

KHẢ NĂNG CHỊU LỬA CỦA CỘT THÉP TIẾT DIỆN CHỮ I BỌC THẠCH CAO DẠNG HỘP CHỊU NÉN ĐÚNG TÂM – SO SÁNH GIỮA PHƯƠNG PHÁP TÍNH ĐƠN GIẢN HÓA THEO EN 1993-1-2 VÀ PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

Phạm Thị Ngọc Thu^{a,*}, Nguyễn Như Hoàng^a

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

Nhận ngày 07/10/2021, Sửa xong 29/10/2021, Chấp nhận đăng 29/10/2021

Tóm tắt

Bọc bảo vệ các cấu kiện thép bằng thạch cao chống cháy là một trong những giải pháp phổ biến tăng khả năng chịu lực cho kết cấu thép trong điều kiện chịu lửa ở Việt Nam. Trong bài báo này, hai phương pháp tính khả năng chịu lực của cột thép tiết diện chữ I chịu nén đúng tâm được bọc thạch cao chống cháy dạng hình hộp: phương pháp tính đơn giản hóa theo EN 1993-1-2 và phương pháp mô phỏng số (dùng phần mềm ANSYS Workbench) được trình bày. Một ví dụ được thực hiện để so sánh giá trị nhiệt độ thu được bên trong cấu kiện theo hai phương pháp trên. Kết quả về khả năng chịu lực của cột trong điều kiện chịu lửa và phương thức đánh giá của từng phương pháp cũng được trình bày.

Từ khóa: khả năng chịu lửa; cột thép được bọc bảo vệ; thạch cao chống cháy; phương pháp tính đơn giản; phương pháp mô phỏng.

FIRE RESISTANCE OF BOX PROTECTED STEEL I-COLUMNS WITH GYPSUM – COMPARISON BETWEEN EN 1993-1-2 SIMPLIFIED CALCULATION AND NUMERICAL SIMULATION METHODS

Abstract

Protecting steel members with gypsum material is one of popular solutions for increasing load-bearing capacity of steel structures under fire condition in Vietnam. In this paper, two models for determining fire resistance of box protected steel I-columns with gypsum which are subjected to axial force: simplified calculation in accordance with EN 1993-1-2 and numerical simulation (using ANSYS Workbench software) are presented. An example is implemented to compare temperatures in-side members calculated in two methods. The resulting load-bearing capacity and criteria used for its assessment in each method are also discussed.

Keywords: fire resistance; protected steel columns; gypsum material; simplified calculation method; numerical simulation method.

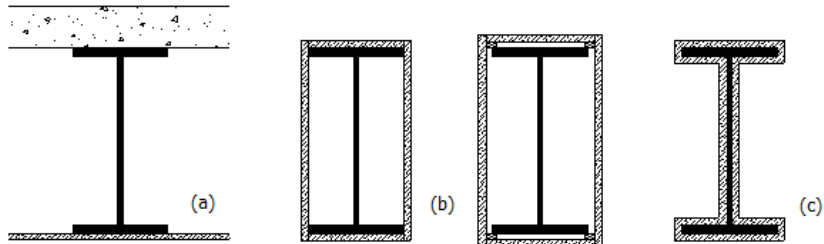
[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(5V\)-10](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(5V)-10) © 2021 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Hiện nay, bên cạnh các vật liệu chống cháy hiện đại cho kết cấu thép như sơn chống cháy, vữa chống cháy, thạch cao là dạng vật liệu truyền thống bởi các tính năng bền vững, ngăn lửa, cách nhiệt tốt. Về hình thức bọc bảo vệ, có thể kể đến ba dạng bọc thạch cao hiện đang được sử dụng nhiều cho các cấu kiện thép là bọc bảo vệ một mặt (Hình 1(a)); bọc bảo vệ dạng hộp (Hình 1(b)) và bọc bảo vệ

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

theo chu vi (Hình 1(c)). Trong đó, bọc bảo vệ dạng hộp là hình thức bọc dễ thi công và mang lại khả năng cách nhiệt hiệu quả, tùy từng trường hợp sử dụng có thể cấu tạo thêm các lỗ hổng không khí xung quanh tiết diện để tăng mức độ đối lưu cho luồng khí. Chiều dày tối thiểu tấm thạch cao cấu tạo bọc bảo vệ dạng hộp là 9 mm; độ dày phổ biến các tấm thạch cao là 9 mm; 13 mm; 16 mm. 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 [1, 2].



Hình 1. Các hình thức bọc bảo vệ cấu kiện thép bằng tấm thạch cao

Trong quy trình thiết kế chống cháy, việc lựa chọn hình thức bọc, bề dày lớp bọc phụ thuộc vào bậc chịu lửa của công trình [3], vào trạng thái làm việc, vị trí không gian trong mô hình cháy và vai trò của cấu kiện trong hệ kết cấu tổng thể của công trình. Đối với cột là cấu kiện thẳng đứng, khả năng tiếp xúc trực tiếp với lửa theo các mặt cột trong mô hình cháy là cao, đã có nhiều phương pháp được nghiên cứu để xác định khả năng chịu lực của cột trong điều kiện chịu lửa:

- Phương pháp tính toán đơn giản hóa [4]: các công thức đơn giản hóa được đưa ra để xác định mức độ tăng nhiệt bên trong cấu kiện thép theo thời gian, xác định giá trị nhiệt độ giới hạn, thời gian chịu lửa giới hạn, lực nén tối hạn theo ổn định tổng thể trong điều kiện chịu lửa của cột. Các công thức này được sử dụng để đánh giá khả năng chịu lực của cấu kiện cột dựa trên ba yêu cầu:

- + Thời gian chịu lửa thực tế yêu cầu phải nhỏ hơn thời gian chịu lửa thiết kế cho cột $t_{fi} \leq t_{fi,d}$.

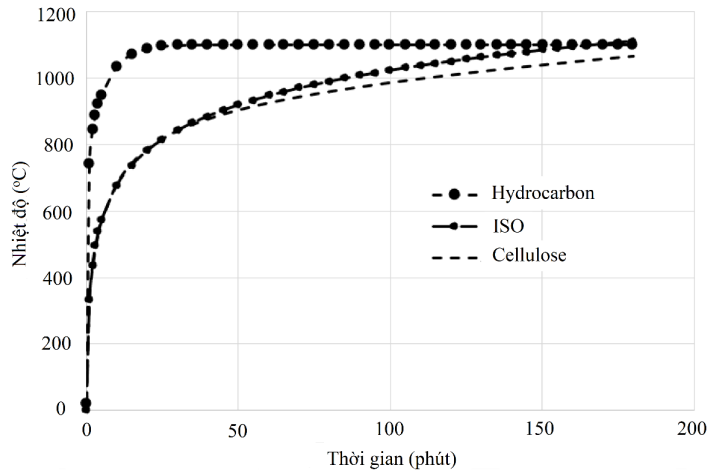
- + Nhiệt độ mà cột đạt tới trong điều kiện chịu lửa thực tế phải nhỏ hơn nhiệt độ giới hạn của cột theo thiết kế $\theta \leq \theta_{cr,d}$.

- + Tại một thời điểm t cho trước trong điều kiện chịu lửa, tải trọng thực tế tác dụng lên cột phải nhỏ hơn khả năng chịu lực của nó $E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$.

Phương pháp này được ứng dụng cho cấu kiện cột riêng lẻ, quá trình truyền nhiệt được mô tả từ bề mặt qua lớp bảo vệ vào bên trong cấu kiện. Khi đó thông số đầu vào là nhiệt độ môi trường xung quanh và nhiệt độ trên bề mặt lớp thạch cao, nhiệt độ thu được trong cột thép được xem là phân bố đều trên toàn bộ tiết diện. Kết quả của phương pháp tính này đã được lập thành các bảng tra ứng dụng cho một số trường hợp cấu kiện cột không bọc và được bọc bảo vệ theo các hình thức phổ biến.

- Phương pháp mô phỏng số dựa trên lý thuyết phần tử hữu hạn [5]: đây là phương pháp phức tạp hơn khi có thể phân tích chi tiết các ứng xử cơ nhiệt của riêng cấu kiện cột, một phần hay toàn bộ hệ kết cấu chịu lực trong điều kiện chịu lửa. So với phương pháp đơn giản hóa, phương pháp này có nhiều ưu điểm. Đầu tiên, mô phỏng có thể xét đến hiện tượng bức xạ, đối lưu thể hiện sự tương tác về nhiệt giữa cấu kiện và môi trường xung quanh trong không gian cháy. Điều này làm cho kết quả nhiệt độ thu được trên bề mặt và bên trong cấu kiện gần với thực tế hơn các công thức đơn giản. Ngoài ra, trong quá trình phân tích ứng xử cơ nhiệt của cột thép, mô phỏng kể đến cả các biến dạng nhiệt, biến dạng từ biến bên cạnh biến dạng dẻo do tải trọng. Chính vì vậy, kết quả thu được từ mô phỏng có độ chính xác cao hơn. Các phần mềm phân tích kết cấu trong điều kiện chịu lửa theo phương pháp mô phỏng số tiêu biểu có thể kể đến là ANSYS (Mỹ, 1970) [6]; ABAQUS (Mỹ, 1978); SAFIR (Bỉ, 1980); FDS (Mỹ, 1985); ...

Khi sử dụng tính toán theo hai phương pháp trên, có hai yếu tố đầu vào cần được thiết lập. Thứ nhất là giá trị nhiệt độ môi trường, giá trị này được xác định dựa trên mô hình cháy danh nghĩa biểu diễn mối quan hệ nhiệt độ - thời gian trong quá trình cháy. Những mô hình cháy danh nghĩa trong ISO hiện nay chủ yếu xây dựng dựa trên cơ sở các đám cháy của vật liệu hydrocarbon và cellulose (Hình 2).



Hình 2. Mối quan hệ nhiệt độ môi trường - thời gian theo ISO 834 [7]

Đường cong nhiệt độ - thời gian được mô tả theo công thức [7, 8]:

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

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

Thứ hai là sự thay đổi các đặc tính cơ nhiệt của vật liệu thép phụ thuộc vào nhiệt độ, điều này được thể hiện rõ rệt ở quan hệ ứng suất - biến dạng của thép. Trên thế giới có nhiều cách tiếp cận xây dựng mối quan hệ này. Tiêu chuẩn Châu Âu EN1993-1-2 [4] dựa trên các kết quả thí nghiệm để mô tả sự biến đổi của ba thông số: mô đun đàn hồi, giới hạn tỷ lệ và giới hạn chảy theo nhiệt độ, từ đó vẽ đường biểu diễn ứng suất - biến dạng và xác định các hệ số suy giảm ba thông số này theo nhiệt độ (Bảng 1). Khi này, các đặc tính cơ lý của thép tại một nhiệt độ cho trước có thể được tính toán một cách đơn giản.

Bên cạnh tiêu chuẩn Châu Âu, Viện Tiêu chuẩn và Kỹ thuật quốc gia Hoa Kỳ (NIST) dựa trên việc nghiên cứu các mẫu thép thu được từ hiện trường sau vụ hỏa hoạn ở Trung tâm Thương mại Thế Giới (WTC) năm 2001 để biểu thị mô đun đàn hồi là một hàm của nhiệt độ θ và xây dựng quan hệ ứng suất - biến dạng cho các mẫu này [7]. Sau đó, một số thuật toán được sử dụng để tổng quát hóa mối quan hệ này cho vật liệu thép nói chung. Hiện nay, các cách tiếp cận này đều được sử dụng rộng rãi trong các thiết kế chống cháy.

- Phương pháp thí nghiệm: kết quả thu được từ các thí nghiệm cột chịu lực trong điều kiện chịu lửa được xử lý, so sánh với kết quả thu được từ các phương pháp lý thuyết. Khả năng chịu lực thường được kết luận dựa trên không chế về sự phát triển biến dạng và chuyển vị của cột theo thời gian trong quá trình cháy [9]. Từ đó, đề xuất thời gian chịu lửa giới hạn và nhiệt độ giới hạn cho cấu kiện.

Đã có rất nhiều các nghiên cứu khoa học được thực hiện theo hướng kết hợp các phương pháp này khi thiết kế cấu kiện trong điều kiện chịu lửa [10]. Trong phạm vi của bài báo, hai phương pháp tính khả năng chịu lực của cột thép tiết diện chữ I chịu nén đúng tâm bọc thạch cao chống cháy dạng hình

Bảng 1. Giá trị hệ số suy giảm mô đun đàn hồi $k_{E,\theta}$, giới hạn chảy $k_{y,\theta}$ và giới hạn tỷ lệ $k_{p,\theta}$ của vật liệu thép ở nhiệt độ θ [4]

Nhiệt độ θ (°C)	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_p$
20	1,0000	1,00	1,0000
100	1,0000	1,00	1,0000
200	0,9000	1,00	0,8070
300	0,8000	1,00	0,6130
400	0,7000	1,00	0,4200
500	0,6000	0,78	0,3600
600	0,3100	0,47	0,1800
700	0,1300	0,23	0,0750
800	0,0900	0,11	0,0500
900	0,0675	0,06	0,0375
1000	0,0450	0,04	0,0250
1100	0,0225	0,02	0,0125
1200	0,0000	0,00	0,0000

hộp được giới thiệu: phương pháp tính đơn giản hóa theo EN 1993-1-2 và phương pháp mô phỏng số (dùng phần mềm ANSYS Workbench). Một ví dụ được thực hiện để so sánh giá trị nhiệt độ thu được theo hai phương pháp; kết quả và phương thức đánh giá về khả năng chịu lực của cột theo điều kiện ổn định tổng thể của từng phương pháp cũng được trình bày.

2. Phương pháp tính đơn giản hóa [4]

2.1. Nhiệt độ thu được trên tiết diện tại một thời điểm xác định

Trong cấu kiện cột thép được bọc thạch cao bảo vệ, mức tăng nhiệt độ trên tiết diện theo từng khoảng thời gian Δt ($\Delta t \leq 30$ giây) được xác định theo công thức:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p C_a \rho_a} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \geq 0 \quad (2)$$

trong đó: A_p/V (1/m) là hệ số tiết diện của tiết diện thép; C_a, ρ_a lần lượt là nhiệt dung riêng, tỷ trọng của vật liệu thép; C_p, ρ_p, λ_p lần lượt là nhiệt dung riêng, tỷ trọng, hệ số dẫn nhiệt của vật liệu thạch cao; d_p là chiều dày của lớp thạch cao; $\theta_{a,t}$ là nhiệt độ trên tiết diện thép tại thời điểm t (giây); $\theta_{g,t}$ là nhiệt độ môi trường tại thời điểm t (giây); $\Delta\theta_{g,t}$ là độ tăng nhiệt độ môi trường trong khoảng thời gian Δt (giây), giá trị $\Delta\theta_{g,t} \geq 0$ khi $\Delta\theta_{g,t} > 0$; $\phi = \frac{C_p \rho_p}{C_a \rho_a} d_p A_p / V$.

Trong công thức (2), hệ số tiết diện A_p/V phụ thuộc vào hình thức bọc, với tiết diện cột chữ I được bọc thạch cao dạng hình hộp theo cả bốn mặt:

$$A_p/V = \frac{2(h+b)}{A} \quad (3)$$

trong đó A là diện tích tiết diện cột; h, b là chiều cao tiết diện và bề rộng bản cánh cột.

Giá trị nhiệt độ thu được tại thời điểm t được xem là phân bố đều trên toàn bộ tiết diện cột thép.

2.2. Khả năng chịu lực của cột chịu nén đúng tâm trong điều kiện chịu lửa

Trong bài toán chịu lửa, tiết diện cấu kiện vẫn được phân thành 4 loại tương tự như khi tính toán ở điều kiện nhiệt độ thường [11] với hệ số ε được xác định:

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4)$$

trong đó: f_y là giới hạn chảy của thép ở nhiệt độ thường.

Theo phương pháp tính đơn giản hóa, tại một thời điểm t trong quá trình chịu lửa, cột có tiết diện loại 1, loại 2, loại 3 được xem là đảm bảo khả năng chịu lực theo điều kiện ổn định tổng thể khi:

$$N_{fi,t,Ed} \leq N_{fi,t,Rd} \quad (5)$$

trong đó: $N_{fi,t,Ed}$ là lực nén đúng tâm tác dụng lên cột và $N_{fi,t,Rd}$ là lực nén tới hạn theo điều kiện ổn định tổng thể của cột. Trên tiết diện có sự phân bố nhiệt độ không đều, $N_{fi,Rd}$ được xác định:

$$N_{fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta_{\max}} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (6)$$

trong đó: A là diện tích tiết diện cột; $k_{y,\theta_{\max}}$ là hệ số suy giảm giới hạn chảy của thép tương ứng ở nhiệt độ lớn nhất $\theta_{\max}$ của bản cánh nén tại thời điểm t ; $\gamma_{M,fi}$ là hệ số điều kiện làm việc của cấu kiện thép trong điều kiện chịu lửa; χ_{fi} là hệ số suy giảm do hiện tượng uốn dọc trong điều kiện chịu lửa, được tính theo công thức:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta_{\max}} + \sqrt{(\varphi_{\theta_{\max}})^2 - (\bar{\lambda}_{\theta_{\max}})^2}} \quad (7)$$

với:

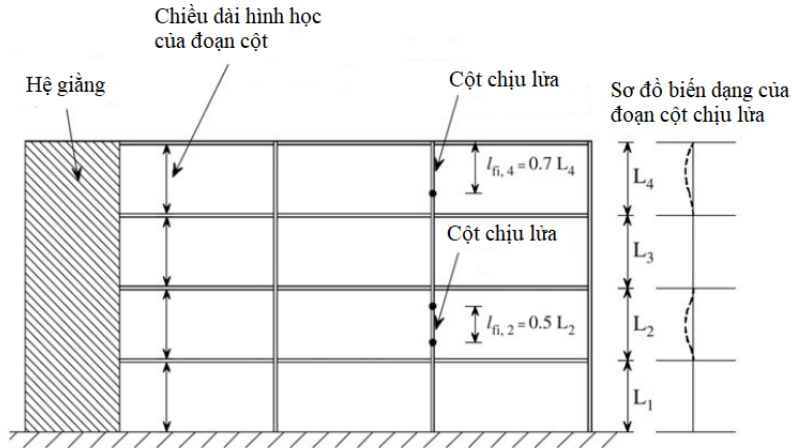
$$\varphi_{\theta_{\max}} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta_{\max}} + (\bar{\lambda}_{\theta_{\max}})^2 \right] \quad (8)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y} \quad (9)$$

$$\bar{\lambda}_{\theta_{\max}} = \bar{\lambda}_{\max} \sqrt{\frac{k_{y,\theta_{\max}}}{k_{E,\theta_{\max}}}} \quad (10)$$

Trong công thức (10), là độ mảnh tương đương lớn nhất trong cột ở điều kiện nhiệt độ thường [11]; $k_{E,\theta_{\max}}$ là hệ số suy giảm mô đun đàn hồi của thép tương ứng ở nhiệt độ lớn nhất $\theta_{\max}$ của bản cánh nén tại thời điểm t . Như vậy đối với cấu kiện cột, các công thức tính toán đều phụ thuộc vào giá trị nhiệt độ lớn nhất $\theta_{\max}$ đạt được trên tiết diện. Riêng đối với cột có tiết diện loại 4, các điều kiện chịu lực theo công thức $E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$ được xem là thỏa mãn khi giá trị nhiệt độ lớn nhất trên tiết diện $\theta_{\max}$ không được vượt qua giá trị θ_{crit} cho phép (thông thường $\theta_{crit} = 350^\circ\text{C}$).

Trong trường hợp chịu lửa, chiều dài tính toán của cột lấy tương tự như trường hợp nhiệt độ thường, tức là phụ thuộc nhiều vào liên kết hai đầu của cột. Các sơ đồ kết cấu thường gặp của cột trong các công trình nhà là sơ đồ cột hai đầu khớp, cột hai đầu liên kết cứng, ... Riêng với công trình nhà sử dụng sơ đồ giằng, chiều dài tính toán l_{fi} của cột trực tiếp chịu lửa có kể đến ảnh hưởng độ cứng của liên kết cột với cột ở tầng trên và tầng dưới khi xem mỗi tầng của tòa nhà sẽ bao gồm một không gian cháy riêng biệt với các tầng khác. Khi đó, dựa vào sơ đồ biến dạng của cột, chiều dài tính toán l_{fi} của đoạn cột ở tầng trung gian và tầng trệt (khi chân cột liên kết ngàm với móng) thường lấy bằng 0,5 chiều dài thực tế, đối với đoạn cột ở tầng trên cùng hoặc tầng trệt (khi chân cột liên kết khớp với móng) l_{fi} bằng 0,7 chiều dài thực tế (Hình 3).



Hình 3. Chiều dài tính toán của đoạn cột trong điều kiện chịu lửa trong sơ đồ giằng [4]

3. Phương pháp mô phỏng số

Trong phần mềm ANSYS Workbench, quá trình mô phỏng được thực hiện gồm hai giai đoạn. Giai đoạn thứ nhất là mô phỏng sự truyền nhiệt từ bề mặt cột qua lớp thạch cao vào trong cấu kiện, dựa trên phương trình vi phân đạo hàm riêng mô tả quá trình dẫn nhiệt trong không gian ba chiều (x, y, z) [6]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q = \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (11)$$

trong đó: Q là nhiệt lượng phát sinh trong phần tử đang xét; C, ρ, λ lần lượt là nhiệt dung riêng, tỷ trọng, hệ số dẫn nhiệt của vật liệu. Các đặc tính nhiệt này của vật liệu thép được lấy theo EN 1993-1-2. Hệ số dẫn nhiệt của thép thay đổi rõ rệt theo nhiệt độ, còn hệ số dẫn nhiệt của thạch cao thì xem là không đổi.

Giai đoạn này có kể đến ảnh hưởng của hiện tượng phát xạ và đối lưu, đặc biệt là sự đối lưu của phần không khí giữa lớp thạch cao và tiết diện cột. Hệ số truyền nhiệt do đối lưu có thể lấy là hằng số, bằng $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$ với những bề mặt tiếp xúc trực tiếp với lửa và bằng $9 \text{ W/m}^2\text{°C}$ với bề mặt không tiếp xúc với lửa [12]. Hệ số phát xạ của vật liệu thép lấy bằng 0,35; của thạch cao bằng 0,93 [12]. Trong mô hình phân tích nhiệt, sự tiếp xúc giữa lớp thạch cao và thép được xem là hoàn toàn (với giả thiết nhiệt độ thu được ở biên tiếp xúc giữa hai dạng vật liệu là không thay đổi), bỏ qua ảnh hưởng tương tác nhiệt của các hình thức liên kết (đỉnh vít, râu thép).

Giai đoạn thứ hai là mô phỏng ứng xử của cột thép vừa chịu lực nén vừa chịu tác động của nhiệt độ. Khi này, mối quan hệ ứng suất-biến dạng được thể hiện theo phương trình [6]:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}^{el} \quad (12)$$

trong đó: $\{\sigma\}$ là vectơ ứng suất $= [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{yz} \quad \sigma_{xz}]^T$; $[D]$ là ma trận độ cứng đàn hồi; $\{\varepsilon\}^{el}$ là vectơ biến dạng đàn hồi;

$$\{\varepsilon\}^{el} = \{\varepsilon\}^{tt} - \{\varepsilon\}^{pl} - \{\varepsilon\}^{th} - \{\varepsilon\}^{cr} \quad (13)$$

với $\{\varepsilon\}^{tt}$ là vectơ biến dạng tổng; $\{\varepsilon\}^{pl}$ là vectơ biến dạng dẻo; $\{\varepsilon\}^{th}$ là vectơ biến dạng nhiệt và $\{\varepsilon\}^{cr}$ là vectơ biến dạng do từ biến. Trong bài toán này, biến dạng do từ biến nhỏ hơn nhiều so với biến dạng nhiệt và biến dạng cơ học tức thời nên có thể không xét đến ảnh hưởng của từ biến.

- Biến dạng nhiệt:

$$\{\varepsilon\}^{th} = (\theta - \theta_{ref}) \begin{bmatrix} \alpha_x & \alpha_y & \alpha_z & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

trong đó: $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ là hệ số giãn nở vì nhiệt theo các phương x, y, z ; θ là nhiệt độ khảo sát biến dạng, giá trị của θ là kết quả của bài toán giải trong giai đoạn một; θ_{ref} là nhiệt độ tham chiếu khi chưa có biến dạng nhiệt.

Biến dạng nhiệt theo phương k bất kỳ được xác định

$$\varepsilon_k^{th} = \alpha_k (\theta - \theta_{ref}) \quad (15)$$

Khi α_k là một hàm của nhiệt độ θ , thì (15) sẽ có dạng:

$$\varepsilon_k^{th} = \int_{\theta_{ref}}^{\theta} \alpha_k(\theta) d\theta \quad (16)$$

Như vậy, trong quá trình mô phỏng cần thiết thực hiện một bước xuất kết quả θ thu được từ phân tích nhiệt và đưa vào phân tích kết cấu dưới dạng tác động nhiệt độ lên cấu kiện.

- Biến dạng cơ học:

Dựa trên mối quan hệ ứng suất-biến dạng của vật liệu thép trong điều kiện chịu lửa, có thể sử dụng một giá trị ứng suất tương đương σ_e để mô tả trường ứng suất như là một hàm của từng thành phần ứng suất riêng rẽ:

$$\sigma_e = f(\{\sigma\}) \quad (17)$$

trong đó: $\{\sigma\}$ là vectơ ứng suất.

Ở tại một nhiệt độ bất kỳ, khi σ_e đạt đến giá trị giới hạn chảy f_y thì vật liệu sẽ phát triển biến dạng dẻo. ANSYS mô tả một số mô hình ứng xử phổ biến của vật liệu theo các tiêu chuẩn chảy dẻo, áp dụng cho cả vật liệu đẳng hướng, vật liệu không đẳng hướng, vật liệu rời rạc như BISO (Bilinear Isotropic Hardening); MISO (Multilinear Isotropic Hardening); NLISO (Nonlinear Isotropic Hardening); BKIN (Classical Bilinear Kinematic Hardening); MKIN (Multilinear Kinematic Hardening); CHAB (Nonlinear Kinematic Hardening); ANISO (Aniso-tropic); DP (Drucker - Prager) [6]; ... Trong ví dụ này, với thép là vật liệu đồng nhất và đẳng hướng, mô hình ứng xử MISO là phù hợp để mô tả ứng xử ngoài đàn hồi. Khi đó, giai đoạn đàn hồi dùng mô đun đàn hồi và giai đoạn dẻo dùng mô đun tiếp tuyến. Các loại phần tử 3-D “solid body” từ bậc nhất đến bậc cao đều phù hợp với mô phỏng này. Trong ví dụ tính toán ở mục 4, phần tử 3-D HEX8 là phần tử solid bậc nhất gồm 6 mặt 8 nút được sử dụng.

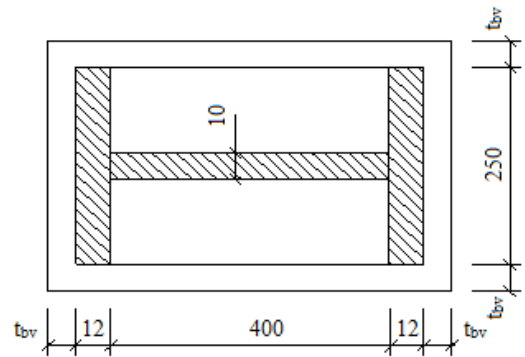
Trạng thái làm việc của lớp thạch cao cách nhiệt được bỏ qua, liên kết hai đầu cột (ngàm, khớp, tự do) được xem là không thay đổi trong suốt quá trình khảo sát. Các kết quả thu được dùng để kiểm tra khả năng chịu lực của cột theo điều kiện khống chế chuyển vị ngang:

$$\Delta_{fi,t,Sd} \leq \Delta_{fi,t,Rd} \quad (18)$$

trong đó $\Delta_{fi,t,Sd}$ là chuyển vị ngang lớn nhất trong cột tại thời điểm khảo sát t ; $\Delta_{fi,t,Rd}$ là chuyển vị ngang giới hạn của cột chịu lực trong điều kiện chịu lửa. Giá trị này thường được xác định dựa trên sự theo dõi tốc độ phát triển biến dạng của cột đến giai đoạn thay đổi đột ngột theo xu hướng tiến tới vô cực. Về mặt định lượng, trong các mẫu thí nghiệm với các cấu kiện có chiều dài 3-4 m, giới hạn $\Delta_{fi,t,Rd} = 120$ (mm) thường được sử dụng để đánh giá thời điểm phá hoại của cột [13].

4. Ví dụ so sánh bằng số

Xét cấu kiện cột thép có tiết diện chữ I được bọc bảo vệ bằng vật liệu thạch cao chống cháy có hệ số dẫn nhiệt $\lambda = 0,25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (Hình 4) có kích thước bản bụng $h_w = 400 \text{ mm}$, $t_w = 10 \text{ mm}$, bản cánh $b_f = 250 \text{ mm}$, $t_f = 12 \text{ mm}$, chiều cao $H = 4500 \text{ mm}$. Kịch bản cháy được xây dựng theo dạng đám cháy bao xung quanh cột và nhiệt độ tác dụng cả bốn mặt bọc thạch cao dọc theo chiều cao cột, có giá trị biến thiên phụ thuộc thời gian tuân theo công thức (1). Cột liên kết hai đầu khớp, chịu lực nén đứng tâm tại đỉnh cột là $N = 800 \text{ KN}$ (tương đương 50% khả năng chịu lực của cột trong điều kiện nhiệt độ thường). Giới hạn chảy của thép ở điều kiện nhiệt độ thường $f_y = 2350 \text{ daN/cm}^2$. Thực hiện khảo sát với bề dày tấm thạch cao bảo vệ t_{bv} tương ứng là 13 mm và 16 mm.



Hình 4. Tiết diện cột thép bọc thạch cao dạng hình hộp trong ví dụ

4.1. Kết quả thu được về nhiệt độ

Thực hiện khảo sát trong khoảng thời gian từ 0 đến 75 phút, kết quả nhiệt độ theo phương pháp đơn giản hóa và phương pháp mô phỏng số được thể hiện trong Bảng 2.

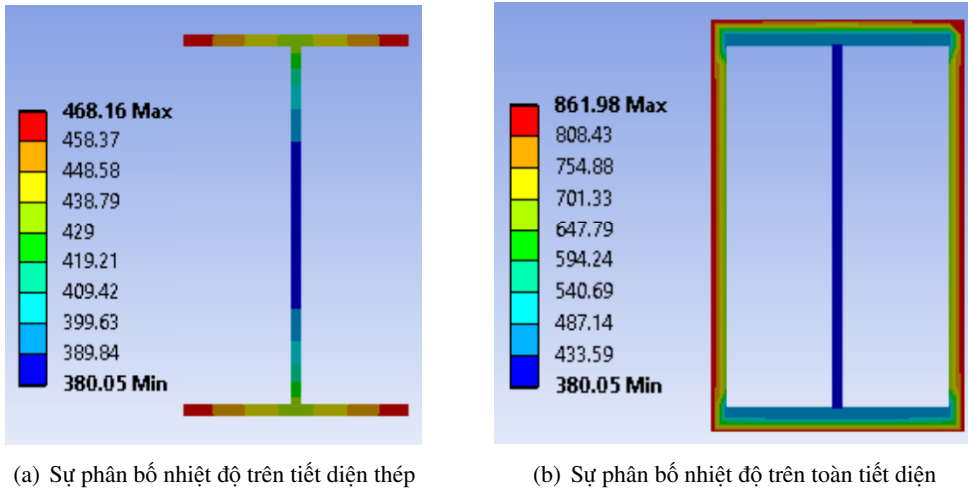
Bảng 2. Giá trị nhiệt độ thu được tính theo hai phương pháp

Thời gian (phút)	Nhiệt độ $\theta_{\max}$ trên tiết diện với thạch cao 13 mm ($^\circ\text{C}$)		Nhiệt độ $\theta_{\max}$ trên tiết diện với thạch cao 16 mm ($^\circ\text{C}$)	
	Theo phương pháp đơn giản	Theo phương pháp mô phỏng	Theo phương pháp đơn giản	Theo phương pháp mô phỏng
10	126,81	324,15	98,25	312,33
15	198,34	362,15	156,57	344,45
20	267,96	398,42	215,12	376,20
25	333,93	433,83	272,12	407,75
30	395,60	469,24	326,74	439,30
35	452,80	500,30	378,62	468,16
40	505,58	530,82	427,61	497,01
45	554,13	561,61	473,67	525,87
50	598,71	587,57	516,87	551,88
55	639,59	613,53	557,30	576,66
60	677,06	639,48	595,10	602,05
65	711,42	660,09	630,40	623,49
70	742,88	680,70	663,35	644,93
75	771,75	701,30	694,09	666,37

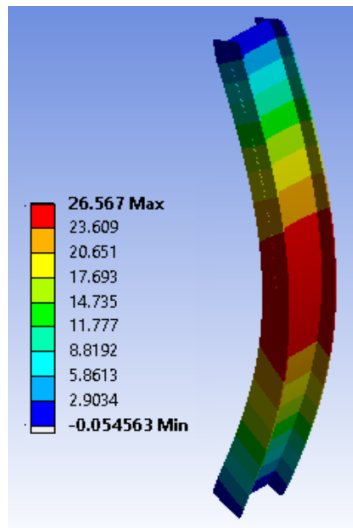
4.2. Kết quả thu được về khả năng chịu lực của cột

Dựa vào kết quả tính lực nén tới hạn theo phương pháp đơn giản hóa được thể hiện trong Bảng 3, khi bọc thạch cao 13 mm cột có thể chịu được 35 phút ($N_{fi,t,Rd} = 802,7\text{KN}$) còn khi bọc 16 mm cột có thể chịu được 45 phút ($N_{fi,t,Rd} = 858,7\text{ KN}$).

Dựa vào kết quả về tốc độ phát triển và giá trị chuyển vị ngang giới hạn theo phương pháp mô phỏng số được thể hiện trong Hình 7, khi bọc thạch cao 13 mm cột có thể chịu được 25 phút còn khi bọc 16mm cột có thể chịu được 45 phút.



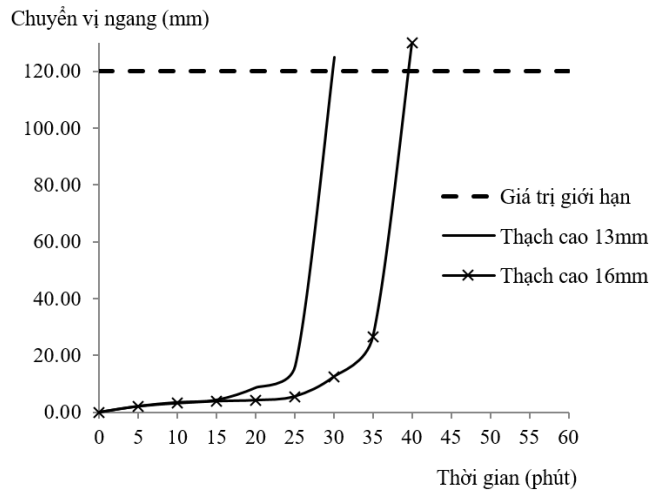
Hình 5. Sự phân bố nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$) trên tiết diện cột bọc thạch cao 16 mm tại thời điểm $t = 35$ phút theo mô phỏng



Hình 6. Chuyển vị ngang (mm) của cột bọc thạch cao 16 mm tại thời điểm $t = 35$ phút theo mô phỏng

Bảng 3. Kết quả lực nén tối hạn của cột theo phương pháp tính đơn giản hóa

Thời gian (phút)	Thạch cao 13 mm				Thạch cao 16 mm			
	Nhiệt độ $\theta_{\max}$ (°C)	$k_{y,\theta_{\max}}$	$k_{E,\theta_{\max}}$	$N_{fi,t,Rd}$ (KN)	Nhiệt độ $\theta_{\max}$ (°C)	$k_{y,\theta_{\max}}$	$k_{E,\theta_{\max}}$	$N_{fi,t,Rd}$ (KN)
10	126,81	1	0,974	1036,3	98,25	1	1	1146,3
15	198,34	1	0,902	1002,6	156,57	1	0,944	1122,8
20	267,96	1	0,832	966,6	215,12	1	0,885	1096,0
25	333,93	1	0,767	929,9	272,12	1	0,828	1067,9
30	395,60	1	0,704	890,8	326,74	1	0,806	1056,4
35	452,80	0,883	0,647	802,7	378,62	1	0,763	1032,6
40	505,58	0,764	0,585	709,8	427,61	0,947	0,676	950,1
45	554,13	0,613	0,443	553,4	473,67	0,839	0,627	858,7
50	598,71	0,476	0,316	411,3	516,87	0,730	0,553	751,5

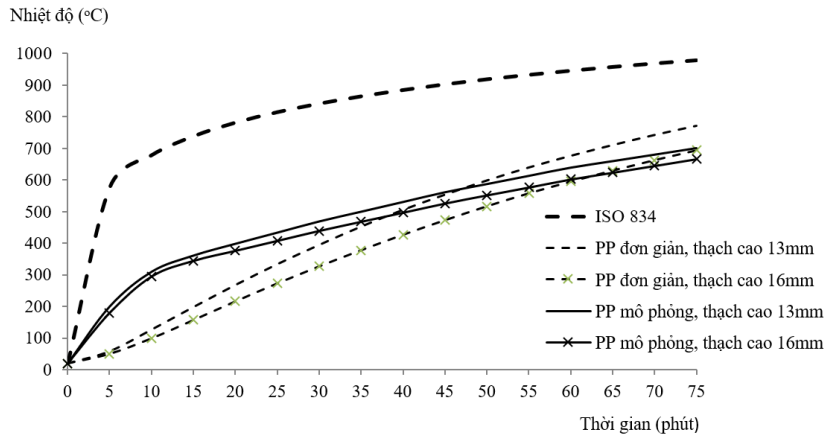


Hình 7. Mối quan hệ chuyển vị ngang - thời gian của cột theo phương pháp mô phỏng

4.3. Nhận xét, so sánh kết quả thu được

Tại thời điểm 5-10 phút đầu, tốc độ tăng nhiệt thu được theo phương pháp mô phỏng (dựa trên đường cong gia nhiệt ISO 834) khá lớn so với phương pháp tính đơn giản hóa. Nhưng sau đó, tốc độ tăng nhiệt của cả hai phương pháp khá đều đặn, cụ thể khi lớp thạch cao dày 16 mm, tốc độ tăng nhiệt trung bình từ phút 10 đến phút 75 là 9,15 °C/phút với phương pháp đơn giản hóa và 5,72 °C/phút theo phương pháp mô phỏng. Tại thời điểm 75 phút, độ chênh lệch nhiệt độ giữa hai phương pháp tương ứng là 10,08% khi lớp thạch cao dày 13 mm và 4,15% khi lớp thạch cao dày 16 mm. Kết quả này có thể được giải thích vì phương pháp đơn giản hóa xét tốc độ tăng nhiệt theo công thức (2) là khá đều trong từng khoảng Δt khảo sát là 30 giây, còn phương pháp mô phỏng lại tuân theo tốc độ tăng nhiệt theo công thức (1). Hình 8 cho thấy đường đồ thị tăng nhiệt theo phương pháp mô phỏng tương đồng với đường đồ thị của ISO 834.

Phương pháp tính đơn giản hóa xác định khả năng chịu lực của cột dựa trên lực nén tối hạn còn phương pháp mô phỏng số dựa trên tốc độ phát triển biến dạng trong cột. Hình 7 cho thấy dưới tác



Hình 8. Kết quả biến thiên nhiệt độ theo thời gian thu được theo hai phương pháp

động của nhiệt độ, vật liệu có sự thay đổi các đặc trưng cơ lý theo hướng giảm nhanh khả năng chịu lực dẫn đến hiện tượng chuyển vị ngang tăng đột ngột và đường đồ thị dốc mạnh khi đạt đến giá trị giới hạn. Trong khi đó, các số liệu thu được về lực nén tới hạn trong Bảng 3 giảm với tốc độ khá đều theo thời gian. Các kết luận về khả năng chịu lực của cột theo hai phương pháp được tổng hợp trong Bảng 4.

Bảng 4. Kết luận về khả năng chịu lực của cột theo hai phương pháp

Bề dày lớp thạch cao (mm)	Phương pháp tính đơn giản			Phương pháp mô phỏng số		
	Thời gian chịu lửa (phút)	Nhiệt độ $\theta_{\max}$ (°C)	Bậc chịu lửa	Thời gian chịu lửa (phút)	Nhiệt độ $\theta_{\max}$ (°C)	Bậc chịu lửa
13	35	452,80	R30	25	433,83	R20
16	45	473,67	R40	35	468,16	R30

Kết quả thu được cho thấy khả năng chịu lực của cột theo phương pháp tính đơn giản hóa cao hơn so với phương pháp mô phỏng số. Các nguyên nhân dẫn đến kết quả này có thể được giải thích như sau:

- Tốc độ tăng nhiệt trong hai phương pháp dựa trên nguyên tắc khác nhau.
- Tiêu chí đánh giá trạng thái phá hoại cột khác nhau.
- Tốc độ tăng nhiệt đều trong phương pháp tính đơn giản hóa dẫn đến tốc độ giảm khả năng chịu lực của cột cũng tương đối đều. Các công thức xác định lực nén tới hạn trong cột chỉ xét đến giá trị nhiệt độ lớn nhất trên tiết diện, các kết quả thu được chưa xét đến biến dạng nhiệt trong cấu kiện.
- Phương pháp mô phỏng số có xét được các yếu tố phức tạp hơn như hiện tượng bức xạ, đối lưu trong quá trình truyền nhiệt, các phân tích phi tuyến vật liệu, phi tuyến hình học trong kết cấu.

5. Kết luận và kiến nghị

Hai phương pháp được trình bày trong bài báo dựa trên nguyên tắc khác nhau để xác định nhiệt độ và đánh giá khả năng chịu lực của cấu kiện cột tiết diện chữ I bọc thạch cao dạng hình hộp. Phương pháp tính đơn giản hóa theo các công thức của EN 1993-1-2 cho thấy tính hiệu quả trong các thiết kế

đơn giản, đặc biệt là với các cấu kiện điển hình. Phương pháp mô phỏng số cho thấy ứng xử rõ ràng của cấu kiện chịu lực trong điều kiện chịu lửa thông qua mức độ phát triển biến dạng, hiệu quả trong các phân tích an toàn cháy. Kiến nghị trong quy trình thiết kế chống cháy, phương pháp đơn giản hóa được dùng để lựa chọn sơ bộ hình thức bọc và bề dày lớp thạch cao, phương pháp mô phỏng được dùng để kiểm tra lại và thực hiện tối ưu thiết kế.

Thực tế tính toán cho thấy có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến kết quả thu được giữa hai phương pháp như phương thức tác động nhiệt, hệ số giảm tải trọng tác dụng trong điều kiện chịu lửa, tương tác giữa biến dạng nhiệt và biến dạng cơ học, các tiêu chí đánh giá trạng thái phá hoại, ... Đây là những nội dung cần được nghiên cứu tiếp để có thể rút ra được những kết luận cần thiết, hỗ trợ cho việc hoàn thiện quy trình thiết kế chống cháy cho cấu kiện cột nói riêng và cả hệ kết cấu nói chung.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài “Đánh giá khả năng chịu lực của cột thép bọc thạch cao bảo vệ trong điều kiện chịu lửa theo phương pháp đơn giản hóa và phương pháp mô phỏng số” mã số 53– 2021/KH XD.

Tài liệu tham khảo

- [1] Quý, N. N. (2002). *Công nghệ vật liệu cách nhiệt*. Nhà xuất bản Xây dựng.
- [2] Rahmanian, I. (2011). *Thermal and mechanical properties of gypsum boards and their influences on fire resistance of gypsum boards based system*. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering.
- [3] QCVN 06:2020/BXD. *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về an toàn cháy cho nhà và công trình*. Bộ Xây dựng, Việt Nam.
- [4] EN 1993-1-2:2005. *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. British Standards Institution, UK.
- [5] Schleich, J., Dotrepe, J., Franssen, J. (1986). [Numerical Simulations Of Fire Resistance Tests On Steel And Composite Structural Elements Or Frames](#). *Fire Safety Science*, 1:311–323.
- [6] Kohnke, P. (1999). *ANSYS Theory reference (Release 5.6)*. ANSYS, Inc, Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317.
- [7] Phan, L. T., McAllister, T. P., Gross, J. L., Hurley, M. J. (2009). *Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings*. National Institute of Standards and Technology.
- [8] TCVN 9311-7:2012 (ISO 834-7:1999). *Thử nghiệm chịu lửa - Các bộ phận công trình xây dựng - Phần 7: Các yêu cầu riêng đối với cột*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [9] Tan, K.-H., Toh, W.-S., Huang, Z.-F., Phng, G.-H. (2007). [Structural responses of restrained steel columns at elevated temperatures. Part 1: Experiments](#). *Engineering Structures*, 29(8):1641–1652.
- [10] Thu, P. T. N., Tuấn, P. Q. (2019). [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](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 13(5V):47–54.
- [11] EN 1993-1-1:2005. *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*.
- [12] Mikron Instrument Company, Inc. *Table of emissivity of various surfaces*.
- [13] BS 476: Part 20:1987. *Method for determination of the fire resistance of elements of construction (general principles)*. British Standards Institution, UK.