PHÂN TÍCH ĐA THAM SỐ MẶT CẮT DẦM CHỦ DẠNG TỔ HỢP CỦA CẦU TRỤC MỘT DẦM

MULTI-PARAMETRIC ANALYSIS FOR A COMBINED CROSS-SECTION OF A SINGLE GIRDER OVERHEAD CRANE

TS. **Đoàn Văn Tú**
Trường Đại học Giao thông Vận tải

TÓM TẮT

Trong tính toán, thiết kế, chế tạo kết cấu thép cầu trục, việc đưa ra được kích thước hình học hợp lý giúp tiết kiệm chi phí vật liệu nhưng vẫn đảm bảo yêu cầu cần thiết về khả năng chịu lực của kết cấu và khả năng làm việc của thiết bị. Trên cơ sở lý thuyết phần tử hữu hạn (PTHH), mô hình kết cấu thép cầu trục một dầm có mặt cắt dạng tổ hợp được xây dựng dưới dạng code trên phần mềm ANSYS APDL để mô phỏng và xác định biến dạng, nội lực của kết cấu. Kết quả mô phỏng được xác nhận với phương pháp tính toán truyền thống theo lý thuyết sức bền vật liệu. Phân tích đa tham số hình học kích thước mặt cắt dầm chủ đã được thực hiện để xác định quy luật ảnh hưởng của chúng đến ứng suất. Mô hình thu được giúp tham số hóa các thông số đầu vào, giảm thời gian tính toán, tối ưu hóa mặt cắt dầm chủ, giảm chi phí và phục vụ tính toán thiết kế cầu trục tại Việt Nam.

Từ khóa: *Phân tích đa tham số; Cầu trục một dầm; Kết cấu thép; Phần tử hữu hạn; ANSYS APDL.*

ABSTRACT

In the calculation, design, and manufacture of overhead crane steel structures, the proposal of reasonable geometrical dimensions helps to save material costs but still ensures the requirements of the bearing capacity of the structure and device performance. Based on the finite element method, the steel structure model of a single girder overhead crane with a combined cross-section is built in code form on ANSYS APDL software to simulate and determine the deformation and internal forc of the structure. The traditional calculation method confirms the simulation results, according to the theory of the strength of materials. Geometric multi-parameter analysis of the main girder cross-sectional dimensions was performed to determine their influence on stress. The proposal model helps to parametrize the input parameters, reduce the calculation time, optimize the main girder cross-section, reduce costs and serve the overhead crane design calculation in Vietnam.

Keywords: *Multiparametric; Single girder overhead crane; Steel structures; Finite element method; ANSYS APDL.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ứng dụng phần mềm mô phỏng trong thiết kế, chế tạo các sản phẩm cơ khí đóng vai trò quan trọng để phân tích, thử nghiệm hướng tới sản phẩm ngày càng hoàn thiện, hợp lý. Trong các lĩnh vực yêu cầu cao về độ chính xác, sai số nhỏ như: máy xây dựng, công nghiệp chế tạo máy, thiết bị hàng không, y tế... thì các phần mềm được sử dụng phổ biến như SOLIDWORKS, INVENTOR, ABAQUS, ANSYS... trong các nghiên cứu [1, 2]. Trong phạm vi của bài báo, tác giả sử dụng phần mềm ANSYS ADPL (Ansys Parametric Design Language) được viết dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) [3, 4] để mô phỏng, tính toán nội lực, ứng suất, biến dạng của cầu trục. Đây là một phần mềm dùng để mô phỏng, tính toán thiết kế công nghiệp, trong hầu hết các lĩnh vực kỹ thuật: kết cấu, nhiệt, dòng chảy, điện, điện từ, tương tác giữa các môi trường, giữa các hệ vật lý [5, 6].

Cầu trục là thiết bị dùng để xếp dỡ hàng hóa phục vụ sản xuất trong các nhà máy công nghiệp và các xưởng chế tạo, sửa chữa góp phần giải phóng sức lao động, tăng nhanh năng suất lao động và đem lại hiệu quả cao trong quá trình sản suất [7, 8]. Đã có nhiều công trình nghiên cứu về cầu trục gần đây như về điều khiển [9], tương tác của các kết cấu bánh xe khác nhau đến kết cấu [10], hoặc phân tích kết cấu [11].

Trong quá trình sản xuất, đặc biệt là kết cấu thép nói chung và kết cấu thép của cầu trục nói riêng, các sản phẩm có những sai số nhất định về hình học và vật liệu [12, 13] so với thiết kế sẽ ảnh hưởng đến khả năng chịu lực của kết cấu. Bên cạnh đó, các thiết kế không ngừng được thay đổi, cải tiến để hướng đến các thiết kế tối ưu thì số lượng các tính toán cũng như các thử nghiệm sẽ tăng. Các nghiên cứu về vấn đề này vẫn luôn cần thiết và mất nhiều chi phí. Chính vì vậy, trong quá trình thiết kế cơ khí, mô phỏng số là cần thiết để đưa ra các thiết kế có độ tin cậy, bền vững hơn và giảm chi phí thí nghiệm. Tuy nhiên, với các mô hình số ngày càng phức tạp để đưa ra kết quả có độ chính xác cao đòi hỏi thời gian tính toán lớn. Do đó, cần phát triển các phương pháp mới bổ sung cho phương pháp truyền thống để phân tích kết cấu như các kỹ thuật xấp xỉ, phương pháp chiếu, phân tích lại, mô hình giảm bậc hoặc mô hình thay thế [14, 15] làm cơ sở cho quá trình tính toán, thiết kế và sản xuất.

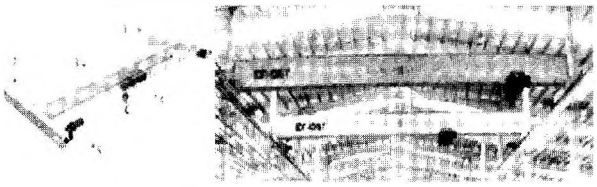
Với sự phát triển mạnh mẽ về chuỗi cung ứng, hàng loạt các khu công nghiệp mới được Chính phủ phê duyệt, nhu cầu xây dựng các nhà máy mới tăng cao, dẫn đến các thiết bị phục vụ sản xuất, lắp đặt như cầu trục sẽ có nhu cầu cao. Hiện nay, tại Việt Nam đã có nhiều doanh nghiệp sản xuất, chế tạo về các thiết bị nâng nói chung và cầu trục nói riêng. Tuy nhiên, các nghiên cứu này còn hạn chế, chủ yếu mang nặng tính chép mẫu và thiết kế an toàn. Chính vì vậy, việc làm chủ công nghệ để sản xuất trong nước là cần thiết, cần phải có nhiều nghiên cứu hơn nữa để hoàn thiện các thiết kế, tính toán và tối ưu sản phẩm. Đã có nhiều công trình nghiên cứu mô phỏng, phân tích kết cấu của các thiết bị nâng khác gần đây như [16, 17], tối ưu kết cấu cầu trục [18] và các kết cấu của các thiết bị khác [19].

Việc đưa ra được kích thước hình học hợp lý của kết cấu thép cầu trục giúp tiết kiệm chi phí vật liệu nhưng vẫn đảm bảo yêu cầu cần thiết về khả năng chịu lực của kết cấu và làm việc của thiết bị. Trên cơ sở lý thuyết PTHH, tác giả xây dựng mô hình cầu trục dạng code trên phần mềm ANSYS APDL để mô phỏng và xác định nội lực, ứng suất của kết cấu cầu trục. Kết quả mô phỏng được xác nhận với phương

pháp tính toán truyền thống bằng lý thuyết sức bền vật liệu. Với mô hình đề xuất, phân tích đa tham số hình học kích thước mặt cắt dầm chủ đã được thực hiện để xác định quy luật ảnh hưởng của chúng đến ứng suất. Mô hình xây dựng được giúp tham số hóa các thông số đầu vào, giảm thời gian tính toán, tối ưu hóa mặt cắt dầm chủ, giảm chi phí và phục vụ tính toán thiết kế cầu trục tại Việt Nam.

2. TÍNH TOÁN KẾT CẤU THÉP CẦU TRỤC MỘT DẦM THEO LÝ THUYẾT SỨC BỀN VẬT LIỆU

2.1. Mô tả kết cấu thép cầu trục



Hình 1. Cầu trục một dầm
1, 2 - Dầm đầu; 3 - Dầm chủ; 4 - Pa lăng hoặc xe con mang hàng; 5 - Động cơ di chuyển cầu trục

Cầu trục một dầm có cấu tạo gồm dầm chủ, dầm đầu, bộ phận nâng hạ hàng (Pa lăng) và bộ phận di chuyển máy. Có hai loại dầm chủ dạng định hình (thường là dạng I) và dạng tổ hợp. Trong phạm vi nghiên cứu này sẽ tập trung vào loại dầm chủ có dạng tổ hợp. Trên hình 1 là cầu trục một dầm có thông số kỹ thuật: Tải trọng nâng Q = 5 (T), khẩu độ L = 10 (m), chiều cao nâng H = 6 (m).

2.2. Tính toán kết cấu thép dầm chủ và dầm đầu theo lý thuyết sức bền vật liệu (SBVL) và Kết cấu thép máy xây dựng – xếp dỡ

2.2.1. Đường lối tính toán chung

Đường lối tính toán kết cấu thép máy xây dựng nói chung và kết cấu thép cầu trục như sau:

- Bước 1: Xác định và lựa chọn sơ đồ tính (từ kết cấu thực tế, tình hình chịu lực và liên kết thực tế để xuất sơ đồ đơn giản phù hợp để tính toán thuận tiện).

- Bước 2: Xác định được tải trọng tác dụng lên kết cấu và các trường hợp tổ hợp tải trọng tính toán.

- Bước 3: Xác định mặt cắt của kết cấu (kích thước, vật liệu...).

- Bước 4: Xác định nội lực, ứng suất của kết cấu.

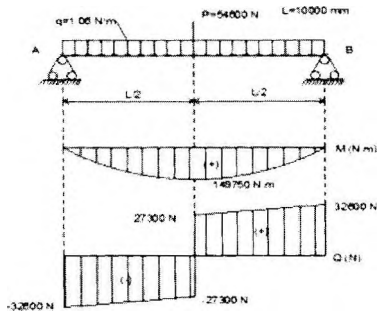
- Bước 5: Kiểm tra mặt cắt theo điều kiện độ bền, độ cứng, ổn định (tổng thể và cục bộ), mối ghép (hàn, bu lông).

2.2.2. Kết quả thu được

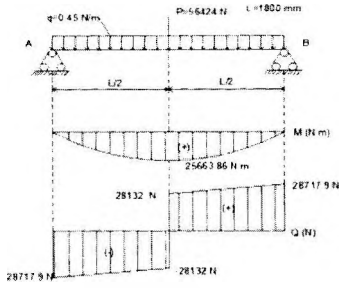
Theo tài liệu [8], để xác định kết cấu thép cầu trục một dầm nghiên cứu, tách dầm chủ và dầm đầu, tính rời rạc hai kết cấu này với sơ đồ tính dạng dầm giản đơn, với trường hợp tính cụ thể:

- Dầm chủ chịu lực tác dụng giữa dầm do Pa lăng cùng hàng nâng lớn nhất, trọng lượng bản thân và lực quán tính ngang khi phanh cơ cấu di chuyển cầu trục;

- Dầm đầu chịu lực lớn nhất khi Pa lăng nằm lệch một phía trên dầm chủ (cách 0,6 mét so với dầm đầu gần nhất), tải trọng tác dụng lên gồm Pa lăng cùng hàng nâng lớn nhất, trọng lượng dầm chủ, trọng lượng dầm đầu, lực quán tính khi phanh Pa lăng.



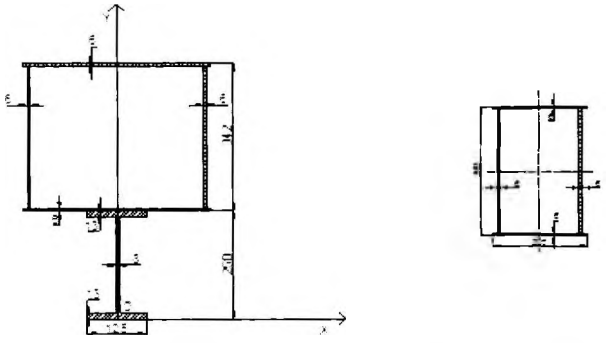
(a) Dầm chủ



(b) Dầm đầu

Hình 2. Biểu đồ nội lực của dầm chủ và dầm đầu cầu trục một dầm

Ngoài ra, kích thước mặt cắt của dầm chủ và dầm đầu cũng được xác định sơ bộ theo tài liệu [8] và các biểu đồ nội lực được xác định theo lý thuyết sức bền vật liệu trong trường hợp tính toán, kết quả về lực cắt và mô men uốn thu được như hình 2. Kiểm tra các điều kiện độ bền, độ cứng và ổn định thu được mặt cắt có dạng và kích thước như hình 3.



Hình 3. Mặt cắt ngang của dầm chủ và dầm đầu cầu trục một dầm

2.3. Tính toán kết cấu thép dầm chủ và dầm đầu theo phương pháp PTHH

2.3.1. Theo lý thuyết PTHH

Các bước giải bài toán phần tử dầm:

Bước 1: Rời rạc hóa kết cấu.

Bước 2: Thiết lập ma trận độ cứng phần tử.

Bước 3: Ghép nối phần tử để tìm ma trận độ cứng tổng thể đã kể tới điều kiện biên.

Bước 4: Thiết lập vector tải phần tử và vector tải tổng thể đã áp điều kiện biên.

Bước 5: Giải hệ phương trình tổng thể.

Bước 6: Xác định chuyển vị nút các phần tử, phản lực, nội lực, biến dạng và ứng suất.

2.3.2. Áp dụng phần mềm ANSYS APDL

ANSYS APDL có hai phương thức làm việc chính là dùng trực tiếp các công cụ trên giao diện hoặc sử dụng các code để thực hiện các câu lệnh. Việc sử dụng code trên ANSYS APDL là công cụ để tham số hóa mô phỏng bài toán, nhờ đó dễ dàng thay đổi các dữ liệu đầu vào của bài toán và thu được kết quả nhanh chóng.

Chương trình code trên ANSYS APDL được xây dựng theo thứ tự các bước như sau:

- Bước tiền xử lý: Đặt tên cho bài toán, định nghĩa kiểu phần tử, thuộc tính vật liệu, mặt cắt, xây dựng mô hình, gán mặt cắt, phần tử, chia lưới phần tử;

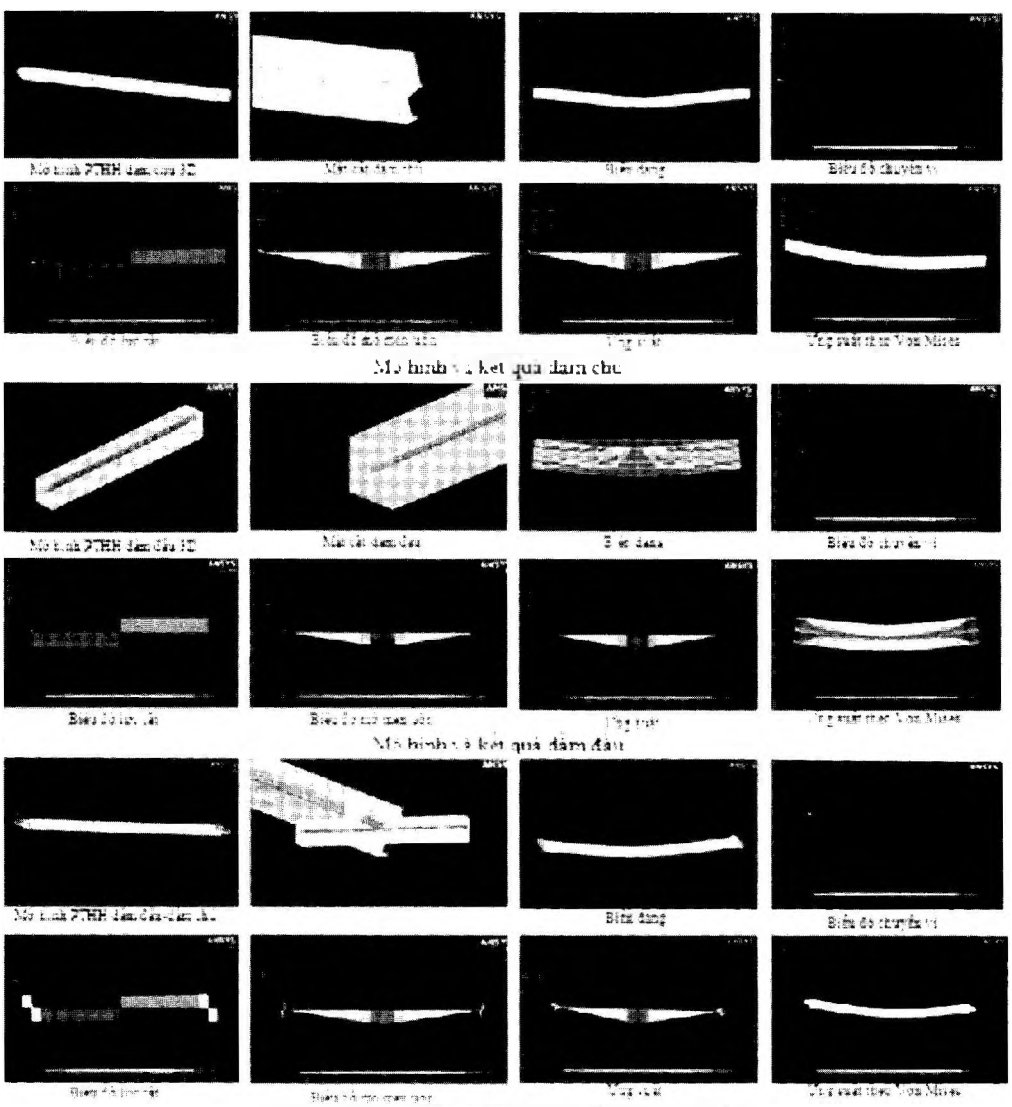
- Bước giải: Đặt điều kiện biên, đặt lực, chọn loại phân tích;

- Bước khai thác và xử lý kết quả.

Tác giả đã xây dựng ba mô hình để xác định biến dạng và nội lực của của cầu trục tương ứng khi tính tách rời dầm chủ, dầm đầu và khi tính cả dầm chủ cùng dầm đầu. Trong nghiên cứu này, tác giả đề xuất sử dụng phần tử dầm 3D, 2 nút, 6 bậc tự do và vật liệu thép SS400 của Nhật.

Các kết quả mô phỏng như biến dạng, chuyển vị, phản lực, lực cắt, mô men uốn và ứng suất của các mô hình thu được trên hình 4.

Kết quả cụ thể sẽ được so sánh chi tiết trong mục 2.4.



Hình 4. Kết quả mô phỏng từ mô hình dầm chủ, dầm đầu, khung không gian dầm chủ - dầm đầu dạng code trên ANSYS APDL

ISSN 2615 - 9910
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 3 năm 2022
http://cokhivietnam.vn

2.4. So sánh kết quả tính toán giữa phương pháp sức bền vật liệu và ANSYS APDL

Để xác nhận tính đúng đắn của mô hình tính trên code của ANSYS APDL, tác giả đã so sánh cả ba trường hợp tính giữa phương pháp tính tay và phương pháp mô phỏng. Kết quả so sánh của dầm chủ, dầm đầu và của mô hình dầm chủ - dầm đầu được cụ thể lần lượt trong bảng 1, bảng 2 và bảng 3. Theo kết quả so sánh, về cơ bản các giá trị đều sai lệch dưới 3%, trừ trường hợp chuyển vị của mô hình không gian cầu trục, điều này chứng tỏ kết quả tính trên ANSYS chính xác và mô hình được xác nhận trong trường hợp tính này.

Bảng 1. So sánh kết quả mô phỏng dầm chủ

Thông số	Phản lực (N)	Chuyển vị (mm)	Lực cắt (N)	Mô men uốn (N.mm)	Ứng suất (N/mm^2)
SBVL	32600	12,62	32600	0,14975e9	92,78
ANSYS	33410	12,74	32574	0,149e9	92,36
Sai lệch (%)	2,48%	0,95%	0,07%	0,1%	0,45%

Bảng 2. So sánh kết quả mô phỏng dầm đầu

Thông số	Phản lực (N)	Chuyển vị (mm)	Lực cắt (N)	Mô men uốn (N.mm)	Ứng suất (N/mm^2)
SBVL	28717,9	0,436	28717,9	0,25297e8	50,08
ANSYS	28717	0,535	28322	0,25024e8	50,561
Sai lệch (%)	0%	13%	1,4%	1,07%	0,96%

Bảng 3. So sánh kết quả mô phỏng kết cấu không gian dầm chủ - dầm đầu

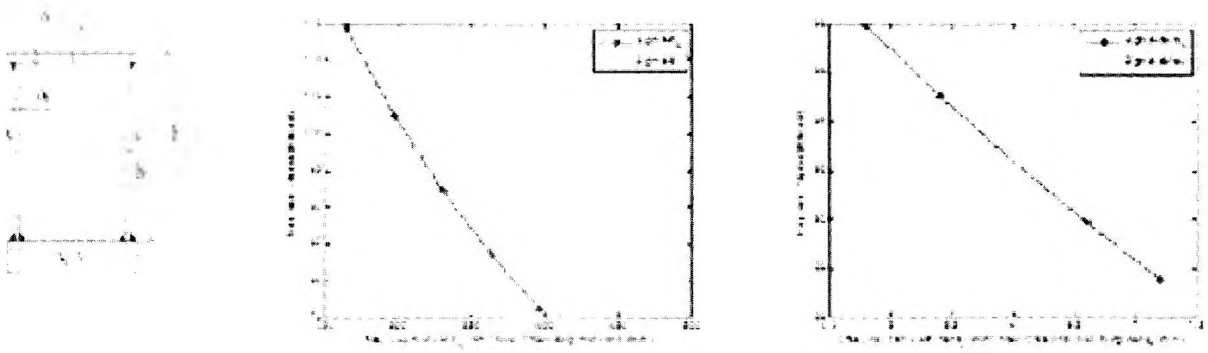
Thông số	Phản lực (N)	Chuyển vị (mm)	Lực cắt (N)	Mô men uốn (N.mm)	Ứng suất (N/mm^2)
Dầm chủ					
SBVL	32600	12,62	32600	0,14975e9	92,78
ANSYS	33410	12,74	32574	0,149e9	92,36
Sai lệch (%)	2,48%	0,95%	0,07%	0,1%	0,45%
Dầm đầu					
SBVL	28717,9	0,436	28717,9	$0,25663.10^8$	50,81
ANSYS	28717	0,536	28715	$0,25536.10^8$	50,3
Sai lệch (%)	3%	13%	0,01%	0,7%	1,62%

2.5. Phân tích đa tham số kích thước mặt cắt dầm chủ

Trên cơ sở mô hình code khung không gian, có thể dễ dàng thay đổi các thông số đầu vào về vật liệu và hình học của dầm chủ cũng như dầm đầu.

Bảng 4. Miền khảo sát của các tham số mặt cắt

Thông số	Chiều cao bản bụng h_b (mm)	Chiều rộng bản cánh b (mm)	Chiều dày bản cánh δ_c (mm)	Chiều dày bản bụng δ_b (mm)
Giá trị danh nghĩa	330	400	6	6
Khoảng biến đổi	± 20%	± 20%	± 20%	± 20%
Khoảng giá trị	[264 396]	[320 480]	[4,8 7,2]	[4,8 7,2]
Số điểm xem xét (5 điểm)	264, 297, 330, 363, 396	320, 360, 400, 440, 480	4.8, 5.4, 6, 6.6, 7.2	4.8, 5.4, 6, 6.6, 7.2



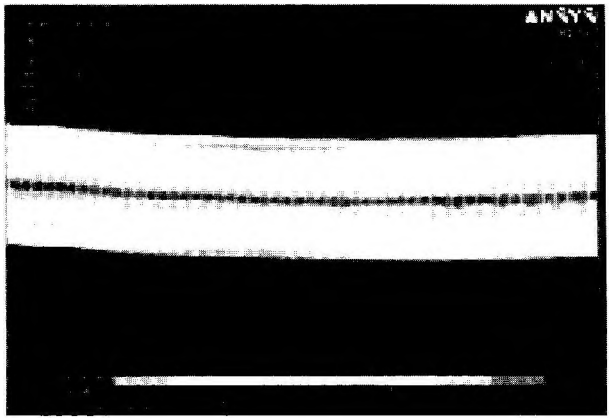
Hình 5. Mối quan hệ giữa các kích thước mặt cắt h_b, b, δ_b, đến ứng suất δ

Để đánh giá ảnh hưởng của sai số và lựa chọn vật liệu thép tấm, đã thực hiện biến đổi các thông số hình học của mặt cắt dầm chủ để xét ảnh hưởng của các thông số này đến ứng suất của kết cấu theo các giá trị như bảng 4, từ đó đánh giá khả năng chịu lực của kết cấu thiết kế.

Xét mô hình khung không gian kết cấu thép cầu trục, cho biến đổi giá trị 1 trong 4 thông số mặt cắt chiều cao h_b, chiều rộng h_b, chiều dày bản cánh δ_c, chiều dày bản bụng δ_b khi các thông số còn lại giữ nguyên, mối quan hệ giữa chúng với ứng suất nhận được như hình 5. Kết quả trên đồ thị cho thấy chiều cao bản bụng và chiều dày bản cánh của mặt cắt là ảnh hưởng lớn nhất đến khả năng chịu lực của kết cấu.

Bảng 5. Tổ hợp các thông số đề xuất

Thông số	h_b (mm)	b (mm)	δ_c (mm)	δ_b (mm)	Ứng suất (N/mm²)
Tổ hợp đề xuất	264	320	4.8	4.8	128,318



Hình 6. Tổ hợp kích thước mặt cắt dầm chủ đề xuất

Phương pháp nghiên cứu biến đổi đa tham số để hướng đến mục đích tối ưu mặt cắt theo điều kiện độ bền trên cơ sở mô hình đã được xây dựng trên ANSYS APDL. Như vậy, có thể xem xét thay đổi đồng thời các thông số mặt cắt h_b, b, δ_c, δ_b để xét sự biến đổi của ứng suất, từ đó đánh giá khả năng chịu lực của kết cấu dầm chủ. Trong trường hợp này, đồng thời giảm các thông số xuống nhỏ nhất (Bảng 5) có kết quả ứng suất là lớn nhất trong các tổ hợp tính toán nhưng vẫn đảm bảo nhỏ hơn ứng suất cho phép là $[\sigma] = 160$ (N/mm^2) và sự phân bố ứng suất trên mặt cắt giữa dầm chủ như hình 6 thu được từ mô hình trên ANSYS APDL.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày tóm tắt quy trình tính toán kết cấu thép cầu trục theo phương pháp tính tay trên cơ sở phương pháp SBVL và Kết cấu thép Máy xây dựng – xếp dỡ, qua đó thu được kết quả cụ thể cho trường hợp tính toán kết cấu thép dầm chủ, dầm đầu của cầu trục một dầm có sức nâng 5 tấn với mặt cắt dạng tổ hợp. Trên cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn, tác giả đã xây dựng các mô hình tính dầm chủ, dầm đầu tách rời và mô hình khung không gian khi để nguyên kết cấu dầm chủ gắn liền dầm đầu trên ANSYS APDL. Các mô hình code ANSYS APDL được thành lập giúp tham số hóa và giải nhanh chóng, phân tích đa tham số các trường hợp tính toán cũng như khi thay đổi các tham số về kích thước của mặt cắt nhằm đánh giá sự ảnh hưởng của các tham số này đến khả năng chịu lực của kết cấu. Kết quả so sánh giữa hai phương pháp tính tay và tính bằng code ANSYS APDL có độ chính xác chấp nhận được, điều này thể hiện khả năng của mô hình code thiết lập. Kết quả phân tích đa tham số cho thấy độ nhạy của các tham số kích thước trên mặt cắt của dầm chủ, ảnh hưởng rõ rệt đến ứng suất kết cấu, khả năng chịu lực, điều này giúp cho quá trình sản xuất cầu trục được hợp lý, tối ưu về khối lượng vật liệu hơn. Ngoài ra, kết quả này là cơ sở dữ liệu để phát triển và áp dụng các mô hình dự đoán khả năng chịu lực của kết cấu cầu trục, cũng là hướng nghiên cứu tiếp theo. Về thực tế sản xuất, kết quả nghiên cứu này góp phần hoàn thiện quá trình tính toán thiết kế cầu trục một dầm nói riêng và các kết cấu khác có dạng mặt cắt tổ hợp nói chung.

Lời cảm ơn:

Tác giả bài báo xin cảm ơn Trường Đại học Giao thông Vận tải đã tài trợ cho nghiên cứu này trong khuôn khổ đề tài mã số T2022-CK-003.❖

Tài liệu tham khảo:

[1]. D'Angela, Danilo, and Marianna Ercolino, Finite element analysis of fatigue response of nickel steel compact tension samples using ABAQUS. Procedia Structural Integrity 13 (2018): 939-946.

[2]. Segura, G., et al, Numerical simulation and analysis of stainless steel frames at high temperature. Engineering Structures 227 (2021): 111446.

[3]. Chu Quốc Thắng, Phương pháp phần tử hữu hạn. NXB Khoa học kỹ thuật, Hà Nội, 1997.

[4]. Kim, Nam-Ho. Introduction to nonlinear finite element analysis. Springer Science & Business Media, 2014.
[5]. ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide.
[6]. Madenci, Erdogan, and Ibrahim Guven. The finite element method and applications in engineering using ANSYS®. Springer, 2015.
[7]. Nguyễn Văn Hợp, Phạm Thị Nghĩa, Lê Thiện Thành. Máy trục vận chuyển. NXB. Giao thông Vận tải, Hà Nội, 2000.
[8]. Nguyễn Văn Hợp, Phạm Thị Nghĩa. Kết cấu thép máy xây dựng – xếp dỡ. NXB. Giao thông Vận tải, Hà Nội, 1996.
[9]. Aguiar, Charles, et al. Nonlinear modeling and robust LMI fuzzy control of overhead crane systems. Journal of the Franklin Institute 358.2 (2021): 1376-1402.
[10]. Fidrovska, Nataliia, et al. Determining Stresses in the Metallic Structure of An Overhead Crane When Using Running Wheels of the New Design. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1.7 (2021): 109.
[11]. Lenivtsev, A. G., I. V. Dudanov, and A. S. Fadeev. Mathematical modeling of overhead crane under conditions of stress-strain state of metal structure as a control object. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1103. No. 1. IOP Publishing, 2021.
[12]. Suard M, Characterization and Optimization of Lattice Structures made by Electron Beam Melting. PhD thesis, Université Grenoble Alpes (2015).
[13]. Doan, V. T., F. Massa, T. Tison, and H. Naceur, Coupling of Homotopy Perturbation Method and Kriging surrogate model for an efficient fuzzy linear buckling analysis: Application to additively manufactured lattice structures. Applied Mathematical Modelling 97 (2021): 602-618.
[14]. Massa, F., et al, Structural modal reanalysis methods using homotopy perturbation and projection techniques. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 200.45-46 (2011): 2971-2982.
[15]. Doan T.V., F.Massa, T.Tison, H.Naceur, Réduction de modèle pour la prédiction de charges critiques de flambement sous variabilié, CFM 2017, Lille, Aout, France (2017).
[16]. Nguyễn Văn Vịnh, Đoàn Văn Tú, Nghiên cứu ứng dụng phần mềm Ansys trong tính toán kết cấu thép cần trục tháp theo mẫu JTL65C4. Tạp chí Bộ Giao thông Vận tải, 08 (2014) 19-23.
[17]. Bùi Thanh Danh, Đoàn Văn Tú, Ứng dụng phần mềm ANSYS APDL trong tính toán thiết kế cổng trục long môn phục vụ lao lắp dầm bê tông khẩu độ nhịp nhỏ trong thi công cầu dân sinh, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 08 (2020) 57-68.
[18]. Nguyen, Tuan-Linh, and Hong Tien Nguyen Van Luat Nguyen, Optimal design of double girder overhead crane with reliability.
[19]. Đoàn Văn Tú, Nghiên cứu sử dụng phần mềm ANSYS tính toán kết cấu thép dạng khung và giàn không gian trong một số loại MXD-XD, Mã số: T2014 - CK - 21, Nghiệm thu năm 2014 đạt kết quả tốt.