tĩnh

Theo 4.4.5.3(1), tốc độ gió tới hạn phát tán xoắn của cầu:

$$U_{td} = K_{td} f_t B$$

trong đó:

$$K_{td} = \sqrt{\frac{\pi^3}{2} \mu \left(\frac{r}{b}\right)^2 \frac{1}{C'_{Mo}}}$$

$$C'_{Mo} = 0,546$$

$$K_{td} = \sqrt{\frac{\pi^3}{2} \times 50 \times \left(\frac{9,75}{15,125}\right)^2 \times \frac{1}{0,546}} = 24,29$$

$$\text{Vậy: } U_{td} = 24,29 \times 0,529 \times 30,35 = 390 \gg U_g = 63 \text{ (m/s)}$$

5.2.7. Dự đoán biên độ dao động rung

Đối với cầu dây văng, nói chung chỉ cần tính độ uốn cong đứng, cong ngang và chuyển vị xoắn, chỉ cần tính dao động đối xứng bậc nhất là đủ.

Sau đây lấy thí dụ dao động uốn thẳng đứng để nêu phương pháp sử dụng phổ phản ứng dao động rung.

Số liệu cơ bản cầu Dương Phổ:

Tần suất uốn cong thẳng đứng bậc nhất $f_h = 0,249$ (Hz)

Tỷ số $\xi_h = 0,01$

Tốc độ gió chuẩn thiết kế $U_d = 37$ (m/s)

$$U_r = \frac{U}{fB} = \frac{37}{0,249 \times 30,35} = 4,9$$

H_1^* tương ứng = -1,6 (qua thí nghiệm hầm gió)

Độ gồ ghề mặt đất $z_0 = 0,3$ (m)

Hệ số tương quan thủy bình $\lambda = 7$

Vậy:

$$K_h = \frac{B\omega_h}{U} = \frac{30,35 \times 2\pi \times 0,249}{37} = 1,28$$

$$\beta = \frac{\lambda L K_h}{2\pi B} = \frac{7 \times 602 \times 1,28}{2 \times 3,141 \times 30,35} = 28,3$$

$$C_{wh} = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{\ln\left(\frac{60}{0,3}\right)} = 0,1887$$

$$C_{Ah} = C'_L + \frac{A}{B} C_D = C'_L = 4,466$$

$$C_{sh} = \frac{0,44 \times \sqrt{ZB}}{\mu \sqrt{\xi_h - 0,637 \frac{H_1^*}{\mu}}} = 2,168$$

Tra bảng ta có: $\psi(\beta) = 0,19$

$$\mu(K) = 0,343$$

$$\phi_\omega(f) = \frac{1}{1 + 4 \frac{nZ}{U}} = 0,373$$

Do đó phương sai căn ảnh hưởng chuyển vị dao động hướng thẳng đứng giữa nhịp tính theo 4.7.1.2(2) là:

$$\begin{aligned} R_h(K_h) &= C_{wh} C_{xh} C_{sh} \psi(\beta) \mu(K) \phi_\omega(f) \\ &= 0,1887 \times 4,466 \times 2,168 \times 0,19 \times 0,343 \times 0,373 = 0,044 \text{ (m)} \end{aligned}$$

5.2.8. Kết luận

5.2.8.1. Cấp an toàn dao động của cầu treo dây xiên Dương Phố là cấp II, nên cần phân tích dao động, thí nghiệm mô hình phân đoạn trong hầm gió.

5.2.8.2. Cần nghiên cứu thêm việc tính toán độ cong lực tĩnh hướng ngang.

5.2.8.3. Dù phân tích ổn định lực tĩnh hay tính toán dao động đều cần phải có số liệu đầy đủ qua thí nghiệm mô hình phân đoạn trong Hầm gió. Do đó nhất thiết phải làm thí nghiệm này.

5.2.8.4. Đối với cầu dây văng, trong giai đoạn thi công hẫng khi cánh hẫng vươn ra xa nhất là bất lợi nhất và phải thí nghiệm khí động để xác định bậc an toàn chống gió trong thi công.

5.3. TÍNH TOÁN KIỂM TRA FLUTTER CỦA CẦU RẠCH MIỄU

5.3.1. Tính tốc độ gió kiểm tra Flutter

Nội dung tính toán được thực hiện theo "Bản Hướng dẫn tính toán chống gió động học cho cầu dây" trong chương 4.

Hệ số μ_f , xét đến ảnh hưởng nhiễu loạn của gió và sự kết hợp bất lợi của gió xoáy dọc theo nhịp cầu, được lấy bằng 1,316 dựa trên căn cứ rằng nhịp chính của cầu Rạch Miễu là 270m và địa hình xung quanh cầu là Vùng II, và hệ số an toàn K, xét đến sự bất định trong thí nghiệm hầm gió, trong thiết kế và thi công cầu, lấy bằng 1,2. Như vậy, tốc độ gió kiểm tra *Flutter* đối với giai đoạn khai thác, ứng với chu kỳ 100 năm có thể được tính như sau:

$$[U_{cr}] = K\mu_f U_d = 1,2 \times 1,316 \times 38,1 = 60,2 \text{ m/s}$$

Đối với giai đoạn thi công, chu kỳ lặp lại là 25 năm thì tốc độ gió kiểm tra *Flutter* là:

$$[U_{cr}^s] = K\mu_f U_d^s = 1,2 \times 1,316 \times 34,3 = 54,2 \text{ m/s}$$

5.3.2. Các tần số riêng của các thức dao động uốn và xoắn của bản mặt cầu trong các giai đoạn xây dựng chính và giai đoạn khai thác (Hz)

(Bảng 1)

		Giai đoạn xây dựng			Giai đoạn khai thác
		Hẫng đôi lớn nhất ở giai đoạn A	Hẫng đôi lớn nhất ở giai đoạn B	Hẫng đơn lớn nhất	
Mô hình kiểu dầm đơn có các dầm ngang	Uốn	0,257	0,3512	0,3041	0,3265
	Xoắn	1,5886	0,9971	0,8516	0,8545
Mô hình kiểu 3 dầm song song	Uốn	0,2549	0,3553	0,3068	0,3302
	Xoắn	1,6197	1,0092	0,8585	0,8613

5.3.3. Phân tích các thức dao động của kết cấu cầu

Dựa trên các tài liệu thiết kế cầu Rạch Miễu, sự phân tích các thức dao động của kết cấu cầu được tiến hành đối với trạng thái giai đoạn sử dụng (8×14 cấp) và 3 giai đoạn xây dựng chính bao gồm:

- Giai đoạn hẫng đôi lớn nhất A (4×5 cấp, không có trụ tạm),

- Giai đoạn hăng đôi lớn nhất B (4×5 cặp, không có trụ tạm),
- Giai đoạn hăng đơn lớn nhất (4×14 cặp cặp, không có trụ tạm).

Khi phân tích kết cấu, Tư vấn Trung Quốc đã dùng phần mềm phân tử hữu hạn ANSYS. Cả hai mô hình kiểu dầm đơn có các dầm ngang và mô hình kiểu 3 dầm song song đều được dùng để phân tích với mô hình bản mặt cầu được kiểm tra các hiệu ứng oằn cong của bản mặt cầu theo các tần số riêng. Các tần số riêng được tính toán trong các thức dao động uốn và xoắn của 4 giai đoạn xây dựng kết cấu và được đề nghị theo bảng trên.

Nhận xét rằng hiệu ứng oằn cong của bản mặt cầu trong các tần số xoắn là không quan trọng đối với tất cả 4 giai đoạn. Kết quả tính toán cũng được chỉ ra rằng tần số dao động xoắn của giai đoạn hăng đơn lớn nhất là giá trị thấp nhất theo 3 giai đoạn xây dựng, do vậy, giai đoạn hăng đơn được quan tâm như giai đoạn xây dựng không thuận lợi nhất đối với sự ổn định flutter. Bởi vậy, giai đoạn sử dụng và giai đoạn hăng đơn lớn nhất được đề nghị trong việc kiểm tra theo mô hình một đốt dầm trong Hầm gió. Các tỷ số giữa tần số xoắn và tần số uốn lần lượt là 2,609 và 2,798.

5.3.4. Thí nghiệm mô hình một đốt dầm trong hầm gió đối với dao động do gió

Thí nghiệm mô hình một đốt dầm trong hầm gió đối với dao động do gió được tiến hành trong Hầm gió Boundary Layer TJ-1 của Phòng thí nghiệm State Key. Các mô hình mặt cắt theo lưới 2D được sử dụng trong thí nghiệm. Mô hình mặt cắt được treo lơ lửng với 8 liên kết từ hai phần tử được đặt bên ngoài Hầm gió. Kích thước hình học mô hình thử có tỷ lệ = 1/56,25 so với kích thước thực tế của mặt cắt.

Để giảm bớt ảnh hưởng của lưu lượng 3D quanh 2 đầu của mô hình mặt cắt đến kết quả thí nghiệm, chiều dài mô hình mặt cắt được thiết kế là 1,76m nên tỷ lệ chiều dài trên chiều rộng của mô hình mặt cắt là khoảng 6,3 và khoảng trống giữa đuôi mô hình và tường của hầm gió là 20mm.

Kết cấu của đốt dầm rắn chắc được làm bằng kim loại và dài 1,674m. Có 3 lớp sơn phủ với độ nhẵn cao. Một phần ngắn 43 mm được đặt ở hai đầu của mô hình và được thiết kế có thể di chuyển được để thuận tiện trong quá trình lắp đặt.

Phần tử cáp thấp hơn gần bản mặt cầu có chiều cao tương tự bản mặt cầu và các khối neo của cáp trên bản mặt cầu được tái tạo trong cả hai giai đoạn xây dựng và khai thác. Trong giai đoạn khai thác, lan can và gờ chắn cũng được mô hình. Các khối neo, các phần tử cáp thấp, gờ chắn và lan can được làm bằng bản nhựa ABS.

(Bảng 2) Bảng thông số mô hình mặt cắt trong giai đoạn khai thác

Tên thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị thực	Tỷ lệ		Giá trị của mô hình	
				Flutter	Gió xoáy cộng hưởng	Flutter	Gió xoáy cộng hưởng
Chiều dài bản	L	m	99	1/56,25		1,760	
Bề rộng bản	B	m	15,7	1/56,25		0,279	
Chiều cao bản	H	m	1,95	1/56,25		0,0347	
Khối lượng tương đương	m_{cq}	kg/m	$3,62 \times 10^4$	$1/56,25^2$		11,44	
Khối lượng quán tính tương đương	J_{meq}	kg.m ² /m	$1,1166 \times 10^6$	$1/56,25^4$		0,1115	
Bán kính xoay tròn tương đương	r_e	m	5,554	1/56,25		0,0987	
Tần số dao động thẳng cơ bản	f_v	Hz	0,3302	7,05 7,21	17,29	2,33 2,38	5,85
Tần số xoắn cơ bản	f_t	Hz	0,8613	7,04 7,15	17,34	6,06 6,16	15,31
Tỷ lệ tần số	ε		2,609	/	/	2,60 2,59	2,62
Tỷ số giảm chấn thẳng đứng	ξ_v	%	2,0	/	/	0,18-0,24 1,09-1,10	0,97-1,10
Tỷ số giảm chấn xoắn	ξ_t	%	2,0	/	/	0,21-0,22 0,88-0,96	0,90-0,97

Các thông số của vật nguyên mẫu và các thông số của mô hình mặt cắt được sử dụng theo quan niệm theo cách tương tự như trong bảng 2 đối với giai đoạn sử dụng và trong bảng 3 đối với giai đoạn xây dựng nhịp hằng dài nhất. Tần số dao động riêng của các thức dao động uốn và xoắn của giai đoạn sử dụng và giai đoạn xây dựng nhịp hằng nhất được quyết định tương tự như các thông số mềm dẻo.

Khối lượng và mô men quán tính khối lượng của mô hình mặt cắt được thiết kế dựa trên khối lượng và mô men quán tính khối lượng của cầu thực tế. Điều này quyết định đến đặc trưng dao động của cầu và hiệu ứng dao động của tháp và của cáp. Tỷ số giảm chấn được đo của các dao động uốn và xoắn của mô hình có sai khác chút ít với thực tế.

Hai trường hợp tỷ số giảm chấn được quyết định trong thí nghiệm flutter và tần số mô hình sẽ khác chút ít so với hai trường hợp tỷ số giảm chấn bởi vì ảnh hưởng của việc thêm vào các phương pháp giảm chấn. Các trường hợp thí nghiệm, phân bố tốc độ gió thí nghiệm và tỷ lệ tốc độ gió được thống kê trong bảng 4.

(Bảng 3) Bảng thông số mô hình mặt cắt trong giai đoạn thi công

Tên thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giá trị thực	Tỷ lệ		Giá trị của mô hình	
				Flutter	Gió xoáy cộng hưởng	Flutter	Gió xoáy cộng hưởng
Chiều dài bản	L	m	99	1/56,25		1,760	
Bề rộng bản	B	m	15,7	1/56,25		0,279	
Chiều cao bản	H	m	1,95	1/56,25		0,0347	
Khối lượng tương đương	m_{eq}	kg/m	$4,6036 \times 10^4$	1/56,25 ²		14,55	
Khối lượng quán tính tương đương	J_{meq}	kg.m ² /m	$1,1704 \times 10^6$	1/56,25 ⁴		0,11691	
Bán kính xoay tròn tương đương	r_e	m	5,042	1/56,25		0,0896	
Tần số dao động thẳng cơ bản	f_v	Hz	0,3068	6,75	16,69	2,07	5,22
Tần số xoắn cơ bản	f_t	Hz	0,8585	6,77	16,66	5,81	14,51
Tỷ lệ tần số	ε		2,798	/	/	2,80	2,78
Tỷ số giảm chấn thẳng đứng	ξ_v	%	2,0	/	/	0,10-0,14	0,82-0,90
Tỷ số giảm chấn xoắn	ξ_t	%	2,0	/	/	0,16-0,20	0,82-1,03

5.4. TÍNH TOÁN CHỐNG GIÓ KIỂM TRA FLUTTER CỦA CẦU KIẾN

(Bảng 4) Bảng khái quát chung về kết cấu cầu chính

Loại cầu	Cầu dây văng bê tông dự ứng lực 3 nhịp liên tục
Chiều dài cầu	370m (85m + 200m + 85m)
Chiều rộng cầu	Tổng chiều rộng 16,7m, làn xe chạy 10,5m, làn đi bộ 1,5m × 2
Độ dốc dọc cầu	4%
Bán kính ngang	$R = \infty$
Kết cấu móng	Cọc khoan nhồi
Dầm chủ	Dầm hộp 3 khoang đúc sẵn, chiều cao dầm 2.2m
Tháp chủ	Kết cấu RC hình chữ H h = 51,5m (tính từ đỉnh trụ) h = 79,5 (tính từ đỉnh bệ)
Dây văng	2 mặt phẳng dây, bố trí hình dẻ quạt, 9 tầng

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. ENPC. *Conportement de vent au ponts*. Paris. 2003.
2. J. D. Holme (2001). *Wind Loading of Structures*. E&EP Spon Press.
3. Nippon Koei Co.Ltd. *Planning and design of Cable stayed Bridge*, Volum 1: Instruction of theories and methods. Hanoi. 2002.
4. Nippon Koei Co.Ltd. *Planning and design of Cable stayed Bridge*, Volum 2: *Practices of basic analysis methods*. Hanoi. 2002.
5. Rene Walther (2000). *Ponts Haubanes*.
6. E. Simiu, R.Scanlan (1976). *Wind Effects on Structures*, John-Wiley and Sons.
7. P.SACH (1978). *Wind Forces in Engineering*. Pergamon Press.
8. E.L Houghton, N.B. Carruther (1979). *Wind Forces on Buidings and Structures*. Edward Arnold Press.
9. H. Sockel (1994). *Wind-exiced Vibrations od Structures*. Springer-Verlag.
10. G. Vincent (1972). *A Summary od Laboratory and Field Studies in the United on Wind Effects on Suspension Bridges*. Proceedings of Inter. Conf. of Wind Effects on Struct. and Buildings. Heathrow, London.
11. V. Xedov (1986). *Các phương pháp đồng dạng và thử nguyên trong cơ học*. NXB KHKT.
12. D.E.J. Walshe (1972). *The Use of Models to Predict the Oscillatory Behavior of Suspension Bridges*. Proceedings of Inter. Conf. of Wind Effects on Struct. and Buildings. Heathrow, London.
13. R.E. Whitebread (1972). *Model Simulation of Wind Effects on Structures*. Proceedings of Inter. Conf. of Wind Effects on Struct. and Buildings. Heathrow, London.
14. Đại học Đàng Từ-Trung Quốc. *Hướng dẫn thiết kế chống gió cho cầu dây*, bản dịch sang tiếng Việt. Đại học Giao thông vận tải. Hà Nội. 2003.
15. Hiệp hội đường bộ Nhật Bản. *Hướng dẫn thiết kế chống gió cho cầu đường bộ*, bản dịch sang tiếng Việt. Đại học Giao thông vận tải. Hà Nội. 2005.
16. Lê Thái Hoà, Bùi Xuân Học. *Nghiên cứu xây dựng mô hình vật lý kết cấu cầu trong thí nghiệm Hầm gió*. Đề tài nghiên cứu cơ sở, Viện KHCN GTVT. 2003.
17. Lê Thái Hoà, Nguyễn Thạch Bích (2003). *Một số xác định trong thiết kế xây dựng Hầm gió phục vụ công tác thử nghiệm mô hình vật lý kết cấu công trình cầu*. Tuyển tập hội nghị KHCN Viện KHCN GTVT.
18. Lê Thái Hoà, P.X.Tăng, Bùi Xuân Học. *Xây dựng mô hình vật lý và xác định các hệ số động lực của tiết diện dầm cầu trong Hầm gió*. Tuyển tập hội nghị KHCN Viện KHCN GTVT. 2003.
19. Y. Kobu. *Tác dụng của gió trong thiết kế cầu*. Tạp chí Cầu Đường Việt Nam, số 5. 2000.
20. Liên danh JBSI-PCI-TEDI-HYDER (1999). *Design Report of main Cable stayed Bridge Superstructure (Bai Chay Bridge)*
21. Liên danh SHIMISU-SUMITOMO-MITUSI (2004). *Kế hoạch nghiên cứu Hầm gió cho Dầm và tháp cầu sử dụng Mô hình khí động lực học 3D cho cầu Bãi Cháy*.
22. Nguyễn Việt Trung, Vũ Văn Toàn. *Về tính toán cộng hưởng xoáy của cầu dây xiên và cầu treo chịu tải trọng gió*. Tạp chí Cầu Đường Việt Nam. Số 6-2001.
23. Nguyễn Việt Trung, Bùi Hữu Hường. *Phân tích ổn định khí động cho cầu dây văng nhịp lớn*. Tạp chí Cầu Đường Việt Nam. Số 6-2002.
24. Viện KHCN GTVT. *Báo cáo Đề tài nghiên cứu “Nghiên cứu mất ổn định khí động lực dưới tác dụng của hiện tượng Flutter cho cầu dây văng”*. Hà Nội. 2002.

MỤC LỤC

Lời nói đầu	3
Chương 1. Cơ sở lý thuyết về tính toán chống gió cho cầu dây	
Mở đầu	5
1.1. Khái niệm chung về tải trọng gió	10
1.2. Mục đích và phương pháp thiết kế chống gió	15
1.3. Các yếu tố quan trọng trong thiết kế chống gió	16
1.4. Khái niệm về hiệu ứng khí động học đối với cầu dây	17
1.5. Các bài toán cơ bản về động học kết cấu cầu	28
1.6. Các lực khí động học	30
1.7. Khái niệm về tính toán Flutter	38
1.8. Phương pháp tính toán kết cấu chịu Flutter xoắn	45
1.9. Những biện pháp cấu tạo để tránh mất ổn định khí động cho kết cấu cầu dây	48
Chương 2. Mô hình bài toán khí động cầu dây văng trong giai đoạn thi công hằng tương ứng với các kiểu kết cấu khác nhau	
2.1. Cơ sở tính toán ổn định cầu dây văng trong giai đoạn thi công, đặc biệt là thi công hằng	51
2.2. Ví dụ về cầu Bãi Cháy	51
Chương 3. Các phương pháp kết hợp tính toán lý thuyết và thí nghiệm trên mô hình trong hầm gió	
3.1. Khái niệm	53
3.2. Vấn đề đồng dạng trong các thí nghiệm mô hình vật lý thu nhỏ	53
3.3. Xác định hệ số khí động lực trong hầm gió	55
Chương 4. Hướng dẫn tính toán chống gió động học đối với cầu dây	
4.1. Nguyên tắc chung	67
4.2. Nguyên tắc cơ bản của thiết kế chống gió	73
4.3. Đặc tính gió gần mặt đất được xét trong thiết kế chống gió	78
4.4. Tải trọng gió	87
4.5. Đặc tính động lực của các kết cấu cầu	96
4.6. Ổn định khí động lực học của cầu	103
	165

4.7. Dao động biên độ hạn chế	120
4.8. Thí nghiệm khí động	131
4.9. Khống chế dao động do gió gây ra đối với cầu dây	139
4.10. Kiểm tra chống gió trong giai đoạn thi công	144
Chương 5. Một số ví dụ thiết kế chống gió cầu dây	
5.1. Thiết kế chống gió cầu treo Hồ Môn (Quảng Đông - Trung Quốc)	146
5.2. Thiết kế chống gió cầu dây văng Dương Phổ (Thượng Hải - Trung Quốc)	154
5.3. Tính toán kiểm tra Flutter của cầu Rạch Miễu	159
5.4. Tính toán chống gió kiểm tra Flutter của cầu Kiên	162
Tài liệu tham khảo	164

CƠ SỞ THIẾT KẾ CHỐNG GIÓ ĐỐI VỚI CẦU DÂY NHỊP LỚN

Chịu trách nhiệm xuất bản:

BÙI HỮU HẠNH

Biên tập:

NGUYỄN MINH KHÔI

Chế bản điện tử:

VŨ HỒNG THANH

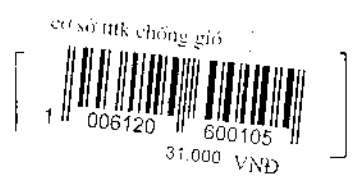
Sửa bản in:

NGUYỄN MINH KHÔI

Trình bày bìa:

NGUYỄN HỮU TÙNG

In 1000 cuốn khổ 19×27 cm, tại Xưởng in Nhà xuất bản Xây dựng. Giấy chấp nhận đăng ký kế hoạch xuất bản số 142-2006/CXB/29-10/XD ngày 24/02/2006. In xong nộp lưu chiểu tháng 10/2006.



Giá :31.000^d