Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (5V): 13–27

KHẢ NĂNG CHỊU UỐN CỦA BẢN BÊ TÔNG CỐT THÉP DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA ĐÁM CHÁY XE ĐIỆN TRONG KHÔNG GIAN NGẦM

Vũ Thái Sơn[a], Trần Việt Hùng[a], Nguyễn Ngọc Tuyển[a], Nguyễn Thị Nguyệt Hằng[a,*]

[a]*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 04/9/2026, Sửa xong 20/10/2026, Chấp nhận đăng 23/10/2026

Tóm tắt

Bài báo đánh giá khả năng chịu uốn của bản bê tông cốt thép hai phương dưới đám cháy xe điện trong không gian ngầm, chỉ xét tiêu chí chịu lực R. Tác động nhiệt lấy từ đường cong tỏa nhiệt của xe nguyên chiếc và mô hình đám cháy cục bộ của EN 1991-1-2, hiệu chỉnh theo thí nghiệm gara ngầm. Sức kháng tiết diện tính bằng phương pháp đường đẳng nhiệt 500 °C và phương pháp phân lớp dùng hệ số suy giảm của EN 1992-1-2, rồi đưa vào phân tích đường chảy dẻo của ô bản 7,5 × 7,5 m. Khi lớp bảo vệ còn nguyên, cốt thép chỉ đạt 308 °C và tải trọng giới hạn không giảm. Bề mặt bê tông đạt 380 °C sau 7,8 phút, gần như cùng lúc với ISO 834 (8,0 phút), nhưng từ phút 8 đến 15 được nung nhanh hơn rõ rệt (79,5 so với 27,2 K/phút); tốc độ nung là một yếu tố liên quan đến nguy cơ bong tróc. Nếu mất 30 mm lớp bảo vệ, tải trọng giới hạn còn 90%; khi cháy lan theo dãy xe, còn 59% (khoảng lan truyền 12 phút), hoặc 54% (thấp nhất 53%) nếu vật liệu không hồi phục cường độ khi nguội. Hai phương pháp tiết diện cho tải trọng giới hạn lệch nhau không quá 0,2% khi một xe cháy.

Từ khoá: đám cháy xe điện; khả năng chịu uốn; đám cháy cục bộ; bản hai phương; bong tróc nổ; đường chảy dẻo.

FLEXURAL RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE SLABS UNDER ELECTRIC VEHICLE FIRES IN UNDERGROUND SPACES

Abstract

This study evaluates the flexural resistance of two-way reinforced concrete slabs under an electric vehicle fire in underground spaces, considering only the load-bearing criterion R. The thermal action combines the heat release rate curve of a full-scale vehicle fire with the localized fire model of EN 1991-1-2, calibrated against underground car park test data. The sectional resistance, computed with the 500 °C isotherm method and a layer-by-layer method using the strength reduction factors of EN 1992-1-2, is used as input to a yield-line analysis of a 7.5 × 7.5 m slab panel. With the cover intact, the reinforcement reaches only 308 °C and the ultimate load does not decrease. The concrete surface reaches 380 °C after 7.8 min, almost at the same time as under ISO 834 heating (8.0 min), but heats markedly faster between minutes 8 and 15 (79.5 versus 27.2 K/min); heating rate is one of the factors associated with spalling risk. If 30 mm of cover is lost, the ultimate load retains 90% of its pre-fire value; under fire spread along a row of vehicles, it retains 59% (12 min spread interval), or 54% (53% at worst) if the materials do not recover strength during cooling. The two sectional methods give ultimate loads within 0.2% of each other for single-vehicle fires.

Keywords: electric vehicle fire; flexural resistance; localized fire; two-way slab; explosive spalling; yield-line analysis.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(5V)-02 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Số lượng xe sử dụng pin lithium-ion trong các không gian ngầm tại đô thị Việt Nam đang tăng nhanh. Lộ trình hạn chế, tiến tới loại bỏ xe mô tô, xe gắn máy sử dụng nhiên liệu hóa thạch trong Vành đai 1 Hà Nội [1] đã được điều chỉnh về thời điểm thực hiện, nhưng vẫn cho thấy xu hướng chuyển đổi này sẽ tiếp diễn. Tầng hầm để xe tại các nhà cao tầng và khu vực gửi xe tại ga đường sắt đô thị có mật độ xe cao, trần thấp, đồng thời gây khó khăn cho việc phát hiện cháy, thoát khói và tiếp cận chữa cháy; riêng gara ngầm còn phải đáp ứng các yêu cầu bổ sung theo quy chuẩn chuyên ngành [2].

Trong thí nghiệm quy mô thực của Kang và cs. [3], xe điện sử dụng pin 64 kWh đạt tốc độ tỏa nhiệt đỉnh 6,51–7,25 MW, tổng nhiệt lượng 8,45–9,03 GJ và thời gian cháy khoảng 70 phút. Tổng hợp

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* hangntn@huce.edu.vn (Hằng, N. T. N.)

33 thí nghiệm, Mohd Tohir và Martín-Gómez [4] xác định tốc độ tỏa nhiệt đỉnh trung bình của xe điện là 6,5 MW, trong khi Hodges và cs. [5] báo cáo dải giá trị 5–10 MW. Khi pin mất kiểm soát nhiệt (thermal runaway), có thể xuất hiện ngọn lửa dạng tia [6]. Các đường cong tỏa nhiệt nêu trên và số liệu từ 18 thí nghiệm quy mô thực mới công bố [7] đều mô tả đám cháy toàn xe, trong đó pin chỉ là một thành phần. Vì vậy, bài báo sử dụng thuật ngữ "đám cháy xe điện" thay vì "đám cháy pin". Ảnh hưởng của các đặc trưng đám cháy xe điện đến kết cấu mới được quan tâm trong thời gian gần đây. Heo và cs. [8] cho thấy bản rỗng bê tông đúc sẵn không đáp ứng yêu cầu chịu lửa ở tỷ số tải trọng 0,7 dưới tác động của đường cong cháy xe điện; cùng nhóm [9] ghi nhận nhiệt độ bề mặt bản và dầm lên tới khoảng 1250 °C trong nhà để xe tự động. Navaratnam và cs. [10] nhấn mạnh nguy cơ bong tróc nổ do nhiệt, khi nhiệt độ đám cháy phương tiện có thể nhanh chóng vượt ngưỡng khởi phát hiện tượng này. Kang và cs. [11] đo được nhiệt độ trung bình của dòng khí sát trần khoảng 1100 °C trong thí nghiệm trên mô hình một góc gara ngầm.

Tại Việt Nam, sàn và trần tầng hầm, tầng nửa hầm của công trình có bậc chịu lửa I, II và III phải đạt giới hạn chịu lửa tối thiểu REI 90 [12], xác định theo đường gia nhiệt tiêu chuẩn ISO 834 [13]. REI gồm ba tiêu chí độc lập: chịu lực (R), toàn vẹn (E) và cách nhiệt (I) [14]. Bản sửa đổi năm 2023 của QCVN 06:2022/BXD [15] cho phép xác định giới hạn chịu lửa bằng mô phỏng cháy theo tải trọng cháy thực tế, song cách tiếp cận này chưa được áp dụng cho đám cháy xe điện. Phương pháp tính đơn giản theo EN 1992-1-2 đối với bản bê tông cốt thép đã được hệ thống hóa cho điều kiện Việt Nam [14], trong khi phương pháp đường đẳng nhiệt 500 °C đã được áp dụng cho dầm chịu uốn khi cháy [16].

Bài báo đánh giá khả năng chịu uốn (tiêu chí R) của bản bê tông cốt thép hai phương dưới tác động của đám cháy xe điện. Tác động nhiệt từ một xe cháy được xác định qua đường cong tỏa nhiệt và mô hình đám cháy cục bộ, sau đó truyền qua chiều dày bản. Sức kháng uốn tiết diện, xác định bằng phương pháp đường đẳng nhiệt 500 °C và phương pháp phân lớp sử dụng hệ số suy giảm cường độ theo EN 1992-1-2, được đưa vào phân tích đường chảy dẻo để xác định tải trọng giới hạn của ô bản. Lớp bê tông bảo vệ được xét trong hai kịch bản: còn nguyên và mất 30 mm; đồng thời xem xét kịch bản cháy lan theo dãy xe. Bài báo không xét các tiêu chí E và I, khả năng chịu cắt, chọc thủng, ứng xử màng kéo và sức kháng còn lại sau khi nguội. Do bong tróc được giả định theo kịch bản thay vì dự báo bằng mô hình ẩm–nhiệt, kết quả không được dùng để kết luận về khả năng đáp ứng yêu cầu REI 90.

2. Tác động nhiệt của đám cháy xe điện

2.1. Đường cong tỏa nhiệt

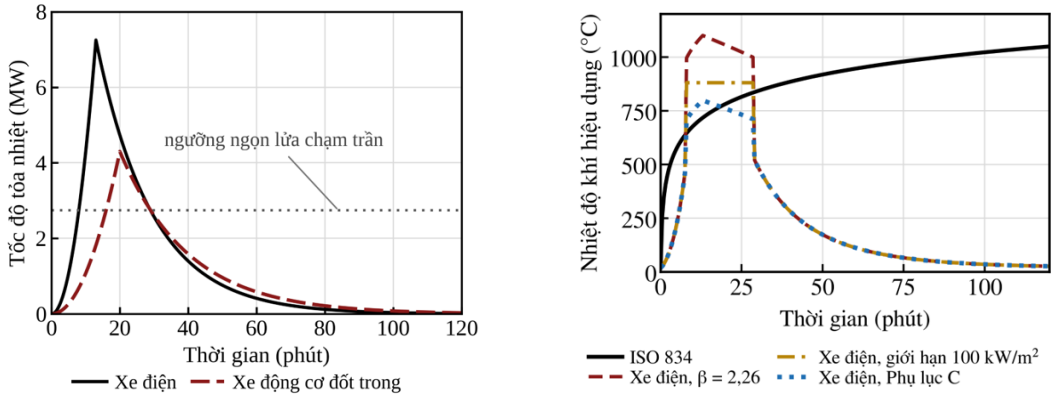
Đường cong tốc độ tỏa nhiệt gồm giai đoạn tăng trưởng theo luật bình phương thời gian và giai đoạn suy giảm theo hàm mũ [4, 5]:

$$\dot{Q}(t) = \begin{cases} \dot{Q}_{\max}\left(\dfrac{t}{t_p}\right)^2, & t \le t_p \\ \dot{Q}_{\max}\exp\left[-\dfrac{t-t_p}{\tau}\right], & t > t_p \end{cases} \tag{1}$$

trong đó $\dot{Q}(t)$ là tốc độ tỏa nhiệt tại thời điểm t, $\dot{Q}_{\max}$ là tốc độ tỏa nhiệt đỉnh, t_p là thời điểm đạt đỉnh và τ là hằng số thời gian suy giảm. Hằng số τ không phải tham số tự do mà được giải từ điều kiện cân bằng tổng nhiệt lượng tỏa ra E:

$$\tau = \frac{E}{\dot{Q}_{\max}} - \frac{t_p}{3} \tag{2}$$

Hình 1 trình bày các đặc trưng tỏa nhiệt của đám cháy phương tiện và tác động nhiệt tương ứng, làm cơ sở lựa chọn các tham số đầu vào cho mô hình phân tích nhiệt của bản. Ba tham số được lựa chọn để đồng thời tái lập ba đại lượng đo được gồm tốc độ tỏa nhiệt đỉnh, thời điểm đạt đỉnh và tổng nhiệt lượng tỏa ra. Với xe điện, các giá trị đó là 7,25 MW, 13,0 phút và 9,03 GJ [3], và (2) cho τ = 16,4 phút. Đường cong của xe động cơ đốt trong trên Hình 1(a) dùng 4,30 MW, 20,0 phút và 6,90 GJ [4, 17], tương ứng τ = 20,1 phút.



(a) Đường cong tốc độ tỏa nhiệt của xe điện và xe động cơ đốt trong

(b) Nhiệt độ khí hiệu dụng tại tâm đám cháy xe điện so với đường gia nhiệt ISO 834

Hình 1. Tỏa nhiệt và tác động nhiệt của đám cháy phương tiện

2.2. *Đám cháy cục bộ và ngọn lửa chạm trần*

Tầng hầm để xe được giả thiết có chiều cao thông thủy 2,7 m, nguồn cháy đặt cao 0,4 m so với sàn, nên khoảng cách từ nguồn cháy đến trần là H = 2,3 m. Chiều dài ngọn lửa theo phương đứng L_f được xác định theo công thức (C.1), Phụ lục C của EN 1991-1-2 [18]:

$$L_f = -1{,}02\,D + 0{,}0148\,\dot{Q}^{2/5} \tag{3}$$

trong đó D = 3,2 m là đường kính tương đương của nguồn cháy, lấy theo diện tích hình chiếu của xe con. Ngọn lửa chạm trần ($L_f > H$) khi tốc độ tỏa nhiệt $\dot{Q}$ vượt 2,74 MW, tức vào khoảng phút thứ 8 với xe điện. Khi đó, thông lượng nhiệt tới mặt dưới bản được tính theo các công thức (C.5)–(C.11) của [18]:

$$\dot{h} = \begin{cases} 100\,000, & y \le 0{,}30 \\ 136\,300 - 121\,000\,y, & 0{,}30 < y < 1{,}0 \\ 15\,000\,y^{-3{,}7}, & y \ge 1{,}0 \end{cases}; \quad y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'} \tag{4}$$

trong đó $\dot{h}$ là thông lượng nhiệt tới, r là khoảng cách ngang từ tâm đám cháy đến điểm đang xét, L_h là chiều dài ngọn lửa theo phương ngang, H là khoảng cách đứng từ nguồn cháy đến trần, z' là vị trí theo phương đứng của nguồn nhiệt ảo theo Phụ lục C [18] và y là tham số không thứ nguyên dùng để chọn nhánh của (4). Thông lượng nhiệt thuần được xác định theo các công thức (3.1)–(3.3) của EN 1991-1-2 [18]:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c\,(\Theta_m - 20) - \Phi\,\varepsilon_m \varepsilon_f\,\sigma\left[(\Theta_m + 273)^4 - 293^4\right] \tag{5}$$

trong đó $\dot{h}_{net}$ là thông lượng nhiệt thuần, $\dot{h}$ là thông lượng nhiệt tới, xác định theo (4), α_c là hệ số truyền nhiệt đối lưu, Θ_m là nhiệt độ bề mặt cấu kiện, ε_m và ε_f lần lượt là hệ số phát xạ của bề mặt vật liệu và

của ngọn lửa, Φ là hệ số cấu hình và σ là hằng số Stefan–Boltzmann ($5{,}67 \times 10^{-8}$ W/m^2/K^4). Nghiên cứu lấy $\alpha_c = 35$ W/m^2/K cho mô hình cháy tự nhiên, $\varepsilon_m = 0{,}7$ theo EN 1992-1-2 [19], $\varepsilon_f = 1{,}0$ và $\Phi = 1$; nhiệt độ môi trường ban đầu là 20 °C (293 K).

Trước khi ngọn lửa chạm trần, nhiệt độ khí hiệu dụng tính từ thông lượng nhiệt tới, kể cả hệ số hiệu chỉnh ở Mục 2.3, được chặn trên bởi nhiệt độ cột lửa theo công thức (C.2) của EN 1991-1-2 [18]. Giả thiết này bỏ qua lớp khí nóng tích tụ dưới trần đã quan sát trong thí nghiệm gara ngầm, nên thiên về đánh giá thấp tác động nhiệt lúc đầu.

2.3. Hiệu chỉnh cho không gian kín và ba mức tác động nhiệt

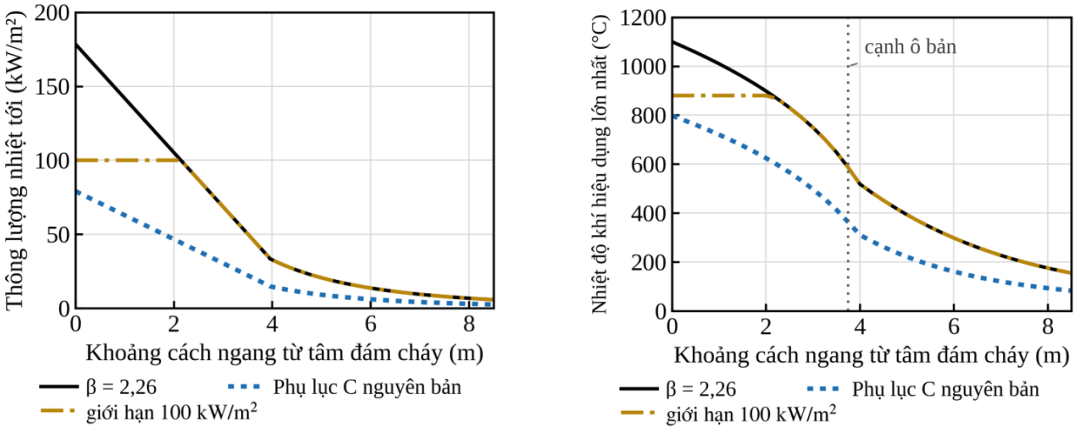
Áp dụng (4) cho xe điện, thông lượng nhiệt tới lớn nhất tại tâm vùng ngọn lửa chạm trần là 79,1 kW/m^2, tương ứng nhiệt độ khí hiệu dụng 798 °C, thấp hơn đáng kể so với nhiệt độ dòng khí trần trung bình khoảng 1100 °C đo được trong thí nghiệm quy mô thực trên mô hình một góc gara ngầm [11]. Để hiệu chỉnh, thông lượng nhiệt tới tính theo Phụ lục C được nhân với hệ số β, xác định từ cân bằng nhiệt của một bề mặt có nhiệt độ bằng nhiệt độ đo được:

$$\beta\, \dot{h}(0) = \alpha_c \left(\Theta_{jet} - 20\right) + \varepsilon_m\, \sigma \left[\left(\Theta_{jet} + 273\right)^4 - 293^4\right] \tag{6}$$

trong đó β là hệ số hiệu chỉnh do không gian kín, $\dot{h}(0)$ là thông lượng nhiệt tới lớn nhất tại tâm vùng chạm trần theo Phụ lục C (79,1 kW/m^2) và Θ_{jet} là nhiệt độ dòng khí trần; các ký hiệu còn lại như ở (5).

Với $\Theta_{jet} = 1100$ °C, xác định được $\beta = 2{,}26$; giá trị này chỉ dùng cho trường hợp khảo sát. Thí nghiệm [11] cũng đo được thông lượng nhiệt trên 225 kW/m^2, nhưng hệ số được hiệu chỉnh theo nhiệt độ dòng khí trần: các đầu đo thông lượng đặt ở cao độ 1270 mm, nằm trong vùng cột lửa, nên không đại diện cho thông lượng tới mặt dưới bản và có thể làm đánh giá quá mức tác động nhiệt.

Phụ lục C của [18] giới hạn tổng thông lượng nhiệt tới ở 100 kW/m^2 khi có nhiều đám cháy cục bộ, trong khi giá trị sau hiệu chỉnh tại tâm vùng chạm trần là $\beta\dot{h}(0) = 178{,}6$ kW/m^2. Trường hợp $\beta = 2{,}26$ vì vậy nằm ngoài giới hạn này và được xem là một hiệu chỉnh cho điều kiện khảo sát, không thay thế hay mở rộng phạm vi áp dụng của mô hình tiêu chuẩn. Kết quả được báo cáo theo ba mức tác động nhiệt: Phụ lục C nguyên bản, giới hạn 100 kW/m^2 và hiệu chỉnh $\beta = 2{,}26$ theo thí nghiệm [11].



(a) Thông lượng nhiệt tới lớn nhất

(b) Nhiệt độ khí hiệu dụng lớn nhất

Hình 2. Phân bố tác động nhiệt theo khoảng cách ngang

Nhiệt độ khí hiệu dụng tại mỗi vị trí được suy từ thông lượng nhiệt tới theo (6) để so sánh trực tiếp với đường gia nhiệt ISO 834 (Hình 1(b)). Hình 2 cho thấy ở cả ba mức, thông lượng nhiệt tới

giảm nhanh khi ra xa tâm đám cháy, và vùng chịu tác động nhiệt đáng kể của một xe cháy nhỏ hơn kích thước ô bản 7,5 m.

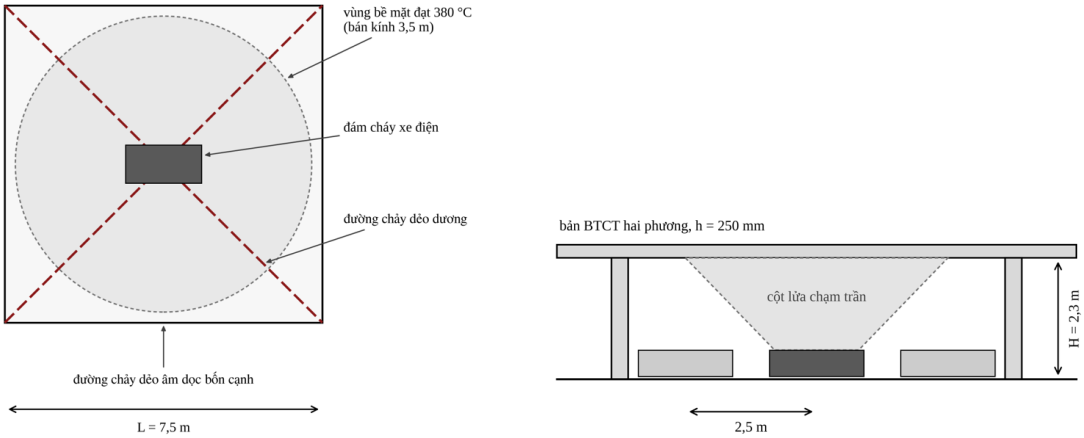
3. Đối tượng khảo sát và mô hình phân tích

3.1. Kích thước, vật liệu và tải trọng

Sơ đồ bài toán khảo sát, bao gồm mặt bằng bản với vị trí đám cháy và mặt cắt tầng hầm để xe, được thể hiện trên Hình 3. Ô bản khảo sát là ô giữa của một hệ sàn bê tông cốt thép liên tục, làm việc hai phương, kích thước $7{,}5 \times 7{,}5$ m, chiều dày $h = 250$ mm, dùng bê tông C30/37 cốt liệu gốc silic và cốt thép $f_{yk} = 500$ MPa (Hình 3(a)). Tải trọng thường xuyên gồm trọng lượng bản thân 6,25 kN/m^2 và các lớp hoàn thiện 1,50 kN/m^2. Hoạt tải 5,00 kN/m^2 lấy theo TCVN 2737:2023 [20] cho đường dốc và đoạn đường vào cửa tầng hầm, nửa hầm của khu vực để xe loại F (Bảng 5 của [20]); giá trị này lớn hơn mức 3,5 kN/m^2 của khu vực để xe nên thiên về an toàn.

Theo EN 1990 [21], với hệ số riêng phần $\gamma_G = 1{,}35$ và $\gamma_Q = 1{,}5$, tổ hợp tải trọng cơ bản cho $w_{Ed} = 17{,}96$ kN/m^2. Trong tình huống cháy, EN 1991-1-2 [18] cho phép dùng tổ hợp tải trọng với hệ số tổ hợp ψ_2 lấy theo EN 1990 [21]; với khu vực để xe loại F, $\psi_2 = 0{,}6$, nên tải trọng tính toán còn $w_{fi} = 10{,}75$ kN/m^2.

Nếu lấy hoạt tải theo EN 1991-1-1 [22] (1,5 đến 2,5 kN/m^2 cho khu vực để xe loại F, tùy Phụ lục quốc gia), tải trọng trong tình huống cháy còn 8,65 đến 9,25 kN/m^2; khi đó mọi hệ số an toàn ở Mục 4 tăng theo cùng một tỷ số, bằng 1,16 đến 1,24 tùy giá trị hoạt tải, và cốt thép bố trí dưới đây vẫn đủ. Vì vậy tỷ lệ giữ lại $\lambda_{fi}/\lambda_{20}$, tức tỷ số giữa hệ số an toàn khi cháy và ở nhiệt độ thường (Mục 3.4), không phụ thuộc vào lựa chọn này.



(a) Mặt bằng ô bản với sơ đồ đường chảy dẻo và vùng bị nung

(b) Mặt cắt qua tầng hầm để xe

Hình 3. Sơ đồ bài toán

Mô men uốn theo hệ số tra bảng cho ô giữa của sàn liên tục là 24,2 kN · m/m tại nhịp và 31,3 kN · m/m trên gối. Ở nhịp, cốt thép do diện tích tối thiểu $A_{s,\min} = 332$ mm^2/m theo EN 1992-1-1 [23] khống chế:

$$A_{s,\min} = \max\left(0{,}26\,\frac{f_{ctm}}{f_{yk}},\ 0{,}0013\right) b\,d \tag{7}$$

trong đó f_{ctm} là cường độ chịu kéo trung bình của bê tông, f_{yk} là giới hạn chảy đặc trưng của cốt thép, b là bề rộng tính toán của dải bản và d là chiều cao làm việc của tiết diện.

Cốt thép bố trí gồm $\phi 10a200$ (393 mm^2/m mỗi phương) ở lưới dưới và $\phi 12a200$ (565 mm^2/m mỗi phương) ở lưới trên tại gối, đủ chịu các mô men nêu trên. Mỗi mặt bản có hai lớp thanh của lưới hai phương: khoảng cách đến trục là 30 mm với lớp ngoài, 40 mm (lưới dưới) và 42 mm (lưới trên) với lớp trong. Chênh lệch 10 mm và 12 mm giữa hai lớp ảnh hưởng trực tiếp đến nhiệt độ cốt thép và sức kháng tính được ở Mục 4.3. Khoảng cách đến trục 30 mm của lớp ngoài thiên về an toàn so với mức 15 mm trong bảng tra của EN 1992-1-2 cho bản hai phương có giới hạn chịu lửa REI 90 [14].

3.2. Truyền nhiệt trong bản

Trường nhiệt độ qua chiều dày bản được xác định bằng phương trình truyền nhiệt một chiều, theo EN 1992-1-2 [19]:

$$\rho(\Theta)\, c_p(\Theta)\, \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(\Theta)\, \frac{\partial \Theta}{\partial z}\right) \tag{8}$$

trong đó Θ là nhiệt độ của bê tông (°C), t là thời gian (s), z là tọa độ theo chiều dày bản (m), $\rho(\Theta)$ là khối lượng riêng (kg/m^3), $c_p(\Theta)$ là nhiệt dung riêng (J/(kg · K)) và $\lambda(\Theta)$ là hệ số dẫn nhiệt (W/(m · K)), lấy theo các Mục 3.3.1–3.3.3 của EN 1992-1-2 [19]. Độ ẩm của bê tông lấy bằng 1,5% khối lượng; hệ số dẫn nhiệt lấy theo giới hạn dưới của [19].

Phương trình (8) được giải bằng sai phân hữu hạn với bước lưới 2,5 mm và bước thời gian 0,25 s. Mặt dưới bản chịu thông lượng nhiệt thuần $\dot{h}_{net}$ theo (5); mặt trên trao đổi nhiệt đối lưu với không khí ở 20 °C. Bài toán được giải đồng thời tại 35 vị trí theo bán kính tính từ tâm đám cháy, cho trường nhiệt độ theo cả chiều sâu lẫn khoảng cách.

3.3. Khả năng chịu uốn của tiết diện

Sức kháng uốn của tiết diện được xác định song song bằng hai phương pháp: phương pháp đường đẳng nhiệt 500 °C (một phương pháp đơn giản của EN 1992-1-2 [19]) và phương pháp phân lớp dùng hệ số suy giảm cường độ của tiêu chuẩn này. Hệ số riêng phần của vật liệu trong tình huống cháy lấy bằng 1,0 (Mục 2.3 của [19]).

Phương pháp đường đẳng nhiệt 500 °C (Phụ lục B.1 của [19]) loại bỏ phần bê tông có nhiệt độ trên 500 °C và coi phần còn lại giữ nguyên cường độ. Với mô men dương, vùng nén nằm ở mặt trên không bị nung, nên sức kháng uốn là:

$$M^{+}_{Rd,fi} = A_s\, k_s(\Theta_s)\, f_{yk}(d - 0{,}4x); \qquad x = \frac{A_s\, k_s(\Theta_s)\, f_{yk}}{0{,}8\, b\, f_{ck}} \tag{9}$$

trong đó $M^{+}_{Rd,fi}$ là sức kháng uốn đối với mô men dương, A_s là diện tích cốt thép chịu kéo, $k_s\,(\Theta_s)$ là hệ số suy giảm cường độ của cốt thép tại nhiệt độ Θ_s, d là chiều cao làm việc, x là chiều cao vùng nén quy đổi, b là bề rộng tiết diện và f_{ck} là cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông.

Với mô men âm, vùng nén nằm ở mặt dưới bị nung, nên khối ứng suất nén chỉ được tính từ đường đẳng nhiệt 500 °C, sau khi loại bỏ chiều sâu a_{500} của lớp bê tông có nhiệt độ trên 500 °C:

$$M^{-}_{Rd,fi} = A'_s\, k_s(\Theta'_s)\, f_{yk}\,(d' - a_{500} - 0{,}4x') \tag{10}$$

trong đó $M^{-}_{Rd,fi}$ là sức kháng uốn đối với mô men âm, A'_s và $k_s\,(\Theta'_s)$ là diện tích và hệ số suy giảm cường độ (tại nhiệt độ Θ'_s) của cốt thép chịu kéo khi chịu mô men âm, d' là chiều cao làm việc tương ứng và x' là chiều cao vùng nén quy đổi sau khi loại bỏ lớp bê tông trên 500 °C. Các hệ số suy giảm cường độ $k_s(\Theta)$ của cốt thép và $k_c(\Theta)$ của bê tông lấy theo Bảng 3.2a và Bảng 3.1 của [19].

Phương pháp phân lớp chia tiết diện thành 50 lớp, lấy hệ số suy giảm cường độ bê tông $k_c\,(\Theta_i)$ tại tâm mỗi lớp, rồi xác định chiều cao vùng nén từ điều kiện cân bằng lực:

$$A_s\,k_s\,(\Theta_s)\;f_{yk} = b\,f_{ck}\sum_i k_c\,(\Theta_i)\;\Delta z_i \tag{11}$$

trong đó $k_c\,(\Theta_i)$ là hệ số suy giảm cường độ của lớp bê tông thứ i tại nhiệt độ Θ_i và Δz_i là chiều dày của lớp đó; các ký hiệu khác như ở (9).

Cánh tay đòn lấy từ trọng tâm khối ứng suất nén đến lực kéo trong cốt thép. Phương pháp này không loại bê tông theo ngưỡng nhiệt độ mà xét trực tiếp sự suy giảm cường độ của từng lớp, nên được dùng làm đối chứng cho phương pháp đường đẳng nhiệt 500 °C khi đám cháy nung nhanh hơn đáng kể so với đường gia nhiệt tiêu chuẩn.

3.4. Phân tích đường chảy dẻo

Tải trọng giới hạn của ô bản được xác định theo sơ đồ bốn tam giác, trong đó đường chảy dẻo dương chạy theo hai đường chéo và đường chảy dẻo âm chạy dọc bốn cạnh. Với ô bản vuông ngàm bốn cạnh, phương trình công có dạng:

$$w_u = \frac{12}{L^2}\left[\left(m_x^+ + m_y^+\right)_{\text{chéo}} + \left(m_x^- + m_y^-\right)_{\text{cạnh}}\right] \tag{12}$$

trong đó w_u là tải trọng phân bố đều giới hạn và L là nhịp ô bản; m_x^+, m_y^+ là mô men kháng dương trên một mét dài của cốt thép lưới dưới theo hai phương, lấy trung bình dọc hai đường chéo (chỉ số "chéo"); m_x^-, m_y^- là mô men kháng âm của cốt thép lưới trên, lấy trung bình dọc bốn cạnh (chỉ số "cạnh"). Phương trình (12) lập từ nguyên lý công ảo: khi cho tâm ô bản chuyển vị đơn vị, công của tải trọng bằng tổng công nội lực trên các đường chảy dẻo, mỗi phần bằng góc xoay tương đối (không đổi trên một đường thẳng) nhân với tích phân mô men kháng dọc đường đó.

Vùng bị nung chỉ chiếm một phần chiều dài đường chảy dẻo, nên mô men kháng trong (12) là giá trị trung bình dọc toàn bộ đường chảy dẻo. Giá trị này là trung bình trên 201 điểm cách đều dọc mỗi đường chảy dẻo. Mỗi điểm nhận mô men kháng của vị trí tính nhiệt lân cận về phía xa tâm đám cháy (các vị trí cách nhau 0,25 m theo bán kính), nên phần không bị nung giữ mô men kháng ở nhiệt độ thường.

Hệ số an toàn theo tải trọng giới hạn được xác định bởi:

$$\lambda = w_u / w_{fi} \tag{13}$$

Sơ đồ tính giả thiết góc ô bản được ngàm hoàn toàn và bỏ qua cơ chế đòn bẩy góc (corner lever), trong đó đường chảy dẻo dương không chạy thẳng tới góc [24], nên giá trị tuyệt đối của λ có xu hướng lớn hơn thực tế. Theo [24], cơ chế này làm w_u giảm nhiều nhất khoảng 9% khi tỷ số m'/m giữa mô men kháng âm và dương ở góc bằng 0 và gần như không làm giảm khi $m'/m \geq 1$. Ở đây $m'/m \approx 1{,}4$ ở nhiệt độ thường và còn tăng khi cháy, nên có thể bỏ qua đòn bẩy góc.

Để giảm ảnh hưởng của giả thiết ngàm hoàn toàn, bài dùng tỷ lệ giữ lại $\lambda_{fi}/\lambda_{20}$ để so sánh, tức tỷ số giữa hệ số an toàn tại thời điểm đang xét của đám cháy và hệ số an toàn ở nhiệt độ thường của cùng ô bản. Hai trạng thái có cùng sơ đồ và điều kiện biên, nên phần lớn sai lệch chung do giả thiết ngàm hoàn toàn bị loại khi lấy tỷ số. Tỷ lệ giữ lại 90% nghĩa là ô bản còn 90% tải trọng giới hạn so với trước khi cháy.

3.5. Kịch bản bong tróc và cháy lan

Về lớp bê tông bảo vệ, kịch bản S0 giả thiết lớp này nguyên vẹn suốt quá trình cháy, còn kịch bản S1 giả thiết một lớp dày 30 mm bong tức thời tại vị trí và thời điểm nhiệt độ bề mặt lần đầu vượt 380 °C. S1 là kịch bản giả thiết: mô hình không xét áp suất hơi nước trong lỗ rỗng, nên chỉ đánh giá hậu quả kết cấu nếu bong tróc xảy ra như giả thiết chứ không dự báo nó có xảy ra hay không. Ngưỡng 380 °C nằm trong khoảng nhiệt độ khởi phát bong tróc tổng hợp ở [10], còn chiều sâu 30 mm bằng khoảng cách đến trục của lớp cốt thép ngoài, đủ làm lộ lớp này. Ảnh hưởng của ngưỡng (300 và 450 °C) và của chiều sâu bong (15 và 45 mm) được khảo sát ở Mục 4.6.

Nguy cơ bong tróc nổ phụ thuộc đồng thời vào tốc độ nung, độ ẩm, tính thấm, gradient nhiệt và trạng thái ứng suất chứ không chỉ vào nhiệt độ tuyệt đối [10, 16], nên tốc độ nung bề mặt được báo cáo ở Mục 4.1. Độ ẩm 1,5% khối lượng (Mục 3.2) thấp hơn giá trị $k = 3\%$ khối lượng khuyến nghị trong 4.5.1(2) của EN 1992-1-2 [19], nên theo điều khoản này bong tróc nổ khó xảy ra; tuy nhiên, điều khoản không xét tốc độ nung nên S1 vẫn được giữ như kịch bản bất lợi giả định.

Với kịch bản cháy lan, xe được giả thiết đỗ thành một dãy với bước 2,5 m; đám cháy bắt đầu tại tâm ô bản rồi lan sang các xe liền kề về cả hai phía, mỗi lần cách nhau một khoảng lan truyền Δt, tổng cộng bảy xe.

3.6. Kiểm chứng chương trình tính

Chương trình tính do nhóm tác giả tự viết bằng Python, gồm ba phần: tác động nhiệt (Mục 2), truyền nhiệt (Mục 3.2), sức kháng tiết diện và đường chảy dẻo (Mục 3.3 và 3.4). Hai mô-đun truyền nhiệt và sức kháng tiết diện được kiểm chứng độc lập với mô hình chính; chuẩn so sánh là nghiệm giải tích, bảo toàn năng lượng, hội tụ theo lưới và sự trùng khớp của hai phương pháp tiết diện ở nhiệt độ thường, không phải kết quả số của các nghiên cứu trước. Sau 30 phút, nghiệm số chỉ lệch 0,057 K so với nghiệm giải tích (hàm sai số bù) của bán không gian chịu biên đối lưu với đặc trưng nhiệt không đổi. Sai số cân bằng năng lượng sau 60 phút là 0,42%, còn làm mịn lưới từ 2,5 mm xuống 1,25 mm chỉ làm nhiệt độ cốt thép tại phút 90 dưới đường ISO 834 thay đổi 0,01%. Ở nhiệt độ thường, khi mọi hệ số suy giảm bằng 1, hai phương pháp tiết diện cho tải trọng giới hạn chênh lệch 0,1%. Số liệu thí nghiệm gara ngầm [11] chỉ dùng để hiệu chỉnh thông lượng nhiệt tới (Mục 2.3), không dùng để kiểm chứng độc lập.

4. Kết quả và bàn luận

4.1. Tác động nhiệt

Khác với đường gia nhiệt ISO 834 tăng đơn điệu và không có pha suy giảm, đám cháy xe điện phát triển nhanh, đạt đỉnh rồi suy giảm (Hình 1(b)). Trong không gian kín, nhiệt độ khí hiệu dụng tại tâm đám cháy đạt 1100 °C sau khoảng 13 phút, trùng với thời điểm tốc độ tỏa nhiệt đạt cực đại.

Bảng 1 so sánh ISO 834 với ba mức tác động nhiệt của đám cháy xe điện. Về nhiệt độ, đường gia nhiệt ISO 834 khắc nghiệt hơn về dài hạn: trong 180 phút khảo sát, nhiệt độ lớn nhất của cốt thép là 668 °C, so với 308 °C dưới đám cháy xe điện ($\beta = 2{,}26$), và bề mặt bê tông cũng nóng hơn.

Về tốc độ nung, kết quả phụ thuộc vào giai đoạn được so sánh. Trước khi ngọn lửa chạm trần ở khoảng phút thứ 8, nhiệt độ khí bị chặn trên bởi nhiệt độ cột lửa (Mục 2.2), nên dưới ISO 834 bề mặt nóng hơn. Quanh thời điểm này, nhiệt độ bề mặt dưới đám cháy xe điện tăng nhanh, và hai loại tác động đạt 380 °C gần như cùng lúc: 8,0 phút với ISO 834 và 7,8 phút với xe điện khi $\beta = 2{,}26$ (giá trị của hai mức tác động thấp hơn ở Bảng 1).

Từ phút thứ 8 đến phút thứ 15, giai đoạn bao quanh đỉnh tỏa nhiệt ở phút thứ 13, tốc độ nung trung bình của bề mặt là 79,5 K/phút dưới đám cháy xe điện ($\beta = 2{,}26$) và 27,2 K/phút dưới ISO 834. Tính cho cả 15 phút đầu, gồm cả giai đoạn trước khi ngọn lửa xe điện chạm trần, hai giá trị tương ứng là

64,6 và 36,6 K/phút. Khi đường cong tỏa nhiệt của xe động cơ đốt trong trên Hình 1(a) được đưa qua cùng mô hình với $\beta = 2{,}26$, bề mặt bê tông đạt 380 °C sau 15,6 phút, khoảng gấp đôi so với xe điện.

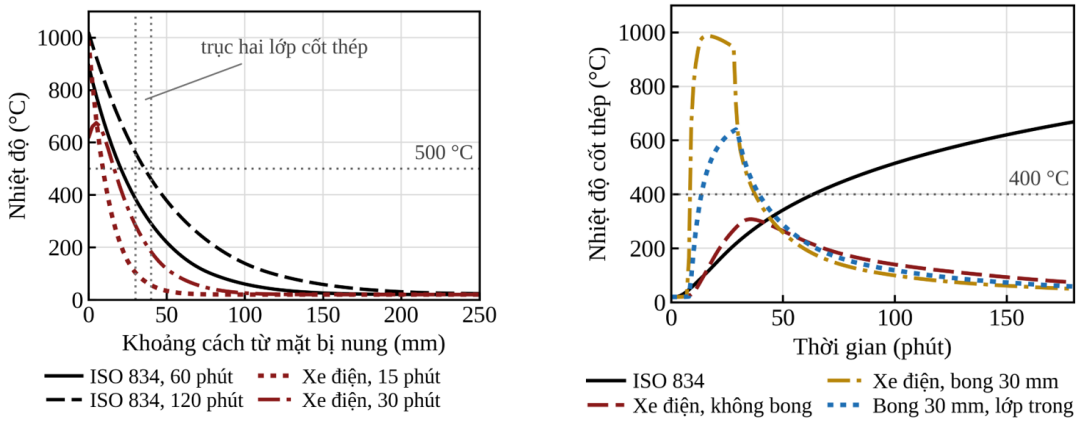
Bảng 1. Đặc trưng của đường gia nhiệt ISO 834 và ba mức tác động nhiệt của đám cháy xe điện

Đại lượng	ISO 834	Xe điện, Phụ lục C	Xe điện, giới hạn 100 kW/m^2	Xe điện, $\beta = 2{,}26$
Thông lượng nhiệt tới lớn nhất (kW/m^2)	–	79,1	100,0	178,6
Nhiệt độ khí hiệu dụng lớn nhất (°C)	1110	798	880	1100
Nhiệt độ bề mặt lớn nhất (°C)	1088	645	804	990
Nhiệt độ bề mặt ở phút thứ 4 (°C)	211	49	49	49
Tốc độ nung trung bình 15 phút đầu (K/phút)	36,6	40,6	48,4	64,6
Tốc độ nung trung bình từ phút 8 đến 15 (K/phút)	27,2	53,4	57,1	79,5
Thời điểm bề mặt đạt 380 °C (phút)	8,0	9,0	8,2	7,8
Nhiệt độ cốt thép lớn nhất, lớp bảo vệ nguyên vẹn (°C)	668	233	267	308

Như vậy, với giả thiết ở Mục 2.2, nét riêng của đám cháy xe điện không phải là bề mặt nóng hơn ngay từ đầu mà là đợt nung nhanh từ khoảng phút thứ 8 tới phút thứ 15.

4.2. Trường nhiệt độ trong bản và trường hợp lớp bảo vệ còn nguyên vẹn

Tại tâm đám cháy, sau 15 phút cháy (Hình 4(a)), bề mặt bản đã rất nóng nhưng ở độ sâu 30 mm nhiệt độ vẫn thấp hơn nhiều, vì bê tông dẫn nhiệt kém. Dưới đám cháy xe điện trong không gian kín ($\beta = 2{,}26$), nhiệt độ lớn nhất của cốt thép chịu kéo chỉ đạt 308 °C (Hình 4(b)), vì đám cháy phương tiện đã suy giảm trước khi nhiệt kịp truyền tới cốt thép. Giá trị này thấp hơn ngưỡng 400 °C mà từ đó cường độ chảy bắt đầu suy giảm theo Bảng 3.2a của [19], trong khi dưới ISO 834 nhiệt độ cốt thép đạt 488 °C tại 90 phút.



(a) Phân bố theo chiều dày tại tâm đám cháy

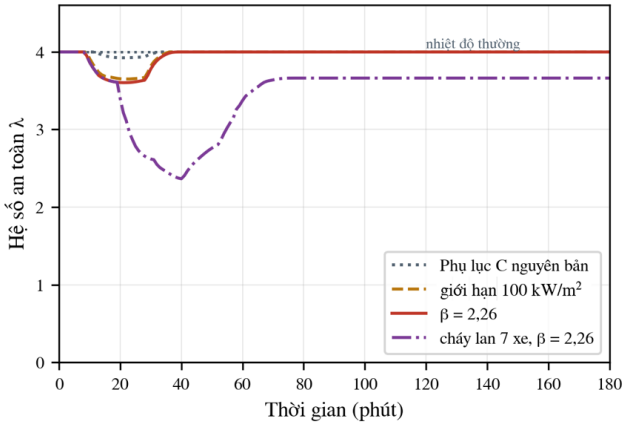
(b) Nhiệt độ cốt thép lớp ngoài theo thời gian

Hình 4. Trường nhiệt độ trong bản

Trong kịch bản S0, với lớp bảo vệ nguyên vẹn, tải trọng giới hạn không thay đổi trong suốt 180 phút khảo sát: hệ số λ giữ ở 4,00 (3,99 theo phương pháp phân lớp) với cả ba mức tác động nhiệt. Trong phạm vi các giả thiết của mô hình, sức kháng uốn của bản vì vậy chưa suy giảm đáng kể.

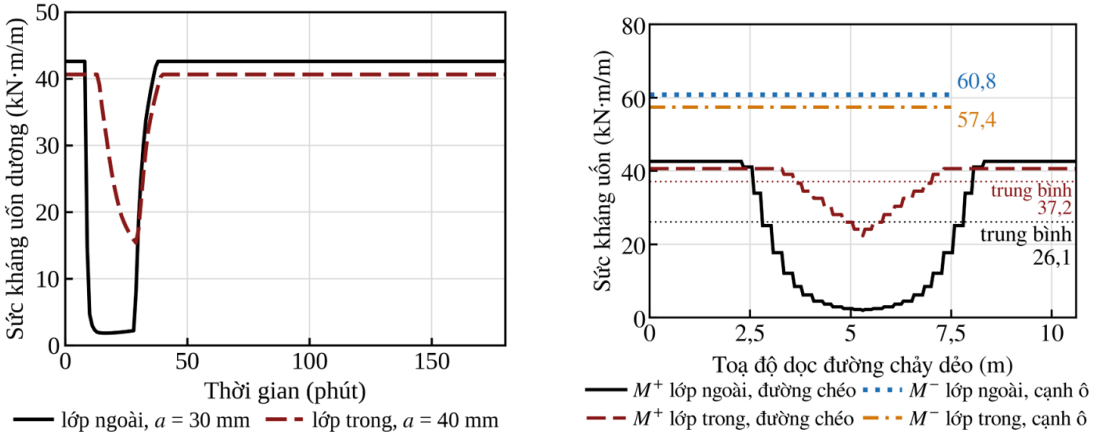
4.3. Trường hợp lớp bảo vệ bị bong tróc

Trong kịch bản S1, bề mặt bê tông đạt ngưỡng bong tróc trong bán kính 3,5 m quanh tâm đám cháy, tức một vùng rộng khoảng 7,0 m; sớm nhất là tại tâm, sau 7,8 phút. Cốt thép lớp ngoài trong vùng này tiếp xúc trực tiếp với dòng khí nóng, còn cốt thép lớp trong, có trục sâu hơn mặt bong 10 mm, vẫn được khoảng 5 mm bê tông che chắn. Hệ số λ nhỏ nhất là 3,60 tại phút thứ 21, bằng 90% giá trị ở nhiệt độ thường (Hình 5).



Hình 5. Diễn biến hệ số an toàn của bản theo thời gian dưới các mức tác động nhiệt và kịch bản lớp bảo vệ

Với ba mức tác động nhiệt, λ nhỏ nhất lần lượt là 3,92 (Phụ lục C nguyên bản), 3,65 (giới hạn 100 kW/m^2) và 3,60 (hiệu chỉnh $\beta = 2{,}26$). Tùy mức tác động nhiệt, tỷ lệ giữ lại nằm trong khoảng 90–98%; như vậy $\beta = 2{,}26$ làm tác động nhiệt tăng mạnh nhưng không làm đổi kết luận về khả năng chịu uốn khi một xe cháy.



(a) Sức kháng của hai lớp cốt thép tại tâm đám cháy theo thời gian

(b) Sức kháng dọc đường chéo và dọc cạnh ô bản tại thời điểm bất lợi nhất

Hình 6. Khả năng chịu uốn trong kịch bản bong tróc
(đường chấm mảnh: giá trị trung bình dọc đường chéo dùng trong phương trình (12);
mô men kháng âm không đổi dọc cạnh ô bản)

Sức kháng uốn còn lại phân bố không đều dọc các đường chảy dẻo (Hình 6). Các giá trị dưới đây là trung bình dọc toàn bộ chiều dài mỗi đường chảy dẻo, tức đại lượng đi vào phương trình (12), và được vẽ thành các đường nằm ngang trên Hình 6(b). Tại thời điểm bất lợi nhất, mô men kháng dương trung

bình dọc đường chéo của cốt thép lớp ngoài và lớp trong thuộc lưới dưới là 26,1 và 37,2 kN · m/m, còn mô men kháng âm trung bình dọc bốn cạnh của lớp ngoài và lớp trong thuộc lưới trên vẫn đạt 60,8 và 57,4 kN · m/m.

Hai cơ chế giải thích vì sao sức kháng chỉ suy giảm tương đối ít. Thứ nhất, các đường chảy dẻo dương là hai đường chéo dài, chỉ đoạn giữa nằm trong vùng bị nung mạnh. Thứ hai, hai lớp cốt thép nằm ở hai cao độ khác nhau, nên với chiều sâu bong tróc giả thiết 30 mm, lớp ngoài bị lộ nhưng lớp trong vẫn còn bê tông bảo vệ.

4.4. Đám cháy lan theo dãy xe

Khi đám cháy lan dọc dãy xe, vùng đạt ngưỡng bong tróc mở rộng vượt qua các cạnh ô bản và tác động tới các đường chảy dẻo âm. Với khoảng lan truyền $\Delta t = 12$ phút, hệ số an toàn nhỏ nhất giảm còn $\lambda = 2{,}37$ tại phút thứ 40, tức 59% giá trị ở nhiệt độ thường. Tác động nhiệt của nhiều xe cháy đồng thời được lấy theo giá trị lớn nhất thay vì cộng dồn, nên kết quả cháy lan thiên về không an toàn. Với $\Delta t = 8$, 12 và 20 phút, λ nhỏ nhất lần lượt là 2,37; 2,37 và 2,56, nên tỷ lệ giữ lại thay đổi không quá 5 điểm phần trăm khi khoảng lan truyền từ 8 đến 20 phút. Nếu không cho vật liệu hồi phục cường độ khi nguội, khoảng lan truyền 20 phút trở thành trường hợp bất lợi nhất (Mục 4.7).

Cháy lan theo dãy xe là kịch bản bất lợi nhất trong mọi trường hợp khảo sát, nên giả thiết chỉ một xe cháy, vốn phổ biến trong thiết kế nhà để xe, có thể không đại diện cho trường hợp bất lợi của bản. Giả thiết này đã được xem xét lại trong hướng dẫn gần đây cho gara có mái che [25].

4.5. Đối chiếu hai phương pháp xác định sức kháng tiết diện

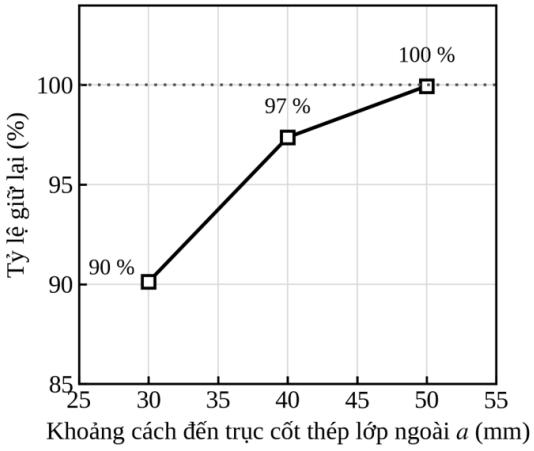
Ở cấp độ tải trọng giới hạn, phương pháp phân lớp và phương pháp đường đẳng nhiệt 500 °C chênh lệch không quá 0,2% trong cả sáu tổ hợp mức tác động nhiệt và kịch bản lớp bảo vệ với một xe cháy ở tâm ô (Bảng 2). Kết quả này không hoàn toàn hiển nhiên, vì phương pháp đường đẳng nhiệt được xây dựng chủ yếu cho đường gia nhiệt tiêu chuẩn.

Bảng 2. Hệ số an toàn theo tải trọng giới hạn, tính bằng hai phương pháp xác định sức kháng tiết diện (chênh lệch tính từ giá trị chưa làm tròn)

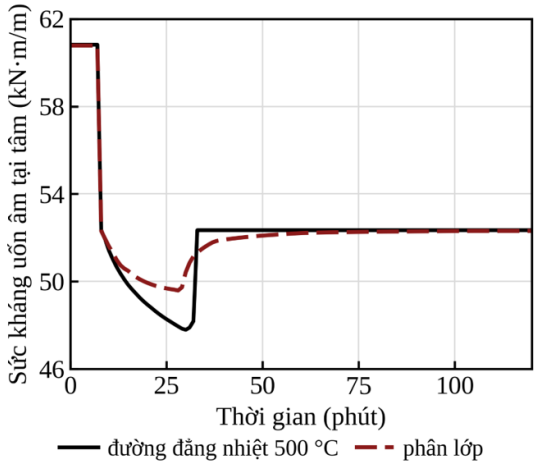
Mức tác động nhiệt	Lớp bảo vệ	Đường đẳng nhiệt 500 °C	Phân lớp	Chênh lệch (%)
Phụ lục C nguyên bản	nguyên vẹn	4,00	3,99	0,1
Phụ lục C nguyên bản	bong 30 mm	3,92	3,92	0,1
Giới hạn 100 kW/m^2	nguyên vẹn	4,00	3,99	0,2
Giới hạn 100 kW/m^2	bong 30 mm	3,65	3,64	0,2
Hiệu chỉnh $\beta = 2{,}26$	nguyên vẹn	4,00	3,99	0,2
Hiệu chỉnh $\beta = 2{,}26$	bong 30 mm	3,60	3,60	0,2

Ảnh hưởng của khoảng cách cốt thép lớp ngoài và phương pháp xác định sức kháng đến kết quả phân tích được thể hiện trên Hình 7. Chênh lệch giữa hai phương pháp tập trung ở tiết diện chịu mô men âm, nơi vùng nén nằm ở mặt bị nung. Để thấy chênh lệch lớn nhất có thể có, sức kháng mô men âm được tính tại tâm đám cháy (kịch bản S1) với cốt thép lưới trên như ở gối (Hình 7(b)); phương pháp phân lớp cho giá trị cao hơn tới 6,2% ở phút thứ 31. Tiết diện này không nằm trên đường chảy dẻo âm, vốn chạy dọc bốn cạnh ô và cách tâm đám cháy ít nhất 3,75 m, nên chênh lệch không chi phối λ.

Khi mặt bị nung nguội dưới 500 °C, chênh lệch đổi dấu nhưng không vượt quá 2%, phù hợp với nhận định là phương pháp đường đẳng nhiệt kém chính xác ở vùng mô men âm [14]. Với mô men dương, hai phương pháp lệch dưới 1% vì vùng nén ở mặt trên còn nguội.



(a) Tỷ lệ giữ lại theo khoảng cách đến trục cốt thép lớp ngoài



(b) So sánh sức kháng mô men âm theo hai phương pháp tại tiết diện ở tâm đám cháy (cốt thép lưới trên như tại gối, kịch bản S1)

Hình 7. Ảnh hưởng của khoảng cách cốt thép và phương pháp xác định sức kháng tiết diện

Như vậy, trong cấu hình khảo sát, hai phương pháp cho kết quả phù hợp, nhưng kết luận này không nên mở rộng cho trường hợp đường chảy dẻo âm nằm trong vùng bị nung. Kịch bản cháy lan (Mục 4.4) thuộc trường hợp này: phương pháp phân lớp cho λ nhỏ nhất là 2,42; 2,41 và 2,59, cao hơn 1,3 đến 2,1% so với các giá trị theo đường đẳng nhiệt trong Bảng 3, nên các giá trị cháy lan trong Bảng 3 thiên về an toàn so với phương pháp phân lớp.

4.6. Khảo sát độ nhạy và hàm ý thiết kế

Bảng 3 và Hình 7 tổng hợp kết quả khảo sát độ nhạy đối với các tham số chính của mô hình, qua đó đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng tham số đến khả năng chịu uốn của bản trong điều kiện cháy.

Bảng 3. Kết quả khảo sát độ nhạy (hệ số an toàn nhỏ nhất)

Tham số khảo sát	Đơn vị	Giá trị khảo sát	$\lambda_{\min}$ tương ứng
Ngưỡng bong Θ_{sp}	°C	300 / 380 / 450	3,60 / 3,60 / 3,61
Chiều sâu bong d_{sp}	mm	15 / 30 / 45	3,96 / 3,60 / 3,32
Vị trí đám cháy trong ô bản	–	Tâm ô / Giữa cạnh / Góc ô	3,60 / 3,86 / 3,80
Khoảng lan truyền Δt	phút	8 / 12 / 20	2,37 / 2,37 / 2,56
Khoảng cách đến trục a	mm	30 / 40 / 50	3,60 / 3,82 / 3,84

Hệ số an toàn nhỏ nhất gần như không nhạy với ngưỡng bong tróc: Θ_{sp} = 300, 380 và 450 °C cho $\lambda_{\min}$ lần lượt là 3,60; 3,60 và 3,61. Với chiều sâu bong tróc d_{sp} = 15, 30 và 45 mm, $\lambda_{\min}$ giảm dần từ 3,96 qua 3,60 xuống 3,32, vì hai lớp cốt thép nằm ở các cao độ khác nhau. Đám cháy tại tâm ô bất lợi nhất ($\lambda_{\min}$ là 3,60, so với 3,86 ở giữa cạnh và 3,80 ở góc ô) vì phần đường chảy dẻo dương bị nung lớn hơn.

Khoảng cách đến trục cốt thép có ảnh hưởng rõ rệt hơn trong kịch bản S1. Khi khoảng cách đến trục của lớp ngoài thuộc lưới dưới tăng từ 30 lên 40 và 50 mm (lớp trong tăng cùng một lượng), $\lambda_{\min}$ tăng từ 3,60 lên 3,82 và 3,84. Trong khi đó, λ ở nhiệt độ thường giảm nhẹ từ 4,00 xuống 3,92 và 3,84 do chiều cao làm việc giảm, nên tỷ lệ giữ lại tăng từ 90% lên 97% và 100% (Hình 7(a)). Ở 50 mm, bong tróc không còn làm giảm hệ số an toàn so với chính cấu tạo đó ở nhiệt độ thường, dù 3,84 vẫn

thấp hơn 4,00 của cấu tạo 30 mm. Kết quả cho dầm [16] cũng cho thấy hiệu quả của lớp bảo vệ dày hơn bị giới hạn bởi sự suy giảm chiều cao làm việc.

Kết quả trên gợi ra ba hàm ý cho khu vực để xe và sạc xe điện trong không gian ngầm. Thứ nhất, khoảng cách đến trục cốt thép lớp ngoài là tham số cấu tạo đáng chú ý; giá trị 50 mm trong cấu hình khảo sát chỉ là một tham khảo, không phải yêu cầu áp dụng chung. Thứ hai, trong mô hình khảo sát, sức kháng chủ yếu suy giảm sau khi lớp bảo vệ bong tróc, nên cần ưu tiên các biện pháp hạn chế bong tróc: sợi polypropylen đơn sợi với hàm lượng tối thiểu 2 kg/m^3 theo [16] và Mục 6.2 của [19] (quy định cho bê tông cường độ cao), hoặc lớp phủ chống cháy. Thứ ba, nên xem xét giải pháp ngăn cách giữa các xe trong cùng dãy, vì cháy lan làm sức kháng suy giảm lớn hơn đáng kể so với một xe cháy.

4.7. Hạn chế của nghiên cứu

Nghiên cứu chỉ xét tiêu chí R và ứng xử uốn, không đánh giá E, I, cắt và chọc thủng, nên không kết luận về khả năng đạt REI 90. Bong tróc là kịch bản áp đặt với ngưỡng và chiều sâu giả thiết, không phải kết quả của mô hình ẩm–nhiệt. Hệ số β được hiệu chỉnh từ một thí nghiệm quy mô thực cho riêng trường hợp khảo sát, nên không phải hệ số chung cho mọi gara ngầm. Giả thiết ngàm hoàn toàn bốn cạnh làm giá trị tuyệt đối của hệ số an toàn thiên lớn (Mục 3.4). Ngược lại, ứng xử màng kéo, có lợi cho bản hai phương ở độ võng lớn, không được xét nên về mặt này kết quả thiên về an toàn. Phân tích giới hạn cũng bỏ qua biến dạng nhiệt tự do và nội lực do cản trở biến dạng nhiệt; theo [26], biến dạng nhiệt tự do của bê tông có độ phân tán đáng kể.

Mô hình dùng đặc trưng vật liệu theo nhiệt độ tức thời, trong khi với một xe cháy hệ số an toàn nhỏ nhất xuất hiện ở phút thứ 21, lúc đám cháy đã qua đỉnh tỏa nhiệt ở phút thứ 13. Cách làm này ngầm cho vật liệu hồi phục cường độ khi nguội; với bê tông, điều này không xảy ra trong thực tế, nên thiên về không an toàn. Nếu lấy đặc trưng vật liệu theo nhiệt độ lớn nhất mà mỗi điểm đã trải qua, tức không cho thép lẫn bê tông hồi phục, tỷ lệ giữ lại trong kịch bản bong 30 mm với một xe cháy chỉ giảm từ 90% xuống 89% (λ = 3,55). Khi cháy lan, tỷ lệ này giảm từ 59% xuống 54% (λ = 2,17; Δt = 12 phút) và thấp nhất còn 53% (λ = 2,11; Δt = 20 phút). Vì thép cán nóng thực tế hồi phục phần lớn cường độ khi nguội, các giá trị này phóng đại phần suy giảm do cốt thép; ngược lại, bê tông còn suy giảm thêm khi nguội, nên sức kháng còn lại sau cháy cần được đánh giá riêng.

5. Kết luận

Nghiên cứu đánh giá khả năng chịu uốn của ô bản bê tông cốt thép hai phương 7,5 × 7,5 m, dày 250 mm, dưới đám cháy xe điện trong không gian ngầm, bằng mô hình đám cháy cục bộ (EN 1991-1-2, Phụ lục C) hiệu chỉnh theo thí nghiệm gara ngầm, truyền nhiệt một chiều và phân tích đường chảy dẻo.

Khi lớp bảo vệ còn nguyên vẹn, cốt thép chịu kéo dưới đám cháy một xe điện chỉ đạt 308 °C và tải trọng giới hạn chưa suy giảm. So với ISO 834, bề mặt bê tông dưới đám cháy xe điện có nhiệt độ thấp hơn trong khoảng 8 phút đầu và chỉ được nung nhanh hơn rõ rệt từ phút 8 đến phút 15; tốc độ nung là một yếu tố liên quan đến nguy cơ bong tróc nổ.

Khi một xe cháy và mất 30 mm lớp bảo vệ, tỷ lệ giữ lại là 90%. Trong phạm vi khảo sát, cháy lan theo dãy bảy xe là tình huống chi phối: tỷ lệ giữ lại còn 59% với khoảng lan truyền 12 phút và thay đổi không quá 5 điểm phần trăm khi khoảng lan truyền từ 8 đến 20 phút. Nếu không cho vật liệu hồi phục cường độ khi nguội, tỷ lệ này giảm còn 54% với khoảng lan truyền 12 phút và thấp nhất 53% với 20 phút. Các giá trị cháy lan chưa cộng dồn thông lượng nhiệt tới của các xe cháy đồng thời nên có thể chưa phải cận dưới.

Hệ số hiệu chỉnh β = 2,26 nâng thông lượng nhiệt tới lớn nhất từ 79,1 kW/m^2 (Phụ lục C) lên 178,6 kW/m^2. Dù vậy, ba mức tác động nhiệt cho λ nhỏ nhất 3,92; 3,65 và 3,60, tức tỷ lệ giữ lại 90–98% khi bong 30 mm, nên kết luận về khả năng chịu uốn ít nhạy với β.

Khi một xe cháy ở tâm ô, các đường chảy dẻo âm nằm ngoài vùng bị nung; trong cả sáu tổ hợp của cấu hình này, phương pháp đường đẳng nhiệt 500 °C và phương pháp phân lớp chênh lệch không quá 0,2% về tải trọng giới hạn, nhưng kết quả này không nên suy rộng cho các cấu hình khác. Khi cháy lan, phương pháp phân lớp cho λ lớn hơn 1,3 đến 2,1%, nên về sức kháng tiết diện, phương pháp đường đẳng nhiệt thiên về an toàn.

Tăng khoảng cách đến trục của lớp ngoài thuộc lưới dưới từ 30 lên 50 mm nâng tỷ lệ giữ lại từ 90% lên 100% trong cấu hình khảo sát; đây là giải pháp cấu tạo đáng chú ý khi có nguy cơ bong tróc.

Các nghiên cứu tiếp theo cần thay kịch bản bong tróc áp đặt bằng mô hình ẩm–nhiệt và bổ sung ứng xử màng kéo của bản hai phương ở độ võng lớn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được Trường Đại học Xây dựng Hà Nội tài trợ trong khuôn khổ đề tài mã số 12-2026/KHXD-TĐ.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, nhóm tác giả đã sử dụng Anthropic Claude để cải thiện ngôn ngữ hoặc khả năng diễn đạt của bản thảo. Các tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

Tài liệu tham khảo

[1] Thủ tướng Chính phủ, Số 20/CT-TTg, ngày 12/7/2025 (2025). *Chỉ thị về một số nhiệm vụ cấp bách, quyết liệt ngăn chặn, giải quyết tình trạng ô nhiễm môi trường*.

[2] QCVN 13:2018/BXD (2018). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về Gara ô tô*. Bộ Xây dựng, Hà Nội.

[3] Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332:120497.

[4] Mohd Tohir, M. Z., Martín-Gómez, C. (2025). Evaluating fire severity in electric vehicles and internal combustion engine vehicles: a statistical approach to heat release rates. *Fire Technology*, 61(5):2957–2998.

[5] Hodges, J. L., Salvi, U., Kapahi, A. (2024). Design fire scenarios for hazard assessment of modern battery electric and internal combustion engine passenger vehicles. *Fire Safety Journal*, 146:104145.

[6] Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., Huang, X. (2020). A review of battery fires in electric vehicles. *Fire Technology*, 56(4):1361–1410.

[7] Sauer, N. G., DiDomizio, M. J., Kesler, R. M., Ghanekar, S., Dehghani, P., Horn, G. P., Barowy, A. (2026). Measurement data from full-scale fire experiments of battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles. *Data in Brief*, 65:112471.

[8] Heo, I., Haam, S., Lee, S., Darkhanbat, K., Kim, K. S., Choi, S.-H. (2024). Analytical study on fire resistance performance of precast concrete hollow-core slabs for electric vehicle fire in parking structures. *Structures*, 70:107766.

[9] Heo, I., Darkhanbat, K., Lee, D., Jeong, H., Kim, K. S., Choi, S.-H. (2026). Fire resistance assessment of reinforced concrete slabs and beams under vehicle fires in mechanical parking structures. *Architectural Engineering and Design Management*, 22(3):656–679.

[10] Navaratnam, S., Munmulla, T., Bandaranayake, S., Rajeev, P., Sanjayan, J. (2026). Reassessing fire design provisions for concrete structures under emerging electric vehicle fire. *Fire*, 9(1):21.

[11] Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., Choi, S. (2025). Full-scale fire testing to assess the risk of battery electric vehicle fires in underground car parks. *Fire Technology*, 61(6):4133–4163.

[12] QCVN 06:2022/BXD (2022). *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về An toàn cháy cho nhà và công trình*. Ban hành kèm theo Thông tư số 06/2022/TT-BXD ngày 30/11/2022. Bộ Xây dựng, Hà Nội.

[13] ISO 834-1 (1999). *Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements*. International Organization for Standardization, Geneva.

[14] Trung, N. T., Hải, D. V., Phương, P. M. (2019). Đánh giá khả năng chịu lửa của sàn bê tông cốt thép bằng các phương pháp đơn giản theo tiêu chuẩn EN 1992-1-2. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 13(2V):41–52.

[15] Sửa đổi 1:2023 QCVN 06:2022/BXD (2023). *Ban hành kèm theo Thông tư số 09/2023/TT-BXD ngày 16/10/2023*. Bộ Xây dựng, Hà Nội.

[16] Hằng, N. T. N., Hùng, T. V. (2026). Khả năng chịu uốn của dầm bê tông cường độ cao trong điều kiện cháy: Ảnh hưởng của các tham số theo phương pháp đường đẳng nhiệt 500 °C. *Tạp chí Xây dựng*, (06.2026):371–375.

[17] Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., Marlair, G. (2012). Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. *Proceedings of the 2nd International Conference on Fires in Vehicles (FIVE 2012)*, Chicago, USA, 183–194.

[18] EN 1991-1-2 (2002). *Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-2: General actions — Actions on structures exposed to fire*. European Committee for Standardization, Brussels.

[19] EN 1992-1-2 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-2: General rules — Structural fire design*. European Committee for Standardization, Brussels.

[20] TCVN 2737:2023 (2023). *Tải trọng và tác động*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.

[21] EN 1990 (2002). *Eurocode: Basis of structural design*. European Committee for Standardization, Brussels.

[22] EN 1991-1-1 (2002). *Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-1: General actions — Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. European Committee for Standardization, Brussels.

[23] EN 1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization, Brussels.

[24] Kennedy, G., Goodchild, C. H. (2004). *Practical yield line design*. The Concrete Centre.

[25] Arup, Department for Transport (2024). *Covered car parks: fire safety guidance for electric vehicles*. Department for Transport, London.

[26] Put, F., Felicetti, R., Lucherini, A., Merci, B., Van Coile, R. (2026). Updating of a deterministic model for the free thermal strain of concrete in fire during heating and cooling using novel experimental data and Bayesian inference. *Fire Safety Journal*, 161:104659.