

ẢNH HƯỞNG CỦA HÌNH THỨC BỌC BẢO VỆ ĐẾN ỨNG SUẤT, BIẾN DẠNG CỦA DẦM THÉP TIẾT DIỆN CHỮ I TRONG ĐIỀU KIỆN CHỊU NHIỆT ĐỘ CAO

Phạm Thị Ngọc Thu^{a,*}, Phan Quốc Tuấn^a

^a*Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 31/08/2019, Sửa xong 19/09/2019, Chấp nhận đăng 19/09/2019

Tóm tắt

Thép là dạng vật liệu suy giảm khả năng chịu lực nhanh trong điều kiện chịu lửa. Bọc các cấu kiện thép chịu lực bằng vật liệu chống cháy là một trong các biện pháp hữu hiệu để bảo vệ kết cấu thép trong điều kiện chịu nhiệt độ cao. Hiện nay, có hai hình thức bọc phổ biến áp dụng cho các cấu kiện chịu uốn là bọc hình hộp và bọc theo chu vi. Mỗi hình thức bọc lại phù hợp với một dạng vật liệu bảo vệ khác nhau. Bài báo giới thiệu một nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của hình thức bọc bảo vệ đến khả năng chịu lực của cấu kiện dầm thép tiết diện chữ I trong điều kiện chịu nhiệt độ cao. Phần mềm mô phỏng ANSYS Workbench đã được sử dụng để xác định sự phân bố nhiệt độ trong dầm thép, ứng suất, biến dạng của dầm tại một thời điểm cho trước khi cháy từ đó đưa ra kết luận về cách lựa chọn hình thức bọc phù hợp với từng điều kiện thiết kế dầm thép.

Từ khoá: dầm thép; vật liệu chống cháy; hình thức bọc; nhiệt độ cao; ANSYS Workbench.

EFFECTS OF PROTECTIVE COVER FORMS ON BEHAVIOR OF I-SHAPED STEEL BEAMS UNDER ELEVATED TEMPERATURE

Abstract

Steel is a material which rapidly declines load-bearing capacity in fire. Covering steel members with fire protection materials is one of the effective measures to protect them in fire. Currently, there are two common forms of covering applied to bending members: box-shaped protection and contour protection. Each form is suitable for a certain protection material. The paper introduces a study examining effects of protective cover forms on the bearing capacity of I-shaped steel beams under elevated temperature. The ANSYS Workbench simulation software is used to determine the temperature distribution, stresses, deflections of steel beams at a given time in the research process and presents a conclusion about choosing the suitable cover form in beam design.

Keywords: steel beams; fire protection materials; cover forms; elevated temperature; ANSYS Workbench.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13\(5V\)-06](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2019-13(5V)-06) © 2019 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Đặt vấn đề

Thép là một vật liệu đang chiếm ưu thế trong các công trình xây dựng hiện nay nhờ khả năng chịu lực cao và trọng lượng nhẹ. Tuy nhiên, thép bị giảm khả năng chịu lực rất nhanh trong điều kiện chịu nhiệt độ cao nên việc ứng dụng biện pháp nâng cao khả năng chịu nhiệt cho kết cấu thép đang được quan tâm mạnh mẽ. Một số biện pháp bọc bảo vệ cấu kiện thép bằng các vật liệu cách nhiệt như thạch cao chống cháy, vữa chống cháy, sơn chống cháy, ... là những hình thức được sử dụng phổ biến.

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: thuptn@nuce.edu.vn (Thu, P. T. N.)

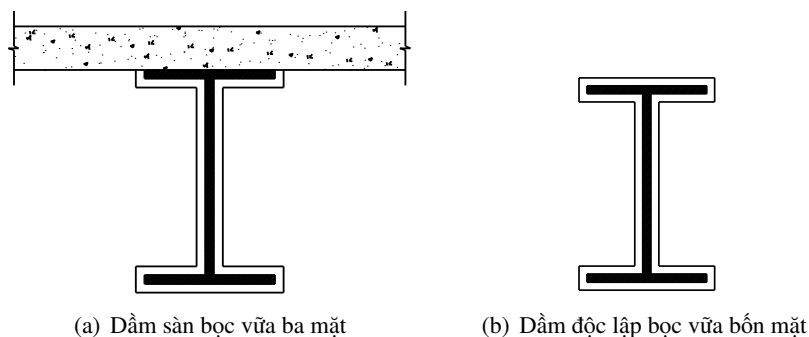
Bài toán đặt ra trong quá trình nghiên cứu tính hiệu quả của hình thức bọc bảo vệ là xác định quy luật lan truyền nhiệt thông qua lớp vật liệu cách nhiệt vào bên trong cấu kiện, từ đó phân tích ứng xử nhiệt và trạng thái làm việc trong điều kiện vừa chịu lực vừa chịu nhiệt của cấu kiện thép. Kết quả của bài toán này sẽ tạo điều kiện cho việc lựa chọn vật liệu bọc, giải pháp bọc và chiều dày lớp bọc phù hợp với từng trường hợp thiết kế cụ thể.

Phương pháp phần tử hữu hạn 3D [1–4] được sử dụng là công cụ chính để giải bài toán trên, với hai giai đoạn phân tích cơ bản là phân tích nhiệt [2, 4] và phân tích cơ học [1, 3]. Giai đoạn phân tích nhiệt sẽ xác định trường nhiệt độ trong cấu kiện biến thiên theo thời gian, dựa trên mối quan hệ nhiệt độ - thời gian của các mô hình cháy danh nghĩa. Kết quả thu được ở giai đoạn này kết hợp với tải trọng sẽ là điều kiện đầu vào cho giai đoạn phân tích cơ học để xác định các giá trị ứng suất, biến dạng và khả năng chịu lực tối hạn của cấu kiện thép. Các đặc tính nhiệt học như hệ số dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng và các đặc tính cơ học như modun đàn hồi, modun tiếp tuyến, giới hạn chảy của vật liệu thép đều thay đổi theo nhiệt độ [5–7], tức là thay đổi theo thời gian. Như vậy, bài toán được phân tích bao gồm cả sự thay đổi về không gian (ba trục x, y, z trong hệ tọa độ Descartes) và thời gian (t).

Trong phạm vi của bài báo, tác giả tập trung nghiên cứu trạng thái ứng xử của cấu kiện dầm thép tiết diện chữ I chịu lực được bọc bảo vệ theo hai hình thức: bọc theo chu vi bằng vật liệu vữa chống cháy và bọc hình hộp bằng vật liệu thạch cao chống cháy trong điều kiện chịu nhiệt độ cao. Chương trình mô phỏng ANSYS Workbench [8, 9] theo phương pháp phần tử hữu hạn với phân tích nhiệt Transient thermal và phân tích cơ Transient structural được sử dụng để xác định sự phân bố nhiệt độ, ứng suất, biến dạng trên toàn bộ dầm tại một thời điểm cho trước trong quá trình dầm vừa chịu lực vừa chịu nhiệt độ cao biến thiên theo thời gian.

2. Các hình thức bọc bảo vệ dầm thép tiết diện I

Vữa chống cháy có thành phần hóa học chính là các chất khoáng tự nhiên, xi măng và các chất phụ gia hoạt tính, được thi công bằng phương pháp phun khô hoặc trát hoặc đổ ghép cấp pha. Các phương pháp này thi công tương đối nhanh, lại không gặp phải những vấn đề khó khăn khi cố định các tấm panel, tấm tường, tấm sàn cứng xung quanh các chi tiết liên kết phức tạp. Sau khi thi công, vữa chống cháy tạo nên một lớp phủ rắn, có khả năng chịu được sự tác động nhiệt của các đám cháy nhiên liệu có cường độ cao, đặc biệt là dạng lửa phun.

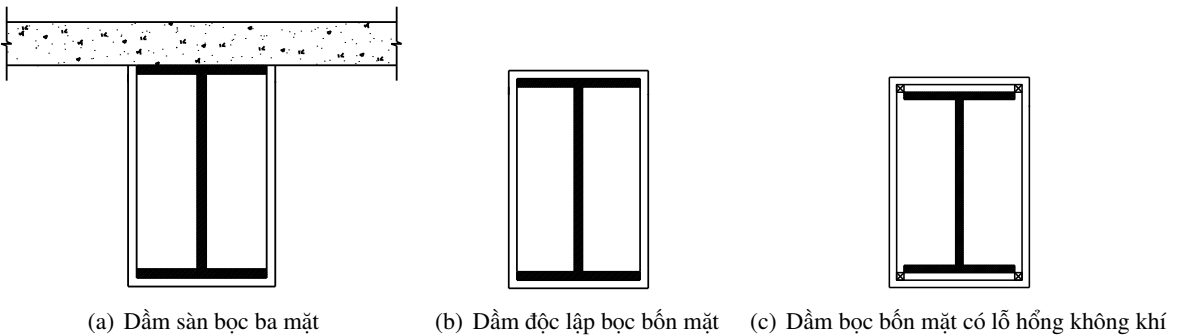


Hình 1. Các hình thức bọc tiết diện thép I chịu lực bằng vữa chống cháy

Vữa chống cháy có hình thức bảo vệ phổ biến nhất là bọc theo chu vi của cấu kiện thép. Phổ biến nhất với tiết diện chữ I, khi các cấu kiện dầm đỡ sàn bê tông, vì bê tông là những vật liệu cách nhiệt tốt nên vữa thường được bọc tại các mặt còn lại (Hình 1(a)). Còn đối với các cấu kiện dầm độc lập hoặc

liên kết với các bề mặt vật liệu chịu nhiệt kém thì nên bọc vữa cả bốn mặt để đảm bảo hiệu quả cách nhiệt cần thiết (Hình 1(b)). Về phương thức hình thành hệ vật liệu phủ chống cháy, vữa chống cháy có thể bám dính trực tiếp lên bề mặt kết cấu thép hoặc có thêm lưới thép gia cường. Độ dày tối thiểu của một lớp vữa bám dính trực tiếp là 14 mm, của lớp vữa có lưới thép gia cường là 50 mm. Trong các tính toán truyền nhiệt, độ dẫn nhiệt của vữa chống cháy có thể thay đổi từ 0,15-0,25 W/m°C [7, 10].

Thạch cao có 21% khối lượng là nước và 79% khối lượng là thạch cao khan. Hợp chất này hoàn toàn không có phản ứng hóa học ở nhiệt độ dưới 1200°C. Khi công trình xảy ra hỏa hoạn, đầu tiên các phân tử nước kết tinh sẽ hấp thụ nhiệt rồi được giải phóng ra dưới dạng hơi nước. Đây là hiện tượng canxi hóa, chính quá trình hấp thụ nhiệt và giải phóng các phân tử nước này đã hạn chế sự truyền nhiệt từ mặt tiếp xúc trực tiếp với lửa sang mặt kia của tấm, tạo hiệu quả cách nhiệt cho tấm.



Hình 2. Các hình thức bọc tiết diện thép I chịu lực bằng vữa chống cháy

Hình thức bọc chủ yếu của thạch cao là bọc hình hộp, tấm thạch cao chạy vòng quanh tiết diện theo một hình chữ nhật ngoại tiếp (Hình 2(a) và 2(b)). Trong thực tế, người ta có thể cấu tạo thêm các lỗ hổng không khí xung quanh tiết diện để tăng mức độ đối lưu không khí (Hình 2(c)). Vì khả năng truyền nhiệt của thạch cao thấp hơn so với thép nên phần nhiệt độ ở trong khu vực bao kín bởi hộp bảo vệ được xem là phân bố đều. Các tấm thạch cao có độ dày tối thiểu 9 mm, trong một số trường hợp cần tăng mạnh hiệu quả cách nhiệt, có thể sử dụng ốp hai tấm liền nhau để tăng bề dày lớp bọc. Trong các tính toán truyền nhiệt, độ dẫn nhiệt của thạch cao chống cháy có thể thay đổi từ 0,2-0,25 W/m°C [7, 10].

3. Khảo sát trạng thái ứng suất - biến dạng của dầm thép được bọc bảo vệ trong điều kiện chịu nhiệt độ cao

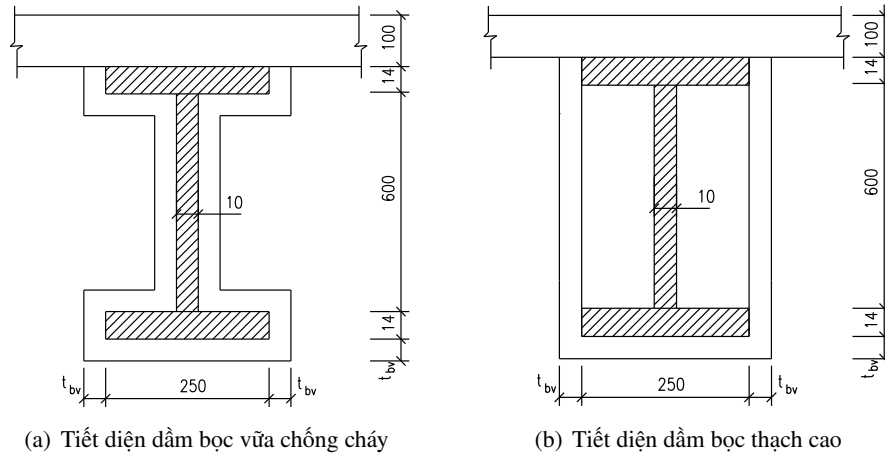
Xét cấu kiện dầm thép có tiết diện chữ I được bọc bảo vệ có kích thước bản bụng $h_w = 600$ mm, $t_w = 10$ mm, bản cánh $b_f = 250$ mm, $t_f = 14$ mm. Mặt trên dầm liên kết với bản sàn bê tông cốt thép có chiều dày $b_s = 100$ mm. Nhiệt độ tác dụng lên bản cánh dưới của dầm thép (theo suốt chiều dài dầm) biến thiên theo thời gian, áp dụng đường cong nhiệt độ - thời gian ISO 834 dựa trên mô hình cháy danh nghĩa của vật liệu hydro cacbua [5, 6]:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

trong đó T là nhiệt độ thu được (°C) tại thời điểm t (phút).

Nhiệt độ mặt trên bản bê tông xem như nhiệt độ phòng $T_{phong} = 25^\circ\text{C}$, không đổi theo suốt chiều dài dầm và trong thời gian khảo sát.

Dầm hai đầu khớp, nhịp $L = 8$ m, tải trọng tác dụng lên bản cánh trên của dầm thép xem là phân bố đều $q = 40$ KN/m và không đổi trong suốt thời gian khảo sát. Giới hạn chảy của thép $f_y/\gamma_{M,f_i} = 2400$ daN/cm² [5]. Hệ số dẫn nhiệt của thép thay đổi phụ thuộc nhiệt độ theo EN 1993 [5].



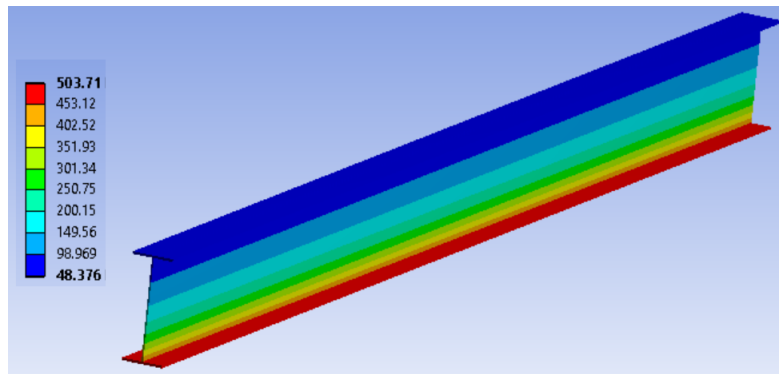
Hình 3. Kích thước tiết diện dầm khảo sát

Quá trình khảo sát dựa trên việc thay đổi một số thông số của hình thức bọc bảo vệ dầm:

Bọc chu vi, bề dày vữa t_{bv} (mm)	15	25	50	
Bọc hình hộp, bề dày thạch cao t_{bv} (mm)	13	16	26	32

Vữa có hệ số dẫn nhiệt $\lambda = 0,18$ W/m°C; thạch cao có hệ số dẫn nhiệt $\lambda = 0,25$ W/m°C.

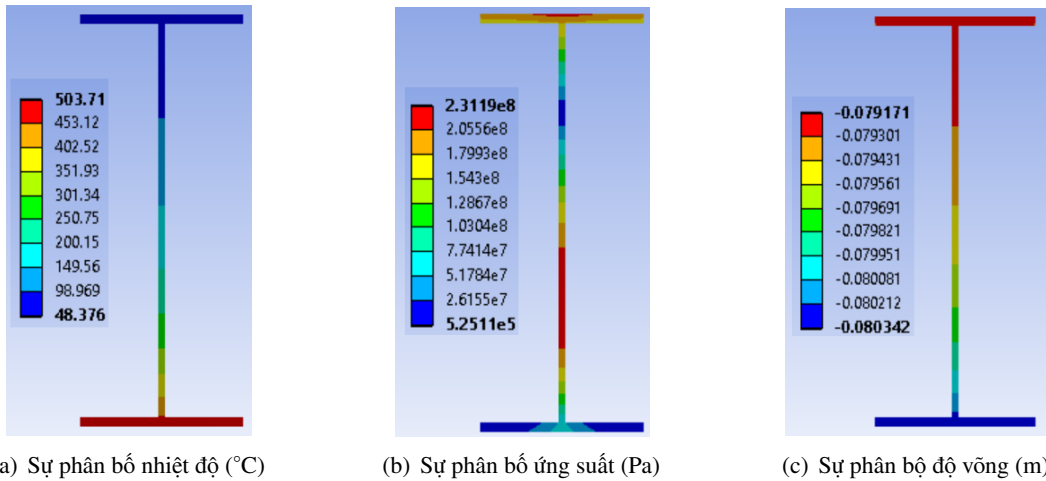
Phần mềm mô phỏng ANSYS được sử dụng để xây dựng mô hình mô phỏng trường ứng suất-biến dạng (theo phân tích Transient structural - mặc định là phi tuyến hình học [9]) của dầm thép khi chịu đồng thời tác dụng của tải trọng và nhiệt độ. Phần tử được chọn là phần tử 3D solid body HEX8 [8] - dạng phần tử bậc nhất gồm 6 mặt, 8 nút; mô hình vật liệu dạng tuyến tính (dạng isotropic elasticity [8]).



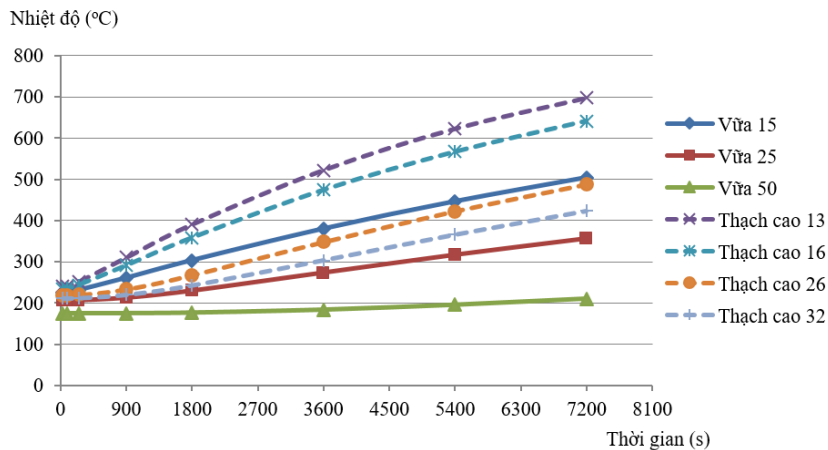
Hình 4. Sự phân bố nhiệt độ (°C) trên dầm thép được bọc vữa dày 15 mm, tại $t = 120$ phút

Trong mô hình này, ta bỏ qua trạng thái làm việc của các lớp vật liệu cách nhiệt, ứng suất nghiên cứu là ứng suất Von-mises [2], biến dạng nghiên cứu là độ võng của dầm tương ứng với các thời điểm cháy 0,5 phút; 1,5 phút; 4 phút; 15 phút; 30 phút; 60 phút; 90 phút; 120 phút. Các kết quả thu tại các

thời điểm cháy tiêu chuẩn 30 phút; 60 phút; 90 phút; 120 phút được sẽ dùng để kiểm tra tiêu chuẩn khả năng chịu lực (R) trong EN 1993 [5]. Các thời điểm 0,5 phút; 1,5 phút; 4 phút; 15 phút được đưa vào khảo sát là do trong khoảng 15 phút đầu, đường cong ở phương trình (1) có độ dốc lớn (nhiệt độ tăng nhanh so với thời gian) nên cần thiết phải chia nhỏ khoảng thời gian này để các đồ thị kết quả thu được có độ chính xác cao hơn.



Hình 5. Các kết quả thu được trên tiết diện giữa dầm ($z = 4$ m) thép được bọc vữa dày 15 mm, tại $t = 120$ phút



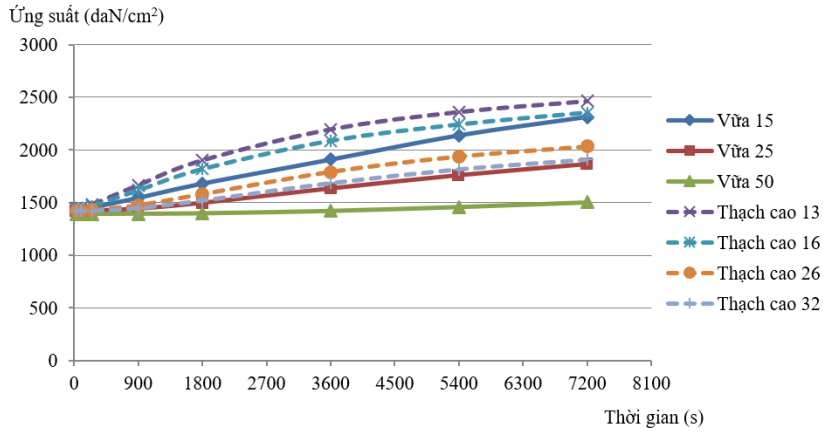
Hình 6. Mối quan hệ nhiệt độ - thời gian

Hình 6–8 thể hiện sự tổng hợp các kết quả thu được từ chương trình mô phỏng. Từ đó, ta có thể rút ra một số nhận xét như sau:

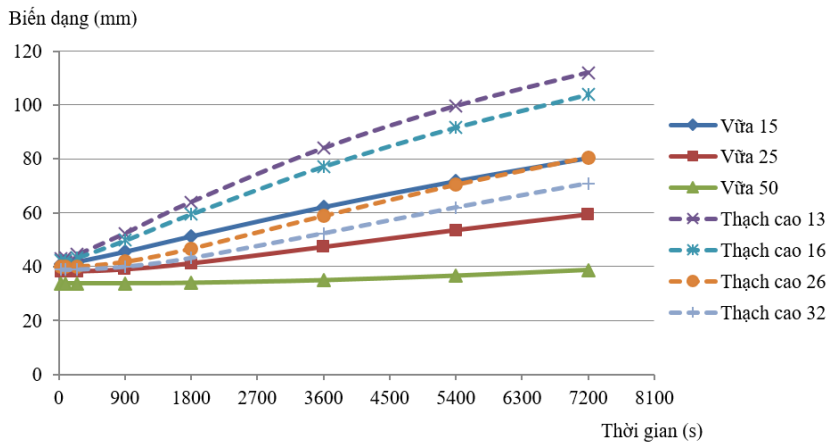
- Tại thời điểm $t = 120$ phút, nhiệt độ đám cháy đạt $T = 1054^{\circ}\text{C}$, nhiệt độ $T_{\max}$ cấu kiện dầm thép khi bọc chu vi bằng 503,71 $^{\circ}\text{C}$ và khi bọc hình hộp bằng 696,9 $^{\circ}\text{C}$. Các giá trị này cho ta thấy hiệu quả cách nhiệt khi sử dụng vật liệu bọc là khá cao.

- So sánh giữa 2 hình thức bọc bảo vệ thì hình thức bọc bằng vữa theo chu vi cho hiệu quả cách nhiệt tốt hơn. Tại thời điểm 120 phút, $T_{\max}$ khi bọc chu vi bằng 503,71 $^{\circ}\text{C}$ và $T_{\max}$ khi bọc hình hộp bằng 696,9 $^{\circ}\text{C}$. Có 3 lí do để giải thích cho kết luận này:

- + Khả năng cách nhiệt của vữa và thạch cao là khác nhau;
- + Bề dày lớp vật liệu bảo vệ khác nhau (giữa 15 mm và 13 mm);



Hình 7. Mối quan hệ ứng suất - thời gian tại tiết diện giữa dầm



Hình 8. Mối quan hệ biến dạng - thời gian tại tiết diện giữa dầm

Bảng 1. Kết quả nhiệt độ, ứng suất, độ võng của dầm bọc vữa

Hình thức bọc	Thời điểm t (phút)	Nhiệt độ T (°C)	Ứng suất (daN/cm ²)	Ứng suất tới hạn (daN/cm ²)	Độ võng Δ (cm)	Độ võng/Nhịp Δ/L
Bọc vữa, dày 15 mm	30	303,60	1680	2400	5,119	1/156
	60	379,97	1908	2400	6,207	1/129
	90	445,89	2137	2136	7,174	1/111
	120	503,71	2312	1872	8,034	1/100
Bọc vữa, dày 25 mm	30	230,09	1496	2400	4,131	1/194
	60	273,50	1632	2400	4,735	1/169
	90	316,49	1757	2400	5,357	1/149
	120	355,81	1862	2400	5,936	1/135
Bọc vữa, dày 50 mm	30	176,66	1397	2400	3,392	1/236
	60	183,84	1420	2400	3,488	1/229
	90	195,86	1458	2400	3,656	1/219
	120	210,80	1503	2400	3,871	1/207

+ Hình thức bọc theo chu vi tốt hơn, vì ôm sát vào toàn bộ tiết diện, tránh được khoảng không khí giữa tiết diện thép và vật liệu bọc hình hộp. Trong thực tế trong khoảng không gian này sẽ xảy ra hiện tượng đối lưu, tuy nhiên khoảng không khí này hẹp và dài, nhiệt độ tác động theo phương dọc cấu kiện như nhau nên ảnh hưởng của đối lưu gần như rất nhỏ.

- Để xác định trạng thái tới hạn của cấu kiện ta cần khảo sát 3 thông số: nhiệt độ, ứng suất và biến dạng. Trong chương trình mô phỏng, ứng suất và biến dạng thu được đã kể đến ảnh hưởng sự suy giảm mô đun đàn hồi E theo nhiệt độ T [5], vì vậy với kết quả thu được, ta so sánh ứng suất với giới hạn chảy $f_{y,\theta}$ [5] để có được kết luận về khả năng chịu lực của dầm. Kết quả chi tiết được thể hiện trong các Bảng 1, 2 và 3.

Bảng 2. Kết quả nhiệt độ, ứng suất, độ võng của dầm bọc thạch cao

Hình thức bọc	Thời điểm t (phút)	Nhiệt độ T (°C)	Ứng suất (daN/cm ²)	Ứng suất tới hạn (daN/cm ²)	Độ võng Δ (cm)	Độ võng/Nhịp Δ/L
Bọc thạch cao, dày 13 mm	30	390,41	1902	2400	6,399	1/125
	60	522,11	2197	1708	8,395	1/95
	90	622,41	2362	999	9,955	1/80
	120	696,90	2465	552	11,193	1/71
Bọc thạch cao, dày 16 mm	30	358,23	1818	2400	5,953	1/134
	60	474,05	2085	2009	7,717	1/104
	90	566,62	2239	1376	9,164	1/87
	120	641,28	2351	890	10,382	1/77
Bọc thạch cao, dày 26 mm	30	267,69	1578	2400	4,678	1/171
	60	347,83	1791	2400	5,882	1/136
	90	422,15	1938	2283	7,032	1/114
	120	487,23	2034	1939	8,045	1/99
Bọc thạch cao, dày 32 mm	30	242,65	1518	2400	4,325	1/185
	60	303,61	1684	2400	5,238	1/153
	90	365,77	1816	2400	6,197	1/129
	120	423,10	1909	2278	7,089	1/113

Bảng 3. Kết luận về khả năng chịu lực của dầm trong điều kiện chịu lửa

Hình thức bọc	Khả năng chịu lực theo thời gian	Ứng suất/Ứng suất tới hạn (%)	Độ võng/Độ võng tới hạn (%)
Vữa, dày 15 mm	60 phút	79,5	15,1
Vữa, dày 25 mm	120 phút	75,5	14,8
Vữa, dày 50 mm	120 phút	62,6	9,7
Thạch cao, dày 13 mm	30 phút	79,3	16,0
Thạch cao, dày 16 mm	30 phút	75,8	14,9
Thạch cao, dày 26 mm	90 phút	84,9	17,6
Thạch cao, dày 32 mm	120 phút	83,8	17,7

- Các giá trị độ võng dao động từ (1/113–1/135) của nhịp ứng với khả năng chịu lực tới hạn của từng dầm. Nếu so với độ võng giới hạn của dầm chịu lực trong điều kiện chịu nhiệt độ cao là $L^2/400h$

= 26,67 cm [11] thì có thể thấy rằng khả năng chịu lực của dầm trong các trường hợp này đều do trạng thái giới hạn thứ nhất quyết định.

4. Kết luận

- Vữa và thạch cao chống cháy đều là các vật liệu phổ biến để bảo vệ dầm thép làm việc trong điều kiện chịu nhiệt độ cao ở Việt Nam. Hình thức bọc theo chu vi và bọc hình hộp vừa thuận lợi về thi công vừa đạt hiệu quả cao về mặt cách nhiệt.

- Dựa vào các kết quả thu được từ các ví dụ trên, ta có thể rút ra một số kết luận cơ bản sau:

+ Khả năng bảo vệ dầm thép của các vữa và thạch cao là khá lớn, tùy thuộc vào từng yêu cầu thiết kế khác nhau, ta có thể lựa chọn hình thức bọc và độ dày lớp vật liệu bọc sao cho phù hợp.

+ Bài báo đang nghiên cứu trạng thái ứng suất-biến dạng ứng với các thời gian cháy tiêu chuẩn, tuy nhiên dựa vào phân tích này ta hoàn toàn có thể xác định được thời gian chính xác tương ứng khi ứng suất trong dầm đạt đến ứng suất tới hạn. Điều này sẽ cho ta cơ sở để kết luận về thời gian tối đa mà cấu kiện dầm có thể chịu được trong điều kiện chịu nhiệt độ cao.

+ Khi dầm đạt đến khoảng 80% ứng suất tới hạn thì độ võng đạt khoảng 1/120 của nhịp. Giá trị này hoàn toàn có thể chấp nhận được để đảm bảo duy trì sự tồn tại của cấu kiện trong điều kiện đám cháy.

- Dựa trên nguyên tắc phân tích như trên, ta có thể thực hiện tiếp các bài toán khác khi thay đổi các thông số của dầm như sơ đồ kết cấu, sơ đồ tải trọng, kích bản cháy, ... để có được kết quả đầy đủ về trạng thái làm việc của các cấu kiện dầm thép được bọc bảo vệ chịu lực trong điều kiện chịu nhiệt độ cao.

Tài liệu tham khảo

- [1] Cầu, V. N. (2005). *Tính kết cấu theo phương pháp phần tử hữu hạn*. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [2] Thu, P. T. N. (2012). [Ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn xác định sự phân bố nhiệt độ trên tiết diện thép](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 6(2):54–61.
- [3] Trâm, N., Ca, T. Q. (2007). *Phương pháp phần tử hữu hạn và các ứng dụng trong tính toán kỹ thuật*. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [4] Thu, P. T. N. (2016). Apply the 3D finite element method to determine temperature at given position of steel members. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering*, 199–212.
- [5] EN 1993-1-2:2005. *General rules - Structural fire design*.
- [6] BS 5950-8:2003. *Code of practice for fire resistant design*.
- [7] Lawson, R. M., Newman, G. M. (1990). *Fire Resistant design of steel structures-A handbook to BS 5950: Part 8*. The Steel Construction Institute.
- [8] Công ty cổ phần công nghệ tiên tiến (2015). *Tài liệu khóa học ANSYS Mechanical*.
- [9] Kohnke, P. (1999). *ANSYS Theory reference (Release 5.6)*. Ansys, Inc, Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317.
- [10] Quý, N. N. (2002). *Công nghệ vật liệu cách nhiệt*. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [11] BS EN 1363-1:2012. *Fire resistant test. General requirements*.