

Phân tích một số sơ đồ mẫu theo mô hình Strut and Tie (mô hình giàn ảo) trong tính toán kết cấu bê tông cốt thép theo Tiêu chuẩn 22TCN-272-05, TCVN11823:2017

■ TS. NGUYỄN LỘC KHA

Trưởng Đại học Giao thông vận tải - Phân hiệu tại TP. Hồ Chí Minh

TÓM TẮT: Bài báo phân tích một số sơ đồ mẫu theo mô hình Strut and Tie (mô hình giàn ảo) để sử dụng tính toán kết cấu bê tông cốt thép cho các vùng kết cấu có trường ứng suất và biến dạng nhiều loạn lớn. Đó là các vùng có sự tập trung tải trọng, các vùng có sự thay đổi tiết diện, các vùng có cấu trúc thiết kế phức tạp không liên tục về tính học nhằm đảm bảo bố trí đủ hàm lượng cốt thép cho kết cấu.

TỪ KHÓA: Mô hình Strut and Tie, tính toán kết cấu bê tông cốt thép.

ABSTRACT: This article analyzes some sample diagrams of Strut and Tie model to use for the calculation of reinforced concrete structure under areas with large stress field and disturbed diformation. These areas have a concentration of loads, cross-sectional changes, a statically discontinuous design structure to reinforce enough steel content for the concrete structure

KEYWORDS: Strut and Tie models, calculating reinforced concrete structures

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc tính toán kết cấu bê tông cốt thép đều dựa trên lý thuyết dầm với giả thiết mặt cắt dầm trước và sau khi biến dạng vẫn phẳng (Giả thiết Bernoulli). Điều này chỉ phù hợp cho những khu vực của kết cấu có trường ứng suất thay đổi đều đặn. Trong thực tế, hình thức chịu lực của kết cấu rất phức tạp, có nhiều vùng trong kết cấu có trường ứng suất và biến dạng nhiều loạn lớn nên việc áp dụng giả thiết của Bernoulli không còn đúng nữa. Đó là các vùng có sự tập trung tải trọng, các vùng có sự thay đổi tiết diện, các vùng có cấu trúc thiết kế phức tạp không liên tục về tính học..., trường ứng suất và biến dạng có sự nhiễu loạn lớn gây ra các ứng suất kéo ngang T, làm cho kết cấu bê tông cốt thép bị nứt ngang, mối quan hệ ứng suất - biến dạng không còn phân bố theo

quy luật tuyến tính (định luật Hook).

Các vùng có sự nhiễu loạn lớn về trường ứng suất và biến dạng có ứng xử chịu lực rất phức tạp và rất dễ phá vỡ kết cấu khi bố trí không đúng và không đủ hàm lượng thép. Do đó, cần phải được xem xét về cấu tạo và thiết kế một cách đầy đủ, chính xác dựa trên các phương pháp mô hình hóa và tính toán thích hợp. Việc xem xét một cách không đầy đủ hoặc không nhất quán các vùng có sự nhiễu loạn lớn về trường ứng suất mà chỉ dựa trên kinh nghiệm là một trong những nguyên nhân chính của sự kém chất lượng hay thậm chí gây ra hư hỏng công trình.

2. CÁC PHƯƠNG PHÁP XÂY DỰNG SƠ ĐỒ THEO MÔ HÌNH STRUT AND TIE

2.1. Phương pháp dòng lực

Phương pháp dòng lực được thực hiện theo các nguyên tắc sau:

- Một lực luôn tìm đường ngắn nhất để đến gối. Đường đi của lực này được gọi là dòng lực;
- Các dòng lực không được phép giao nhau. Chúng luôn được bắt đầu và kết thúc tại trọng tâm của diện tích đặt tải hoặc diện tích gối tựa;
- Dòng lực phải là ngắn nhất và không có điểm gãy. Chiều của dòng lực là chiều của tải trọng;
- Lực tập trung khi vào trong kết cấu có xu hướng phân bố đều vào trong bê tông nên các dòng lực có độ cong lớn tại gần nơi đặt lực;
- Tại những vị trí cong của dòng lực xuất hiện lực chuyển hướng tạo nên sự cân bằng theo phương vuông góc.

2.2. Phương pháp phân bố ứng suất đàn hồi

Quý đạo ứng suất trong kết cấu bê tông có thể mô tả chính xác bằng phương pháp phân tích đàn hồi. Dựa vào quan điểm kết cấu có thiết kế hợp lý là kết cấu có dòng lực ít thay đổi trước và sau khi nứt. Vì vậy, có thể xây dựng được mô hình Strut and Tie gồm các thanh hướng theo các phương ứng suất chính, vị trí của hợp lực chuyển hướng được xác định từ sự phân bố ứng suất trong từng mặt cắt.

2.3. Phương pháp dựa trên các sơ đồ Strut and Tie mẫu

Trong thực tế tính toán, một số sơ đồ tiêu biểu xuất

hiện lặp đi, lặp lại trong nhiều trường hợp và nhiều tổ hợp khác nhau, thậm chí trong những kết cấu rất khác biệt. Lý do là chỉ có một số lượng hạn chế các vùng có ứng suất nhiều động lớn có các dòng ứng suất thực sự khác nhau. Do đó, có thể vận dụng các mô hình mẫu được giới thiệu trong các tiêu chuẩn.

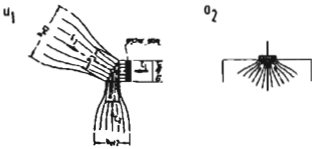
3. MỘT SỐ TRƯỜNG ỨNG SUẤT VÀ MÔ HÌNH STRUT AND TIE TƯƠNG ỨNG

3.1. Nút

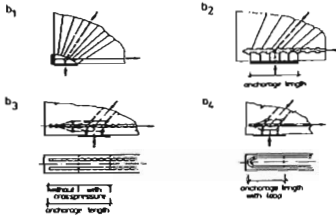
Nút trong mô hình Strut and Tie là nơi giao nhau của ba hay nhiều hơn các thanh chống và thanh giằng thẳng và được sử dụng để mô hình hóa các khu vực chuyển hướng của nội lực hay trường ứng suất. Kích thước của vùng nút được xác định trên cơ sở thỏa mãn điều kiện chịu lực của bản thân vùng nút và các kích thước yêu cầu của các thanh đi vào nút đó. Có 4 kiểu nút thường gặp phụ thuộc vào sự phối hợp giữa các thanh chống và giằng.

+ Nút CCC: Compression - Compression - Compression (ba thanh nén gặp nhau tại nút);

Hình 3.1



+ Nút CCT: Compression - Compression - Tension (hai thanh nén và một thanh kéo gặp nhau tại nút);



Hình 3.2

+ Nút CCT gồm một thanh chống chéo chịu nén và một phần lực gối tựa được làm cân bằng bởi lực:

- Cốt thép neo do một bản neo phía sau nút (Hình 3.2b1);

- Lực dính trong nút (Hình 3.2b2);
- Lực dính trong nút và phía sau nút (Hình 3.2b3);
- Lực dính và áp suất bán kính (Hình 3.2b4).

+ Nút CTT: Compression - Tension - Tension (một thanh nén và hai thanh kéo gặp nhau tại nút);

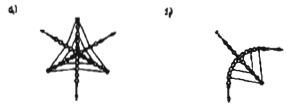


Hình 3.3

- Hai thanh thép dính nhau (Hình 3.3c1);

- Ứng suất bán kính tứ thanh thép bị uốn cong theo bán kính đó (Hình 3.3c2).

+ Nút TTT (Tension - Tension - Tension), trong đó thay thế thanh chống chịu nén ở trên bằng một thanh giằng thép dính chịu kéo (loại này ít gặp trong tính toán).

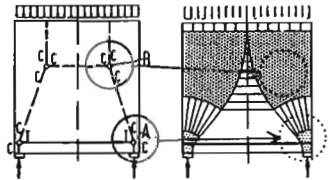


Hình 3.4

Vây với kiểu nút trên có thể chia làm hai loại nút chính:

- Nút tập trung: Nếu một trong những thanh chống hay giằng đại diện một trường ứng suất tập trung, khuynh hướng các lực là tập trung cục bộ (nút A);

- Nút phân tán: Khi các trường ứng suất bề tổng rộng nối với nhau hay nối với các thanh giằng chịu kéo mà bao gồm nhiều thanh phân bố sát nhau (nút B).



Hình 3.5

• Tính duyệt nút: Một cách tổng quát, điều kiện cường độ của bê tông vùng nút được xác định theo công thức sau:

$$\frac{P_u}{A_n} \leq f_{n,eff} \quad (1)$$

Với P_u là nội lực tính toán của thanh đi vào nút, A_n là diện tích tính toán của mặt chịu lực của nút và $f_{n,eff}$ là cường độ chịu nén có hiệu của bê tông vùng nút được xác định như sau:

Vùng nút được bao bọc bởi mặt gối và các thanh nén

$$f_{n,eff} = 0,85\phi f'_c$$

Vùng nút neo thanh chịu kéo theo một hướng:

$$f_{n,eff} = 0,75\phi f'_c$$

Vùng nút neo thanh chịu kéo theo nhiều hướng:

$$f_{n,eff} = 0,65\phi f'_c$$

3.2. Các thanh chống và thanh giằng gồm các thanh nén và thanh kéo

- Các thanh nén trong mô hình Strut and Tie được mô hình hóa là các thanh bê tông hoặc bê tông cốt thép với các yêu cầu: kích thước hình học của thanh nén được xác định trên cơ sở phù hợp về cấu tạo hình học với các vùng nút mà thanh nén đó đi đến và yêu cầu về lực.

Công thức tổng quát xác định cường độ danh định của thanh nén là:

$$P_u = f_{cu} \cdot A_{cs} + f_y \cdot A_{st} \quad (2)$$

$$\text{với: } f_{cu} = \frac{f_c'}{0,8 + 170\epsilon_1} \leq 0,85f_c' \quad (3)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 + (\epsilon_2 + 0,02) \cdot \cot g^2 \alpha_s \quad (4)$$

Trong đó:

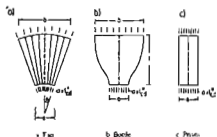
A_{cs} - Diện tích mặt cắt ngang có hiệu của thanh nén;

A_{st} - Diện tích cốt thép tham gia chịu nén trong thanh nén;

f_{cu} - Cường độ của bê tông trong thanh nén;

- Biến dạng kéo chính vuông góc với trục của thanh nén;
- Biến dạng kéo của bê tông trong các thanh kéo;
- Góc nhỏ nhất giữa thanh kéo và thanh nén đang xét.

Theo Schlaich có ba kiểu trường nén cho các mô hình Strut and Tie là hình quạt, hình cổ chai, hình trụ được mô tả như sau:



Hình 3.6

- Các thanh kéo trong mô hình Strut and Tie là các thanh thép thanh hoặc thép dự ứng lực được xác định trên cơ sở diện tích cần thiết để đủ bố trí diện tích cốt thép chịu kéo phù hợp với các quy định về khoảng cách và thỏa mãn điều kiện giới hạn ứng suất của vùng nút. Ngoài ra, do kích thước vùng nút và của thanh kéo có quan hệ với nhau nên việc bố trí cốt thép của thanh kéo cũng phải được xem xét trong mối quan hệ với kích thước của thanh nén. Diện tích cốt thép trong các thanh kéo được xác định trên cơ sở nội lực của thanh kéo và cường độ chịu kéo của cốt thép.

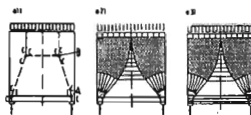
Công thức tổng quát xác định sức kháng của thanh kéo là:

$$P_n = A_s \cdot f_y + A_{ps} (f_{pe} + f_y) \quad (5)$$

Công thức này được xây dựng dựa trên nguyên lý đồng biến dạng và với giả thiết mô-đun đàn hồi của thép thường và thép dự ứng lực là bằng nhau. Tại thời điểm ban đầu, ứng suất trong cốt thép thường coi như bằng không, ứng suất trong cốt thép dự ứng lực là f_{pe} . Do đó, tại thời điểm ứng suất trong cốt thép thường đạt giá trị f_y thì ứng suất trong cốt thép dự ứng lực là $f_{pe} + f_y$. Nếu không bố trí thép dự ứng lực thì $A_{ps} = 0$.

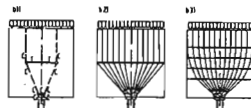
4. MỘT SỐ MÔ HÌNH STRUT AND TIE VÀ TƯƠNG ỨNG LÀ CÁC TRƯỜNG ỨNG SUẤT VÀ CỐT THÉP CHO CÁC VÙNG VÀ KẾT CẤU CÓ ỨNG SUẤT NHIỀU LOẠN LỚN PHỔ BIẾN TRONG KẾT CẤU (VÙNG KHÔNG LIÊN TỤC VỀ ỨNG SUẤT)

4.1. Dầm cao chịu tải trọng phân bố đều



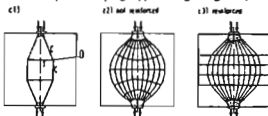
Hình 4.1

4.2. Khu vực gối tựa



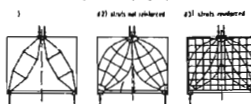
Hình 4.2

4.3. Khu vực tải trọng tập trung và gối tựa



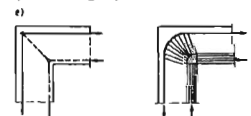
Hình 4.3

4.4. Dầm cao chịu tải trọng tập trung



Hình 4.4

4.5. Tại các khung chịu mô-momen



Hình 4.5

Như vậy, từ việc phân tích trên sẽ là cơ sở cho việc lựa chọn sơ đồ, phân tích tính toán ở các vùng có nhiều loạn ứng suất lớn của kết cấu bê tông cốt thép phù hợp và chính xác.

5. VÍ DỤ MINH HỌA

Trong thực tế thiết kế, một số trụ cấu dạng hình vè quạt đang được sử dụng rộng rãi, nhiều kỹ sư thiết kế

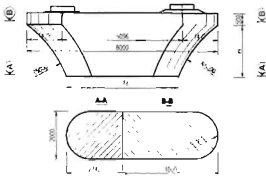
tính toán theo các giả thiết của Bernoulli nên khi đưa vào sử dụng thường xuất hiện các vết nứt dọc trụ cầu gây nguy hiểm do thiếu cốt thép chịu lực kéo và cốt thép chịu lực nén.



Hình 5.1: Trụ cầu bê tông cốt thép

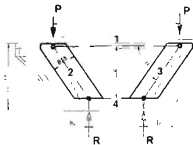
Hình 5.1

Để đảm bảo đủ cốt thép cho thân trụ thì thân trụ cần phải được xem như một tường cao và phải được tính theo mô hình Strut and Tie như hình vẽ:



Hình 5.2: Kích thước trụ cầu dạng tường rỗng quạt điển hình

Từ sơ đồ kích thước trụ cầu rỗng quạt điển hình trên và từ mô hình dầm cao chịu tải trọng tập trung dễ dàng xác định vị trí của thanh chịu kéo 1, thanh chịu nén 2 và 3 được xác định thông qua trị số cánh tay đòn nội lực là $j_d = 0,61 = 2,072m$, góc xiên $\theta = 55^{\circ}37'58''$ và $b_1 = 1,26m$, $b_2 = 1,266m$ theo nguyên tắc ứng suất nén do tải trọng phân bố đều lên chân trụ.



Hình 5.3: Mô hình tính toán theo Strut and Tie cho trụ cầu rỗng quạt

Lực kéo trong thanh giằng 1 nếu không bố trí dự ứng lực phải thỏa mãn điều kiện:

$$T_1 \leq \Phi \cdot A_{st} \cdot f_t \quad (6)$$

Trong đó:

$\Phi = 0,9$ - Hệ số sức kháng kéo đối với bê tông cốt thép thường;

f_t - Giới hạn chảy của cốt thép.

Lượng cốt thép chịu kéo tối thiểu của thanh 1 là:

$$A_{st}^{min} = \frac{T_1}{\Phi \cdot f_t} \quad (7)$$

Lực nén trong thanh chống 2, 3 có bố trí cốt thép phải thỏa mãn điều kiện:

$$C_2 = C_3 \leq \Phi [f_{cr} \cdot A_{cc} + f_c \cdot A_{cr}] \quad (8)$$

Trong đó:

A_{cc} - Diện tích bê tông hữu hiệu của thanh chống;

A_{cr} - Diện tích cốt thép trong thanh chống;

$\Phi = 0,7$ - Hệ số sức kháng nén đối với bê tông cốt thép thường.

Khi đó, lượng cốt thép tối thiểu trong thanh chống 2, 3 là:

$$A_{cr} = \frac{1}{f_c} \left(\frac{C_2}{\Phi} - f_{cr} \cdot A_{cc} \right) \quad (9)$$

Trong đó:

$f_{cr} = \frac{f_c}{0,8 + 170 \cdot \epsilon_1} \leq 0,85 \cdot f_c$ - Ứng suất nén giới hạn trong thanh chống;

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 + (\epsilon_2 + 0,002) \cdot \cos^2(\theta);$$

ϵ_2 - Biến dạng kéo trong bê tông theo hướng giằng chịu kéo.

Kết quả tính toán theo mô hình cột chữ T và kiểm toán theo sơ đồ dầm hằng ngăn cho mặt cắt tại ngàm theo TCVN 11823:2017 (điểm cách tim gối 1 đoạn là R/3 với R là bán kính bo tròn thân trụ) và kết quả tính toán theo mô hình Strut and Tie lượng cốt thép tối thiểu được thể hiện trong Bảng 5.1.

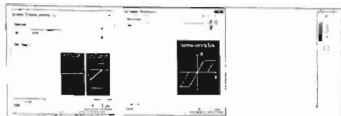
Bảng 5.1. Kết quả tính lượng cốt thép tối thiểu trong giai đoạn thi công và khai thác của trụ cầu rỗng quạt với cùng một tải trọng tác dụng

Thanh	Lượng cốt thép tối thiểu tính theo Strut and Tie (cm ²)		Lượng cốt thép tính theo giả thiết Bernoulli thông thường (cm ²)
	Thi công	Khai thác	
1	177,30	322,04	30,16
2 và 3	313,00	642,62	101,43

Kết quả tính toán theo mô hình Strut and Tie phù hợp với kết quả phân tích theo phần mềm ANTENA với mô phỏng biến dạng vật liệu phi tuyến. Bê tông được mô phỏng là vật liệu biến dạng phi tuyến ba chiều và cốt thép được mô phỏng là vật liệu biến dạng theo mô hình tuyến tính (Hình 5.4). Tải trọng tác dụng lên kết cấu được mô hình dưới dạng áp lực tác dụng lên bề mặt tấm kê trong giai đoạn khai thác.

Theo kết quả mô phỏng, do lượng cốt thép quá ít dẫn đến ứng suất trong cốt thép đạt đến giới hạn chảy và ứng suất chính trong bê tông đều vượt quá giới hạn kháng nứt của bê tông thân trụ là $0,8 \cdot f_c = 0,8 \cdot 0 \cdot \sqrt{f_c}$ dẫn đến phát sinh vết nứt theo hướng thẳng đứng.

Kết quả mô phỏng theo ANTENA cũng phù hợp với kết quả tính theo mô hình Strut and Tie. Điều này khẳng định nguyên nhân phát sinh vết nứt là do thiết kế lớp cốt thép chịu kéo mặt trên trụ cầu bị thiếu khi tính kết cấu theo giả thiết Bernoulli thông thường.



Hình 5.4: Sơ đồ tính thân trụ rẽ quạt

Nhận xét: Như vậy, lượng thép của thanh giằng 1, thanh chống 2 và 3 nếu tính theo giả thiết Becnuli sẽ không đủ khả năng chịu lực và làm giảm ứng suất giới hạn trong bê tông f_{cu} của thanh chống 2 và 3, điều này dẫn đến việc xê rách gần như thẳng đứng trên thân trụ như (hình trên). Sơ đồ tính toán cũng phù hợp với sơ đồ mẫu của tương cao chịu tải trọng tập trung.

6. KẾT LUẬN

Đa phần các hồ sơ thiết kế đã áp dụng phương pháp mặt cắt tính toán truyền thống như đã trình bày trên hoặc có thể đã bỏ qua tính toán mà chỉ bố trí cốt thép theo kinh nghiệm... Qua kết quả phân tích và tính toán bằng mô hình chống giằng (Strut and Tie) có thể kết luận nguyên nhân nút trụ cầu bê tông cốt thép thường có dạng tương rẽ quạt là do áp dụng phương pháp tính toán thiết kế chưa phù hợp.

Phương pháp tính toán thiết kế theo mô hình chống giằng còn khá mới. Mặt khác, trong tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN-272-05, TCVN 11823:2017 đề cập còn rất sơ sài, nên việc áp dụng phương pháp này để tính toán thiết kế trụ dạng tương rẽ quạt và các kết cấu tương tự còn rất hạn chế trong các thiết kế công trình cầu.

Việc chọn sơ đồ Strut and Tie còn làm nhiều kỹ sư thiết kế lúng túng.

Bài báo đã nêu một số mô hình Strut and Tie phù hợp với các hình thức chịu lực của nhiều dạng kết cấu, có thể giúp cho các kỹ sư thiết kế, tư vấn thẩm tra và các đơn vị quản lý tham khảo, áp dụng cho công tác thiết kế, thẩm tra nhằm đảm bảo đủ khả năng chịu lực của kết cấu, tránh hiện tượng hư hỏng phải tốn kém nhiều chi phí sửa chữa khắc phục và giảm tuổi thọ, thẩm mỹ công trình. Bài báo cũng có thể sử dụng làm tài liệu giảng dạy cho sinh viên trong việc phân tích kết cấu và tính toán kết cấu công trình cầu.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Bộ GTVT (2005), *Tiêu chuẩn thiết kế cầu 22TCN272-05*, NXB. GTVT, Hà Nội.
- [2]. Ngô Đăng Quang, Nguyễn Duy Tiến, *Kết cấu bê tông cốt thép*, NXB. GTVT, Hà Nội.
- [3]. Hồ Hữu Chính (2008), *Phân tích ứng xử và thiết kế kết cấu bê tông cốt thép*, NXB. Xây dựng, Hà Nội.
- [4]. Nguyễn Việt Trung, Dương Tuấn Minh, Nguyễn Thị Tuyết Trinh (2005), *Tính toán kết cấu bê tông cốt thép theo mô hình giàn dờ*, NXB. Xây dựng.
- [5]. Nguyễn Quang Dũng, Ngô Châu Phương (2019), *Mô hình chống giằng và nguyên nhân gây nứt trụ cầu*, Tạp chí Khoa học - Công nghệ.

[6]. J. Schelaich, K. Schaefer (1991), *Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models*, Journal of Structural Engineering, vol.69.

[7]. B. T. Martin, D. H. Sanders (2007), *Verification and implementation of strut-and-tie model in LRFD Bridge Design Specifications*, National Cooperative Highway Research Program.

[8]. M. P. Bendsoe, O. Sigmund (2003), *Topology optimization - Theory, Methods and Applications*, Springer.

[9]. Q. Q. Liang (2005), *Performance-based optimization of structures*, Spon Press - Taylor and Francis Group.

Ngày nhận bài: 04/01/2020

Ngày chấp nhận đăng: 25/02/2020

Người phản biện: TS. Trần Xuân Hòa

ThS. Đỗ Thành Hiếu