

Đánh giá hiệu quả gia cường của bê tông cốt lưới dệt đối với cấu kiện bê tông cốt thép chịu hỏa hoạn

Evaluation of reinforcement efficiency of textile-reinforced concrete composite on unreinforced concrete members under fire

Trần Mạnh Tiến^{1*}, Phạm Đức Thọ¹, Nguyễn Thị Nguyệt Hằng²

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất

² Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Tác giả liên hệ: tranmanhtien@hmg.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/3/2024 ; Ngày chấp nhận đăng: 15/7/2024

Tóm tắt:

Bê tông cốt lưới dệt (BTCLD) ngày càng được sử dụng rộng rãi trong kỹ thuật xây dựng hạ tầng cơ sở để gia cường kết cấu xuống cấp, xuất hiện vết nứt trong quá trình sử dụng. Nhờ vào lớp nền bằng bê tông hạt mịn (BTHM) ổn định nhiệt, BTCLD cho thấy hiệu quả gia cường tốt hơn so với Polymer cốt sợi FRP trong trường hợp cấu kiện bê tông cốt thép (BTCT) chịu ảnh hưởng của nhiệt độ cao như trường hợp hỏa hoạn. Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu xây dựng mô hình nhằm đánh giá hiệu quả gia cường của BTCLD cho cấu kiện BTCT khi chịu hỏa hoạn. Đầu tiên, một mô hình dự báo sự suy giảm độ bền của cấu kiện BTCT dưới tác dụng của hỏa hoạn theo đường cong ISO-834 được xây dựng. Từ kết quả thu được, có thể so sánh độ bền cháy của cấu kiện BTCT tại từng thời điểm trong hai trường hợp có và không có gia cường BTCLD. Qua đó, đánh giá được hiệu quả gia cường của vật liệu BTCLD khi gặp hỏa hoạn. Cuối cùng, mô hình được ứng dụng để dự báo độ bền cháy của cấu kiện BTCT cho một công trình hầm giao thông.

Từ khóa: Bê tông cốt lưới dệt; Cấu kiện bê tông cốt thép; Hiệu quả gia cường; Hỏa hoạn.

Abstract:

Textile-reinforced concrete (TRC) composite is increasingly and widely used in infrastructure engineering to reinforce or strengthen existing reinforced concrete (RC) structures that decrease their mechanical performance or have cracked during their lives. Thanks to the cementitious matrix, which has stability with elevated temperature, the TRC composite presents a remarkable reinforcement efficiency better than fibre-reinforced polymer (FRP) when reinforcing or strengthening RC members in case of fire. This paper presents the results of a model that was calculated to evaluate the reinforcement efficiency of textile-reinforced concrete composite on reinforced concrete members under fire conditions. Firstly, a model was built to predict the decrease in mechanical capacity of RC members under fire according to the ISO-834 standard. After that, the fire performance of the RC members could be compared in both cases with and without the strengthening of the TRC composite. So, the reinforcement efficiency of the TRC composite was evaluated and analyzed. Finally, the model was used to evaluate the fire performance of the RC structure of a tunnel in Vietnam.

Keywords: Textile-reinforced concrete; Reinforced concrete member; Reinforcement efficiency; Fire.

1. Giới thiệu

Trên thế giới, vật liệu bê tông cốt lưới dệt (BTCLD) - Composite TRC (Textile-

Reinforced Concrete), được nghiên cứu từ những năm đầu 1990 và ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng khoảng một vài thập kỷ trở

lại đây [1], [2]. BTCLD là sự kết hợp giữa một lớp nền bằng bê tông hạt mịn (BTHM) và gia cường bằng các cốt lưới dệt công nghiệp (sợi carbon, sợi thủy tinh, sợi basalt,...). Lớp nền có vai trò vừa là lớp bảo vệ khỏi sự tác động của môi trường, vừa là lớp đệm để chuyển tiếp và phân bố nội lực từ kết cấu công trình đến các lưới sợi. Trong khi đó, lưới sợi gia cường đóng vai trò quyết định đến cường độ của vật liệu BTCLD [1], [3], [4]. Tính ưu việt của nó được thể hiện so với vật liệu Composite thông thường dựa trên nền Polymer (FRP) bền vững, ổn định và thân thiện với môi trường. Đồng thời, BTCLD dễ dàng tái chế cho việc xây dựng công trình sau quá trình đã khai thác. Vì vậy, nó được sử dụng để gia cường, sửa chữa kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) và cho thấy sự hiệu quả làm việc trong các trường hợp được sử dụng [5], [6], [7], [8].

Trong một thập kỷ trở lại đây, vật liệu BTCLD bắt đầu được thử nghiệm trong việc gia cường những kết cấu BTCT thường xuyên chịu ảnh hưởng của nhiệt độ cao hoặc trong điều kiện hỏa hoạn [9], [10], [11]. Trong những trường hợp này, nhiệt độ được tăng lên một cách nhanh chóng (có thể lên đến 1200°C), tác động đến lớp vật liệu gia cường và kết cấu. Tuy nhiên, nhờ vào lớp bảo vệ bằng bê tông xi măng, lưới sợi gia cường trong vật liệu BTCLD giữ được sự ổn định cường độ hơn hẳn so với FRP [10], [12]. Ngoài ra, sự dính bám của BTCLD lên kết cấu được cải thiện đáng kể so với trường hợp khi sử dụng FRP [13].

Khi gia cường trên kết cấu bê tông cốt thép (chịu uốn, cắt, nén,...) ở nhiệt độ thường, BTCLD cải thiện đáng kể độ bền của kết cấu được gia cường [12], [14], [15]. Tetta và cộng sự [15] đã thử nghiệm và so sánh khả năng chịu cắt của dầm BTCT khi được gia cường bởi BTCLD và Polymer cốt sợi. Kết quả cho thấy, mặc dù hiệu quả gia cường kém hơn vật liệu FRP nhưng vật liệu BTCLD cải thiện cường độ kháng cắt của dầm ít nhất hai lần với hai lớp lưới gia cường. Hơn nữa, nó cũng làm tăng độ dẻo dai cho dầm BTCT, biểu thị qua biến dạng

cắt trung bình của nhịp cắt tới hạn lớn hơn so với trường hợp sử dụng FRP. Điều này chỉ ra rằng sự triển vọng của việc sử dụng BTCLD thay cho FRP trong việc gia cường kết cấu, đảm bảo về tính bền vững và thân thiện môi trường.

Khi sử dụng BTCLD để gia cường kết cấu chịu uốn, kết quả thu được cho thấy hiệu quả gia cường tích cực: Tăng độ võng tại mặt cắt giữa dầm khi phá hủy, lực uốn tới hạn được cải thiện tùy thuộc vào số lớp lưới sợi gia cường [14], [16]. Raoof và cộng sự [14] cũng đã so sánh hiệu quả gia cường giữa BTCLD và FRP. Kết quả cho thấy, hiệu quả gia cường nhỏ hơn không đáng kể của BTCLD với cùng số lớp gia cường. Tuy nhiên, khi quan sát dạng phá hủy của dầm chịu uốn, có thể thấy rằng không có sự bóc tách liên kết giữa lớp BTCLD với dầm BTCT, trong khi, đây là nguyên nhân phá hủy của dầm BTCT được gia cường bởi FRP. Kết quả này khẳng định cường độ dính bám giữa BTCLD với dầm BTCT là vượt trội so với Polymer cốt sợi trong cùng điều kiện xử lý bề mặt dầm.

Trong các trường hợp chịu lực khác, vật liệu BTCLD cũng cải thiện đáng kể khả năng chịu lực của kết cấu [17], [18], [19]. Để đánh giá hiệu quả gia cường của BTCLD, sử dụng xác định ứng suất có hiệu của nó khi kết cấu bị phá hủy. Giá trị ứng suất này thường tương đương với ứng suất khi Composite bị bóc tách ra khỏi kết cấu, thông qua các biểu thức trong Fib Model Code 2010 [20]. Từ phương pháp xác định này, Raoof và cộng sự [14], đã so sánh kết quả thực nghiệm của nhóm tác giả với đường cong theo mô hình dự báo. Kết quả cho thấy, vật liệu BTCLD carbon khá phù hợp với mô hình này, nằm tương đối sát với đường cong của mô hình.

Có ít nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến ứng xử của kết cấu BTCT được gia cường bởi vật liệu BTCLD dưới tác dụng của tải trọng cơ học và nhiệt độ cao [10], [12], [13], [21], [22]. Một vài thử nghiệm với tác động của lửa được thực hiện trên các tấm mỏng bê tông cường độ

cao, được gia cường bằng lưới cốt sợi basalt của Hulin và cộng sự [22], hay trên dầm mặt cắt ngang chữ I, được gia cường bằng lưới sợi thủy tinh và sợi carbon của Reinhardt và cộng sự [21]. Một số nghiên cứu đã được thực hiện trên vật liệu BTCLD trong sự so sánh với FRP khi gia cường kết cấu chịu cắt và uốn ở nhiệt độ cao [10], [12]. Như kết quả nhận được, hiệu quả gia cường ở nhiệt độ cao phụ thuộc khá nhiều vào cường độ của các loại Composite sử dụng, cũng như cường độ của liên kết bề mặt giữa chúng và kết cấu được gia cường. Vật liệu FRP cho hiệu quả gia cường khá tốt ở nhiệt độ dưới 100°C và với số lớp gia cường ít hơn ba lớp. Trong khi ở nhiệt độ cao, vật liệu BTCLD cho thấy hiệu quả tốt hơn trong việc tăng cường khả năng chịu uốn và chịu cắt của dầm BTCT. Nó giữ lại 55% giá trị so với cường độ ở nhiệt độ thường, trong khi vật liệu gia cường FRP mất đi gần như toàn bộ hiệu quả của nó. Kết quả này có thể hiểu được qua dạng phá hủy của dầm sau thí nghiệm. Sự bóc tách hần của lớp FRP gia cường có thể quan sát rõ trên mẫu thí nghiệm, giải thích bởi sự yếu kém của lớp keo liên kết giữa FRP và dầm dưới sự tác dụng của nhiệt độ cao [10], [12]. Liên kết bề mặt giữa Composite gia cường và kết cấu được cải thiện đáng kể trong trường hợp của vật liệu BTCLD như kết quả nghiên cứu của Raof và Bournas [13]. Những kết quả thực nghiệm này đã chứng tỏ triển vọng của việc sử dụng vật liệu BTCLD để gia cường kết cấu BTCT dưới tác dụng của hỏa hoạn hoặc ở nhiệt độ cao.

Nhìn chung, chưa có nhiều nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến chủ đề này do sự khó khăn trong việc thiết lập thí nghiệm. Trên thực tế, để nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến kết cấu BTCT được gia cường bởi vật liệu Composite BTCLD, cần thiết có những trang thiết bị, máy móc tương đối đồng bộ và chính xác (máy thí nghiệm, lò lửa, cảm biến nhiệt độ, thiết bị đo ứng suất, biến dạng, chuyển vị). Hơn nữa, do các thí nghiệm được thực hiện trong phòng thí nghiệm với các lò lửa bị hạn chế tốc độ tăng nhiệt độ (để đảm bảo an toàn trong thí nghiệm), nên kết quả thực nghiệm chỉ có tính tham khảo so với trường hợp hỏa hoạn thực xảy

ra. Ngoài ra, để xem xét đến ảnh hưởng của những tham số cơ học thuộc các vật liệu thành phần đến ứng xử cơ nhiệt của toàn bộ kết cấu BTCT, cần đến số lượng thí nghiệm tương đối lớn, tốn kém nhiều chi phí nghiên cứu.

Những nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng, để dự báo độ bền cơ nhiệt của cấu kiện BTCT được gia cường bởi vật liệu BTCLD, có thể sử dụng phương pháp dừng, có nghĩa là ở một thời điểm nhất định sau quá trình chịu nhiệt độ cao, độ bền cơ nhiệt của cấu kiện BTCT được đánh giá qua ứng xử cơ học của nó. Để giải quyết vấn đề này, có thể giải bài toán truyền nhiệt trong cấu kiện BTCT gia cường bởi vật liệu BTCLD, sau đó, sử dụng những đặc trưng cơ học của các vật liệu trong kết cấu ở trường nhiệt độ tương ứng để đánh giá ứng xử và cường độ của kết cấu. Kết quả thu được có thể xem là ứng xử cơ nhiệt và độ bền cơ học của cấu kiện BTCT gia cường bởi vật liệu BTCLD dưới sự tác động của tải trọng cơ học và nhiệt độ cao.

Bài báo giới thiệu các mô hình tính toán gia cường kết cấu bởi vật liệu BTCLD, mô hình phần tử hữu hạn cho bài toán truyền nhiệt trong cấu kiện BTCT gia cường bởi BTCLD, và mô hình dự báo sự suy giảm cường độ cấu kiện BTCT gia cường vật liệu BTCLD chịu ảnh hưởng hỏa hoạn theo đường cong ISO-834 [23].

2. Xây dựng mô hình dự báo

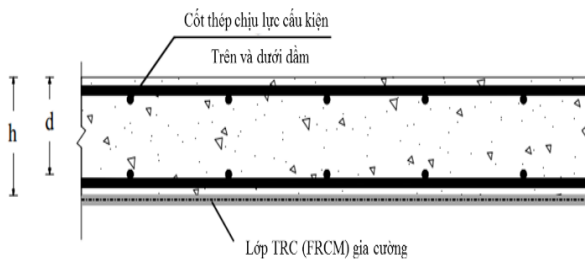
Mô hình dự báo độ bền cháy của cấu kiện BTCT gia cường bởi BTCLD được xây dựng dựa trên mô hình truyền nhiệt để dự báo trường nhiệt độ trong kết cấu theo thời gian hỏa hoạn. Từ đó, dựa vào các mô hình suy giảm độ bền theo nhiệt độ có thể xác định các đặc trưng cơ học của những vật liệu trong kết cấu, xác định hệ số gia cường, cường độ kháng uốn kết cấu theo thời gian cháy và độ bền cháy của kết cấu.

2.1. Hiệu quả gia cường ở nhiệt độ thường

Hiện nay, tại Việt Nam, vẫn chưa có quy trình tính toán gia cường cấu kiện BTCT bằng vật liệu BTCLD. Trên thế giới, đã hiện hữu nhiều hướng dẫn để tính toán thiết kế gia cường bằng

bê tông cốt lưới dệt (BTCLD hoặc FRCM) như ACI 549.4R-13 [24] của Viện Bê tông Hoa kỳ. Hướng dẫn đề cập đến việc xác định độ bền uốn của các loại cấu kiện BTCT, độ bền uốn của cấu kiện được gia cường tăng lên nhờ đóng góp của BTCLD như là một loại cốt thép chịu lực ngoài. Sơ đồ tính toán được mô tả như Hình 1. Phương pháp tính dựa trên các giả thiết sau:

- Mặt cắt ngang sau khi biến dạng là phẳng;
- Liên kết giữa BTCLD và lớp bê tông trên kết cấu vẫn còn hiệu quả;
- Biến dạng nén có thể sử dụng tối đa trong bê tông là 0.003;
- Vật liệu BTCLD có ứng xử phi tuyến theo hai giai đoạn tuyến tính đến khi bị phá hủy, trong đó, giai đoạn tuyến tính thứ hai của đường cong được sử dụng trong phân tích và thiết kế.



Hình 1. Sơ đồ tính toán gia cường cấu kiện BTCT bằng BTCLD theo ACI 549.4R-13 [24].

Độ bền uốn của phần cấu kiện BTCT phụ thuộc vào dạng phá hủy của cả hệ thống bao gồm cấu kiện BTCT và vật liệu gia cường. Các dạng phá hủy cho phần cấu kiện BTCT tăng cường BTCLD bao gồm:

- Bê tông bị nén vỡ do ứng suất nén trước khi đưa cốt thép vào;
- Khả năng chịu kéo của thép phụ thuộc vào sự phá hủy nén vỡ bê tông;
- Sự tách lớp do cắt hoặc kéo của lớp vỏ bê tông hay sự tách lớp của lớp vỏ ngoài;
- Phá hủy liên kết BTCLD khỏi nền bê tông (tách liên kết với BTCLD);
- Phá hủy liên kết giữa các lớp;

- Sự trượt của lưới sợi trong nền bê tông xi măng.

Mức biến dạng kéo có hiệu trong BTCLD đạt được khi phá hủy, ε_{fe} , nên được giới hạn ở biến dạng kéo thiết kế của vật liệu Composite BTCLD, ε_{fd} , xác định trong biểu thức sau:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} \leq 0.012 \quad (1)$$

Mức ứng suất kéo có hiệu trong BTCLD đạt được khi phá hủy, f_{fe} , và trong Composite được tính toán theo biểu thức:

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe}, \text{ trong đó, } \varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd} \quad (2)$$

Khi đó, độ bền uốn thiết kế của cấu kiện BTCT gia cường BTCLD tính toán theo phương trình:

$$\Phi_m M_m = \Phi_m (M_s + M_f) \quad (3)$$

Trong đó, M_n là cường độ uốn danh nghĩa, M_s và M_f lần lượt là phần đóng góp của cốt thép và vật liệu BTCLD vào cường độ uốn danh nghĩa. Hệ số giảm cường độ Φ_m được đưa ra bởi biểu thức (4), như được định nghĩa trong ACI 318-11 và ACI 562-13.

$$\Phi_m = \begin{cases} 0.9 \text{ với } \varepsilon_t \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} \text{ với } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \\ 0.65 \text{ với } \varepsilon_t < \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (4)$$

Với, ε_t là biến dạng kéo thực trong cốt thép chịu lực cực hạn ở cường độ danh nghĩa, và ε_{sy} là biến dạng kéo có hiệu của thép.

Giới hạn thiết kế: Để giới hạn tổng lực trên mỗi đơn vị chiều rộng được truyền vào bê tông, mức tăng cường độ uốn do gia cường BTCLD mang lại không được vượt quá 50% khả năng uốn hiện có của kết cấu, đồng thời, không gia cường. Mức tăng này cần kiểm tra trước khi áp dụng hệ số giảm cường độ và không vượt giới hạn tăng cường được thiết lập trong ACI 562. Khả năng sử dụng: Ứng suất kéo trong cốt thép chịu tải trọng sử dụng, f_{ss} , nên được giới hạn ở 80% cường độ chảy của thép, f_y , như chỉ ra trong biểu thức (5).

$$f_{ss} < 0,80 f_y \quad (5)$$

Giới hạn ứng suất môi và đứt rão: Mức độ ứng suất kéo trong vật liệu BTCLD dưới tải trọng phục vụ, f_{fs} , nên được giới hạn ở các giá trị hiển thị trong Bảng 1.

Bảng 1. Giới hạn ứng suất môi và đứt rão phụ thuộc vào loại sợi sử dụng [24].

Mỏi và rão ứng suất	Loại sợi sử dụng				
	Thủy tinh AR	Aramid	Bazan	Carbon	PBO
Mức ứng suất	0.20 f_{fd}	0.30 f_{fd}	0.20 f_{fd}	0.55 f_{fd}	0.30 f_{fd}

Trường hợp tính toán gia cường dầm BTCT xuống cấp do ảnh hưởng của môi trường. Để sửa chữa boong, mặt dưới được chuẩn bị để lắp đặt lớp gia cường BTCLD. Một lớp bê tông phun (trát) cung cấp chất nền cần thiết cho lưới cốt sợi dệt và thay thế lớp phủ có sẵn. Thông tin về cấu kiện hiện tại và các thuộc tính gia cố BTCLD được liệt kê trong các phần sau. Phân tích cấu kiện hiện tại cho thấy vẫn đạt yêu cầu về độ bền cắt. Sơ đồ tính toán gia cường được trình bày như Hình 1.

2.1.1. Khi chưa gia cường bê tông cốt lưới dệt

Dưới đây là một số thông số trong sơ đồ tính toán, kích thước hình học kết cấu:

- Bề rộng cấu kiện tính toán: $b = 305$ mm;
- Chiều cao có hiệu của cốt thép chịu kéo: $d = 196$ mm;
- Chiều dày của cấu kiện BTCT: $h = 254$ mm;

Bê tông của cấu kiện được gia cường:

- Cường độ nén đặc trưng: $f'_c = 34.5$ MPa;
- Biến dạng nén giới hạn: $\varepsilon_{cu} = 0.003$;

Cốt thép trong cấu kiện được gia cường:

- Diện tích cốt thép/đơn vị chiều rộng tính toán: $A_s = 1.312$ mm²;
- Bước cốt thép: $s_{bar} = 152$ mm;
- Giới hạn chảy: $f_y = 414$ Mpa;
- Mô đun đàn hồi: $E_s = 200$ GPa;

Dựa vào những thông số của cấu kiện BTCT, mô men kháng uốn danh nghĩa (theo thiết kế ban đầu) được xác định theo ACI 562: $M_n = 95.6$ kN.m/m. Do cốt thép bị ăn mòn 15%, vì vậy, cường độ kháng uốn sau khi bị ăn mòn giảm đi theo hệ số 0.85, được xác định: $M_{nCorr} = 81.2$ kN.m/m

2.1.2. Khi có lớp gia cường bê tông cốt lưới dệt

Khi có sự xuất hiện của vật liệu gia cường và sự phân phối lại nội lực trong mặt cắt chịu uốn, mô men kháng uốn danh nghĩa của mặt cắt được cải thiện. Để tính toán hiệu quả gia cường, cần xem xét các thông số trên mặt cắt chịu uốn mới. Dưới đây là các đặc trưng cơ học của BTCLD:

- Diện tích mặt cắt lưới dệt/chiều rộng tính toán: $A_f = 0.046$ mm²;
- Mô đun đàn hồi trung bình: $E_f = 124$ GPa;
- Cường độ kéo giới hạn: $f_{fd} = 896$ MPa;
- Biến dạng dài giới hạn: $\varepsilon_{fd} = 0.0072$;
- Số lớp BTCLD được sử dụng để gia cường: $n = 3$ lớp; bề dày lớp bê tông hạt mịn là 20 mm.

Cường độ kháng uốn danh định của cấu kiện BTCT gia cường bằng BTCLD được tính toán theo tiêu chuẩn ACI 549.4R-13:

$$M_{nNew} = M_{ns} + M_{nf} \quad (6)$$

Trong đó:

M_{nNew} là mô men kháng uốn của cấu kiện BTCT sau khi được gia cường;

M_{ns} là mô men kháng uốn của cấu kiện BTCT sau khi bị ăn mòn, được xác định theo công thức:

$$M_{ns} = A_s \cdot f_s(c_u) \cdot \left(d - \frac{\beta_1(c_u) \cdot c_u}{2} \right) \quad (7)$$

Với, M_{nf} là mô men kháng uốn do đóng góp của vật liệu gia cường BTCLD, được xác định theo công thức:

$$M_{nf} = \frac{n \cdot A_f \cdot w_f}{b} f_{fe}(c_u) \cdot \left(d_f - \frac{\beta_1(c_u) \cdot c_u}{2} \right) \quad (8)$$

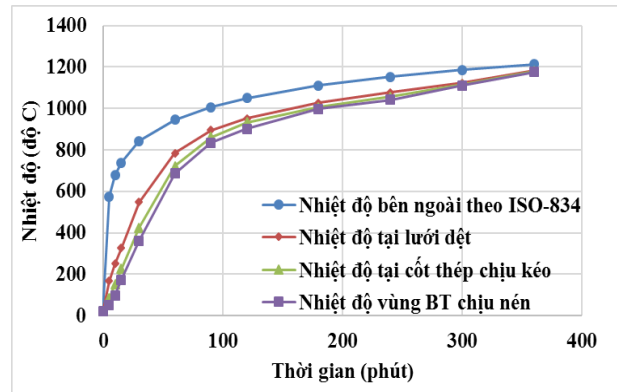
$$M_{nNew} = 83.1 + 35.1 = 118 \text{ kN.m/m}$$

Hiệu quả gia cường trường hợp sử dụng ba lớp BTCLD: $n = M_{nNew}/M_n = 1.42$.

2.2. Trường nhiệt độ khi có hỏa hoạn

Khi có hỏa hoạn, ngọn lửa tác động đến các thành phần vật liệu trên kết cấu, từ lớp BTHM bên ngoài đến lưới sợi dệt và bê tông trên kết cấu ban đầu đến cốt thép chịu lực. Nhiệt độ trên bề mặt cấu kiện BTCT gia cường bởi BTCLD được tăng lên theo đường cong tiêu chuẩn ISO-834 [23]. Trong trường hợp ngọn lửa bùng lên trên toàn bộ bề mặt tấm BTCT, bài toán truyền nhiệt trong tấm trở thành bài toán truyền nhiệt một chiều theo phương chiều dày của tấm. Giả thiết là lớp BTHM có hệ số dẫn nhiệt tốt hơn so với bê tông trên kết cấu, và được xác định lần lượt là 1.05 (W/m.K) ở nhiệt độ thường và biến thiên theo nhiệt độ cho BTHM, 1.60 (W/m.K) ở nhiệt độ thường và biến thiên theo nhiệt độ cao với bê tông trên kết cấu. Sự phân bố nhiệt tại các vị trí liên quan đến lưới sợi dệt gia

cường, cốt thép chịu kéo, trọng tâm của vùng bê tông chịu nén được xác định theo mô hình. Biến thiên nhiệt độ theo thời gian tại các điểm này được giới thiệu ở Hình 2.



Hình 2. Đường cong nhiệt độ - thời gian tại các vị trí trong cấu kiện BTCT theo ISO-834 [23].

2.3. Hiệu quả gia cường ở nhiệt độ cao

Do ảnh hưởng của nhiệt độ cao, các đặc trưng cơ học của các vật liệu này bị suy giảm theo thời gian và nhiệt độ tăng. Sự suy giảm cường độ này có thể được lấy theo kết quả của những nghiên cứu trước đây hoặc theo quy trình tính toán hiện có. Từ đó, sức kháng uốn của cấu kiện BTCT được gia cường bởi vật liệu BTCLD có thể được xác định theo thời gian và nhiệt độ cao. Bảng 2 giới thiệu các giá trị của hệ số giảm cường độ thuộc lưới sợi dệt, cốt thép chịu kéo, và bê tông vùng nén ở các nhiệt độ khác nhau tương ứng với các mốc thời gian sau khi bắt đầu xảy ra đám cháy. Qua đó, có thể tính toán được sự biến thiên của cường độ kháng uốn danh định do BTCLD gia cường và cấu kiện ban đầu theo thời gian cháy.

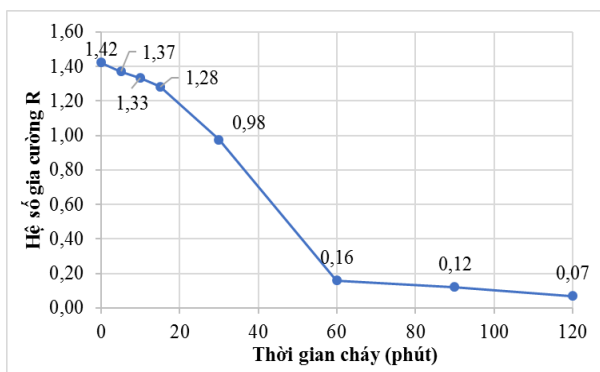
Bảng 2. Độ bền chịu uốn danh nghĩa do BTCLD và của kết cấu ban đầu theo thời gian cháy.

Thời gian (phút)	Hệ số giảm của lưới sợi dệt (f_T/f_{20})	Hệ số giảm của cốt thép chịu kéo (f_T/f_{20})	Hệ số giảm của bê tông chịu nén (f_T/f_{20})	Cường độ kháng uốn do BTCLD M_{nf} (kN.m/m)	Cường độ kháng uốn do cấu kiện ban đầu M_{ns} (kN.m/m)	Cường độ kháng uốn tổng thể M_{nNEW} (kN.m/m)
0	1.00	1.00	1.00	35.10	83.10	118.20
5	0.88	1.00	1.00	30.89	83.10	113.99
10	0.79	1.00	1.00	27.73	83.10	110.83

Thời gian (phút)	Hệ số giảm của lưới sợi dệt (f_T/f_{20})	Hệ số giảm của cốt thép chịu kéo (f_T/f_{20})	Hệ số giảm của bê tông chịu nén (f_T/f_{20})	Cường độ kháng uốn do BTCLD M_{nf} (kN.m/m)	Cường độ kháng uốn do cấu kiện ban đầu M_{ns} (kN.m/m)	Cường độ kháng uốn tổng thể M_{nNEW} (kN.m/m)
15	0.67	1.00	0.96	23.52	83.10	106.62
30	0.25	0.87	0.79	8.78	72.30	81.07
60	0.09	0.12	0.33	3.16	9.97	13.13
90	0.05	0.10	0.13	1.76	8.31	10.07
120	0.00	0.07	0.08	0.00	5.82	5.82
180	0.00	0.05	0.04	0.00	4.16	4.16
240	0.00	0.03	0.03	0.00	2.49	2.49
300	0.00	0.02	0.01	0.00	1.66	1.66
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Từ kết quả được giới thiệu trong Bảng 2, có thể thấy được rằng cường độ kháng uốn danh định tổng thể của cấu kiện BTCT được gia cường bởi BTCLD có sự suy giảm cường độ rất nhanh trong khoảng thời gian từ 30 phút đến 60 phút chịu hỏa hoạn. Hệ số gia cường bởi BTCLD được xác định bằng tỉ số giữa cường độ kháng uốn tổng thể của cấu kiện được gia cường tại thời điểm t ($M_{nNEW,t}$) với cường độ kháng uốn của cấu kiện BTCT ban đầu trước khi xảy ra đám cháy (M_{ns}):

$$R = \frac{M_{nNew,t}}{M_{ns}} \quad (9)$$



Hình 3. Hiệu quả gia cường của BTCLD theo thời gian xảy ra hỏa hoạn.

Hình 3 giới thiệu sự biến thiên của hệ số gia cường BTCLD trên sàn BTCT theo thời gian cháy của hỏa hoạn. Có thể thấy rằng, với sự gia cường của ba lớp lưới sợi dệt carbon (dày 20 mm), sàn BTCT có thể đảm bảo cường độ R30 theo tiêu chí của Eurocode II. Tại thời điểm $t = 30$ phút tính từ lúc bắt đầu xảy ra đám cháy, hệ số gia cường xấp xỉ bằng 1, có nghĩa là, dù chịu sự suy giảm cường độ do ảnh hưởng của hỏa hoạn, nhưng cường độ của sàn vẫn đảm bảo như trước khi gia cường ở thời điểm 30 phút sau khi đám cháy xảy ra.

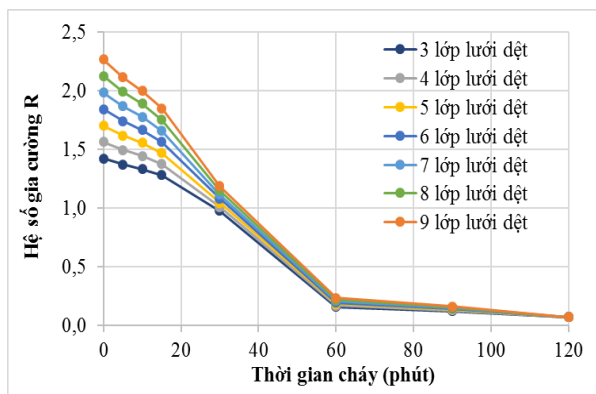
3. Ảnh hưởng của các tham số vật liệu đến hiệu quả gia cường

Để cấu kiện BTCT đạt được cường độ cháy cao hơn so với yêu cầu, cần có giải pháp để tăng hiệu quả gia cường của BTCLD lên cấu kiện BTCT. Giải pháp đưa ra có thể là tăng số lớp gia cường của lưới sợi dệt trong BTCLD, tuy nhiên, khi đạt đến một nhiệt độ nhất định, tăng số lớp không có ý nghĩa vì nhiệt độ làm suy giảm hầu như toàn bộ khả năng chịu lực của lưới dệt. Ngoài ra, có thể tăng chiều dày của lớp BTHM trong BTCLD để làm giảm tốc độ tăng

nhệt trong cốt lưới dẹt và cốt thép chịu kéo. Thế nhưng, giải pháp này tạo nên hạn chế khi làm tăng chiều dày kết cấu, tăng tĩnh tải. Các giải pháp này được xem xét, đánh giá ở phần tiếp theo.

3.1. Ảnh hưởng của số lớp gia cường

Trong nghiên cứu tham số này, số lớp lưới sợi dẹt được tăng lên từ 03 đến 09 lớp để xem xét ảnh hưởng của nó đến cường độ cháy thuộc kết cấu tổng thể. Hình 4 giới thiệu kết quả ảnh hưởng của số lớp lưới dẹt đến hiệu quả gia cường theo thời gian. Có thể thấy rằng, nếu tăng số lớp gia cường lên từ 03 đến 09 lớp lưới sợi dẹt, thì cường độ chống cháy của cấu kiện BTCT chỉ tăng từ R30 lên R37 theo Eurocode 2, có nghĩa là thời gian chống cháy chỉ tăng lên 07 phút so với kết cấu gia cường với 03 lớp lưới dẹt. Điều này có thể được giải thích do ảnh hưởng của nhiệt độ đến lưới sợi dẹt gia cường, khi đến một mức nhiệt độ cụ thể, cường độ của lưới sợi dẹt suy giảm đáng kể, dẫn tới số lớp gia cường không ảnh hưởng đến hiệu quả gia cường. Do đó, giải pháp tăng số lớp gia cường lên cấu kiện BTCT chịu ảnh hưởng của hỏa hoạn là không tối ưu.



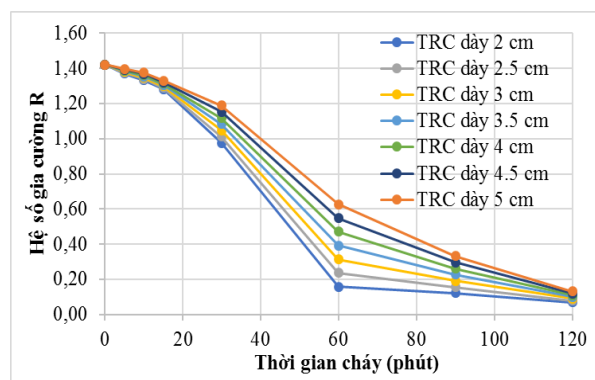
Hình 4. Ảnh hưởng của số lớp lưới dẹt đến hệ số gia cường.

3.2. Ảnh hưởng của chiều dày lớp bê tông hạt mịn

Chiều dày của lớp BTCLD có thể là một lớp cách nhiệt tốt đảm bảo cho nhiệt độ tại lưới sợi dẹt và cốt thép chịu kéo thấp hơn so với nhiệt độ bên ngoài bề mặt. Trong nghiên cứu này, các tính chất truyền nhiệt của BTHM vẫn giữ

nguyên, nhưng chiều dày của lớp BTHM được thay đổi từ 20 mm đến 50 mm (thay đổi theo các mức chiều dày 5 mm). Trường nhiệt độ trong cấu kiện BTCT có gia cường bởi BTCLD được xác định theo thời gian đám cháy.

Từ đó, cường độ kháng uốn của cấu kiện cũng được xác định theo thời gian, đồng thời, cho thấy được hệ số gia cường của vật liệu BTCLD. Hình 5 chỉ ra sự ảnh hưởng của chiều dày lớp BTCLD đến hiệu quả gia cường theo thời gian cháy.



Hình 5. Ảnh hưởng của chiều dày lớp BTCLD đến hệ số gia cường.

Kết quả cho thấy, khi tăng chiều dày lớp BTHM trong BTCLD từ 2 cm lên 5 cm thì hiệu quả gia cường có tăng do sự bảo vệ nhiệt của lớp này với lưới sợi dẹt và cốt thép chịu kéo. Tuy nhiên, sự cải thiện trên phụ thuộc vào thời gian cháy khác nhau. Trong khoảng thời gian dưới 30 phút, tính cải thiện về hệ số hiệu quả gia cường là không đáng kể, do trường nhiệt độ trong các vật liệu kết cấu chưa cao, biến thiên của hệ số gia cường nằm trong khoảng từ 1 đến 1.2. Tuy nhiên, ở thời gian cháy lớn hơn (từ 30 đến 90 phút), hiệu quả gia cường được cải thiện đáng kể, đặc biệt là ở 60 phút, hiệu quả gia cường tăng lên từ 0.16 đến 0.63 khi tăng chiều dày lớp BTHM từ 2 cm đến 5 cm. Tương ứng với kết quả này, nếu ban đầu kết cấu BTCT có hệ số an toàn là 2.5 thì độ bền của cấu kiện dưới tác dụng của hỏa hoạn được tăng lên từ R50 lên R80, có nghĩa là có thể chịu thêm 30 phút do hỏa hoạn. Khi thời gian cháy lớn hơn 90 phút, ảnh hưởng của yếu tố chiều dày giảm xuống không đáng kể do nhiệt độ tăng đã quá cao và làm suy giảm

khả năng chịu lực của các thành phần vật liệu trong kết cấu.

4. Ứng dụng mô hình trong dự báo độ bền cháy cho công trình hầm giao thông

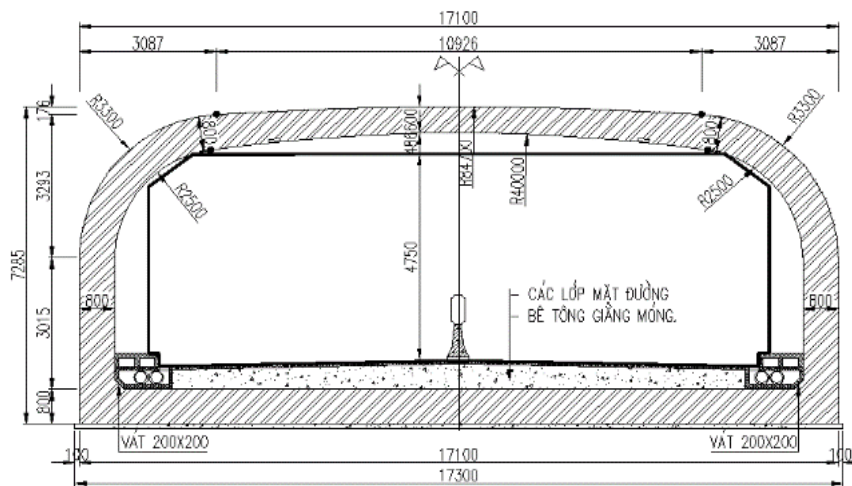
4.1. Giới thiệu về công trình

Công trình hầm chui giao thông được lấy ví dụ để tính toán hiệu quả gia cường của BTCLD trong trường hợp hỏa hoạn có phần hầm kín chiều dài gần 350 m, với kết cấu: kết cấu hầm kín bằng BTCT đổ tại chỗ, có đỉnh hầm cấu tạo dạng vòm bán kính cong R4000 nhằm đảm bảo

khả năng chịu lực (không bố trí thanh chống giữa). Công trình được thiết kế theo các tiêu chuẩn tính toán trong và ngoài nước. Hình 6 cho thấy kích thước mặt cắt ngang hầm kín sử dụng để tính toán trong nghiên cứu này. Đặc trưng vật liệu gồm có:

- Bê tông: Cường độ chịu nén quy định tại 28 ngày tuổi (mẫu hình trụ): $f_c = 35\text{MPa}$, mô đun đàn hồi $E_c = 29578\text{MPa}$, trọng lượng riêng $\gamma_{bt} = 2320\text{ (kg/m}^3\text{)}$;

- Cốt thép: Sử dụng các loại thép xây dựng ở trong nước.



Hình 6. Kích thước mặt cắt ngang hầm kín.

Bảng 3. Cốt thép được sử dụng trong công trình hầm chui giao thông.

Loại thép	Mác thép	Giới hạn chảy f_y (MPa)	Giới hạn bền f_u (MPa)
Thép tròn trơn	CB240-T	240	380
Thép có gờ	CB400-V	400	570

4.2. Phân tích kết cấu

Theo hồ sơ thiết kế (Bước TKKT), hầm được tính toán theo sơ đồ tải trọng như Hình 7.

Trong đó:

- Hoạt tải xe trên cầu LL, được xác định theo hai trường hợp, phụ thuộc vào chiều sâu đất đắp trên hoặc dưới 600 mm. Trường hợp bất lợi nhất $LL = 71.68\text{ kN/m}^2$;

- Áp lực đất thẳng đứng, $EV = 0$, do không có đất đắp trên hầm;

- Tĩnh tải lớp phủ trên hầm DW1, do lớp phủ mặt đường 13 cm, $DW1 = 2.98\text{ kN/m}^2$;

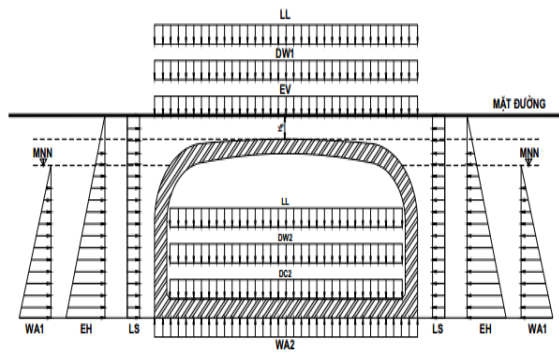
- Tĩnh tải lớp phủ trong hầm DW2, do lớp phủ mặt đường 7 cm, $DW2 = 1.61\text{ kN/m}^2$;

- Tĩnh tải lớp bê tông nền đường trong hầm DC2, do lớp bê tông nền dày 51.5 cm, $DC2 = 12.26\text{ kN/m}^2$;

- Áp lực đất nằm ngang EH, phân bố hình tam giác theo chiều sâu của hầm;

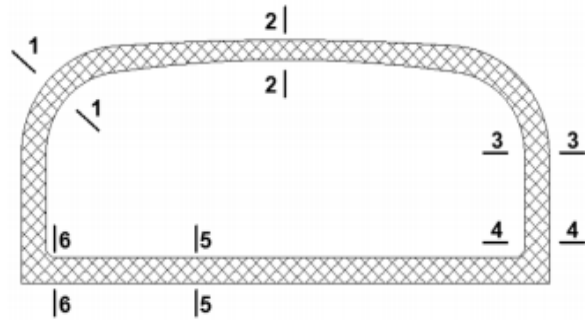
- Hoạt tải chất tèm LS, truyền lên kết cấu hầm thông qua đất đắp, $LS = 5.53\text{ kN/m}^2$;

- Áp lực nước nằm ngang WA1, phân bố hình tam giác theo chiều sâu;



Hình 7. Sơ đồ tải trọng cho hầm kín.

- Áp lực nước đẩy nổi WA2, $WA2 = 60.82 \text{ kN/m}^2$.



Hình 8. Các mặt cắt cần kiểm toán của vỏ hầm kín.

Kết quả phân tích kết cấu trích xuất kết quả biểu đồ nội lực trên mặt cắt ngang hầm chui theo các trạng thái giới hạn cường độ và sử dụng cho mặt cắt 2 - 2 của vỏ hầm (như được giới thiệu trong

Hình 8). Để làm ví dụ kiểm toán và tính toán độ bền cháy của kết cấu vỏ hầm, kết quả nội lực lớn nhất tại mặt cắt 2 - 2 của hầm kín, được tổng hợp trong Bảng 4.

Bảng 4. Bảng tổng hợp nội lực trong hầm tại mặt cắt 2 - 2.

Mặt cắt	TTGH	Nội lực		
		Mu (kN.m)	Vu (kN)	Pu (kN)
2-2	Cường độ 1	1357.74	653.50	790.60
	Sử dụng 1	1144.70		

Kết cấu BTCT tại mặt cắt 2 - 2 được bố trí: chiều cao mặt cắt $h = 600 \text{ mm}$, bề rộng mặt cắt $b = 1000 \text{ mm}$, gồm 02 lớp cốt thép chịu kéo đường kính thanh D28 bước $a = 100 \text{ mm}$ và 01 lớp cốt thép chịu nén đường kính thanh D16 bước $a = 100 \text{ mm}$. Bê tông có cường độ $f'c = 35 \text{ MPa}$. Kết quả kiểm toán cho mặt cắt 2 - 2 theo tiêu chuẩn TCN 272-05:

- Hệ số sức kháng $\Phi = 0.90$;
- Chiều cao làm việc của mặt cắt $d_e = 536 \text{ mm}$;
- Hệ số chuyển đổi biểu đồ ứng suất $\beta_1 = 0.80$;
- Chiều dày khối ứng suất tương đương $a = c \cdot \beta_1 = 142.59 \text{ mm}$;
- Khoảng cách từ trục trung hoà đến mặt chịu nén $c = 178.24 \text{ mm}$;

- Mô men kháng uốn danh nghĩa $M_n = 2289.14 \text{ kN.m}$;
- Mô men kháng uốn tính toán $M_r = \Phi \cdot M_n = 2060.23 \text{ kN.m}$;
- Kiểm tra khả năng chịu lực $M_r = 2060.23 \text{ kN.m} > M_u = 1357.74 \text{ kN.m} \Rightarrow$ Đạt

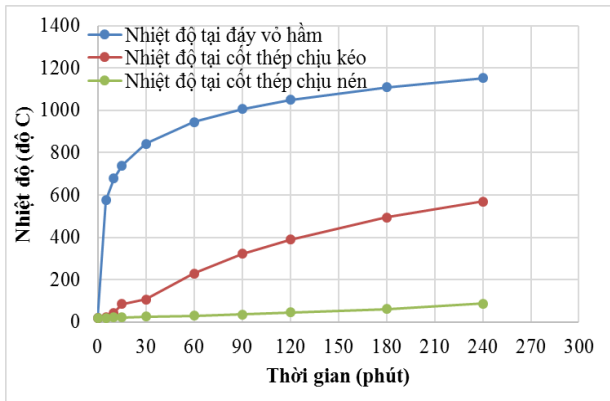
4.3. Dự báo độ bền kết cấu khi hỏa hoạn

4.3.1. Khi chưa có lớp gia cường bê tông cốt lưới dệt

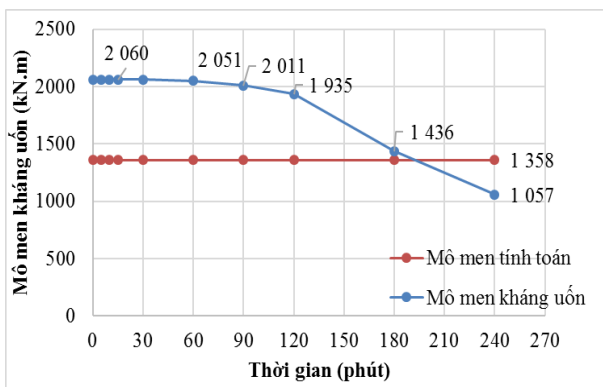
Trong trường hợp có hỏa hoạn, như được phân tích tại phần 3.2, trường nhiệt độ trong kết cấu vỏ hầm là kết quả bài toán truyền nhiệt trong bê tông vỏ hầm. Các tham số nhiệt của bê tông như hệ số truyền nhiệt, nhiệt dung riêng, được lấy theo các chỉ dẫn tính toán trong Eurocode 2. Kết quả bài toán truyền nhiệt được giới thiệu trong Hình 9.

Kết quả phân tích truyền nhiệt cho thấy, chiều dày vỏ hàm lớn nên phần bê tông và cốt thép chịu nén bị ảnh hưởng của nhiệt độ cao là tương đối ít, kể cả thời gian cháy ở trên 120 phút. Như phân tích và tính toán trong phần 2.1, sức kháng uốn tổng thể của vỏ hàm BTCT bị suy giảm dưới tác dụng của hỏa hoạn, bởi các đặc trưng cơ học của thép và bê tông bị suy giảm. Mô hình tính toán cho phép dự báo sự suy giảm này theo thời gian cháy tính từ lúc bắt đầu hỏa hoạn. Kết quả phân tích của mô hình được biểu diễn như Hình 10.

Theo kết quả phân tích, hàm BTCT có độ bền cháy R180, nghĩa là có thể đảm bảo mô men kháng uốn lớn hơn mô men tính toán do tải trọng trong thời gian 180 phút.



Hình 9. Biến thiên nhiệt độ tại các vị trí trên vỏ hàm BTCT khi hỏa hoạn theo ISO-834.



Hình 10. Biến thiên cường độ kháng uốn theo thời gian cháy.

3.2.2. Khi tồn tại lớp gia cường bê tông cốt lưới dệt

Khi có sự xuất hiện của vật liệu gia cường BTCLD và sự phân phối lại nội lực trong mặt cắt chịu uốn, mô men kháng uốn của mặt cắt

được cải thiện. Để tính toán được hiệu quả gia cường, cần tính toán các thông số trên mặt cắt chịu uốn mới. Các đặc trưng cơ học của BTCLD được lấy tương tự như phần 2.1.

- Diện tích mặt cắt lưới dệt/chiều rộng tính toán: $A_f = 0.046 \text{ mm}^2$;
- Mô đun đàn hồi trung bình: $E_f = 124 \text{ GPa}$;
- Cường độ kéo giới hạn: $f_{fd} = 896 \text{ MPa}$;
- Biến dạng dài giới hạn: $\varepsilon_{fd} = 0.0072$;
- Số lớp BTCLD được sử dụng để gia cường: $n = 3$ lớp; bề dày lớp bê tông hạt mịn là 20 mm.

Mô men kháng uốn danh nghĩa của cấu kiện BTCT gia cường bằng BTCLD được tính toán theo tiêu chuẩn ACI 549.4R-13:

$$M_{nNew} = M_{ns} + M_{nf}$$

Trong đó:

M_{nNew} là mô men kháng uốn danh nghĩa của vỏ hàm BTCT sau khi được gia cường;

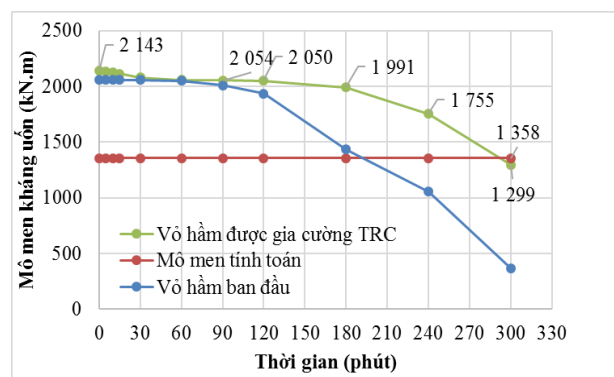
M_{ns} là mô men kháng uốn danh nghĩa của vỏ hàm BTCT ban đầu;

M_{nf} là mô men kháng uốn danh nghĩa do đóng góp của vật liệu gia cường BTCLD;

$$M_{nNew} = 2060 + 83 = 2143 \text{ kN.m/m}$$

Hiệu quả gia cường trường hợp sử dụng 03 lớp BTCLD:

$$n = M_{nNew} / M_n = 1.04$$



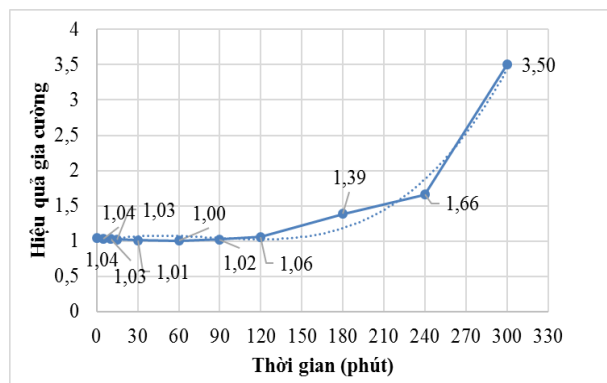
Hình 11. Biến thiên cường độ kháng uốn theo thời gian cháy khi có và không có gia cường BTCLD.

Vì vỏ hàm có kích thước lớn nên ở nhiệt độ thường, hiệu quả gia cường của BTCLD là không đáng kể. Tuy nhiên, khi ở nhiệt độ cao,

vai trò và hiệu quả gia cường được nâng lên bởi đảm nhiệm như một lớp cách nhiệt, làm giảm nhiệt độ trong bê tông và cốt thép. Trường nhiệt độ của kết cấu vỏ hầm BTCT gia cường BTCLD được tính toán lại, là cơ sở cho việc xác định mô men kháng uốn của mặt cắt vỏ hầm BTCT gia cường BTCLD. Hình 11 biểu thị sự biến thiên của giá trị mô men kháng uốn theo thời gian hỏa hoạn của vỏ hầm BTCT trong hai trường hợp được và không được gia cường BTCLD. Có thể thấy rằng, hiệu quả gia cường về cơ học của BTCLD là không đáng kể (do vỏ hầm dày và bố trí cốt thép tương đối nhiều), tuy nhiên, vai trò như lớp phủ cách nhiệt làm cho cường độ kháng uốn của vỏ hầm BTCT không suy giảm nhiều cho đến thời gian 240 phút (4 giờ cháy). Khi so sánh với mô men tính toán của vỏ hầm tại mặt cắt, đảm bảo thỏa mãn ở thời gian cháy là 270 phút, có nghĩa là độ bền cháy của vỏ hầm BTCT gia cường BTCLD là R270. So sánh với độ bền cháy của vỏ hầm trong trường hợp không gia cường, hiệu quả gia cường BTCLD đã tăng độ bền cháy lên 90 phút.

4.4. Hiệu quả gia cường

Hiệu quả gia cường của vật liệu BTCLD được xác định là tỉ số giữa mô men kháng uốn sau gia cường BTCLD so với ban đầu ở các thời gian cháy khác nhau. Kết quả tính toán được trình bày trong Hình 12. Như đã phân tích, tại thời gian cháy trên 120 phút, nhờ có lớp gia cường, quá trình suy giảm mô men kháng uốn diễn ra chậm hơn, từ đó, làm tăng hiệu quả gia cường của BTCLD.



Hình 12. Biến thiên hiệu quả gia cường vật liệu BTCLD theo thời gian cháy.

5. Kết luận và kiến nghị

Bài báo giới thiệu những kết quả nghiên cứu liên quan đến mô hình tính toán và dự báo cường độ của cấu kiện BTCT được gia cường bởi vật liệu BTCLD chịu ảnh hưởng của hỏa hoạn. Một số kết luận được rút ra từ kết quả nghiên cứu như sau:

- Mô hình tính toán có thể xác định được cường độ kháng uốn của cấu kiện BTCT gia cường bởi BTCLD và hệ số gia cường theo thời gian bắt đầu xảy ra đám cháy;

- Ứng dụng mô hình để dự báo độ bền cháy cho kết cấu vỏ hầm giao thông tại nút giao cầu X. Kết quả cho thấy, có thể tăng độ bền cháy của vỏ hầm từ R180 lên R270 nếu gia cường 03 lớp BTCLD lưới sợi dẹt carbon dày 2 cm.

- Để tăng hiệu quả gia cường cũng như độ bền cháy của cấu kiện BTCT gia cường BTCLD, phương án tối ưu là sử dụng các loại tấm chống cháy có hệ số truyền nhiệt thấp.

Khuyến nghị sử dụng lưới sợi dẹt carbon và lớp BTHM có tính năng cao để chế tạo BTCLD gia cường cho các kết cấu có nguy cơ hỏa hoạn.

Tài liệu tham khảo

- [1] R. Contamine, “Contribution à l’étude du comportement mécanique de composites textile-mortier: Application à la réparation et/ou renforcement de poutres en béton armé vis-à-vis de l’effort tranchant,” Ph.D. dissertation, Université Claude Bernard - Lyon I, Lyon, France, 2011.
- [2] W. Brameshuber, “Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC,” RILEM, Rep. 36, 2006.
- [3] M. T. Tran, “Caractérisation expérimentale et modélisation numérique du comportement thermomécanique à haute température des matériaux composites renforcés par des fibres,” Ph.D. dissertation, Université de Lyon, Lyon, France, 2019.
- [4] B. T. Truong, “Formulation, performances mécaniques, et applications, d’un matériau TRC pour le renforcement et la réparation de

- structures en béton/et béton armé : Approches expérimentale et numérique”. Ph.D. dissertation, Université de Lyon, Lyon, France, 2016.
- [5] B. T. Truong, A. S. Larbi, and A. Limam, “Numerical modelling of reinforced concrete beams repaired by TRC composites,” *Compos. Struct.*, vol. 152, pp. 779–790, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.05.071.
- [6] M. Butler, M. Lieboldt, and V. Mechtcherine, “Application of Textile-Reinforced Concrete (TRC) for structural strengthening and in prefabrication,” in *Advances in Cement-Based Materials*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.
- [7] V. Mechtcherin, “Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 365–373, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.117.
- [8] B. T. Truong, T. T. Bui, A. Limam, A. Si Larbi, K. L. Nguyen, and M. Michel, “Experimental investigations of reinforced concrete beams repaired/reinforced by TRC composites,” *Compos. Struct.*, vol. 168, pp. 826–839, May 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.02.080.
- [9] K. T. Q. Nguyen, S. Navaratnam, P. Mendis, K. Zhang, J. Barnett, and H. Wang, “Fire safety of composites in prefabricated buildings: From fibre reinforced polymer to textile reinforced concrete,” *Compos. Part B: Eng.*, vol. 187, Apr. 2020, Art. no. 107815, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107815.
- [10] Z. C. Tetta and D. A. Bournas “TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures,” *Compos. Part B: Eng.*, vol. 106, pp. 190–205, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.026.
- [11] J. Esmaili, I. Sharifi, J. Kasaei, M. Nourizadeh, and A. E. Emamieh, “Experimental and analytical investigation on strengthening of heat damaged concrete by textile reinforced concrete (TRC),” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 1468–1483, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.acme.2019.09.008.
- [12] S. M. Raoof and D. A. Bournas, “TRM versus FRP in flexural strengthening of RC beams: Behaviour at high temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 424–437, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.195.
- [13] S. M. Raoof and D. A. Bournas, “Bond between TRM versus FRP composites and concrete at high temperatures,” *Compos. Part B: Eng.*, vol. 127, pp. 150–165, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.05.064.
- [14] S. M. Raoof, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, “Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 151, pp. 279–291, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023.
- [15] T. Li, M. Deng, M. Jin, Z. Dong, and Y. Zhang, “Performance of axially loaded masonry columns confined using textile reinforced concrete (TRC) added with short fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 279, Apr. 2021, Art. no. 122413, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122413.
- [16] Z. C. Tetta, L. N. Koutas, and D. A. Bournas, “Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams,” *Compos. Part B: Eng.* vol. 77, pp. 338–348, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.03.055.
- [17] A. C. H. Giese, D. N. Giese, V. F. P. Dutra, and L. C. P. Da Silva Filho, “Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with textile reinforced mortar,” *J. Build. Eng.*, vol. 33, Jan. 2021, Art. no. 101873, doi: 10.1016/j.job.2020.101873.
- [18] A. N. Al-Gemeel and Y. Zhuge, “Using textile reinforced engineered cementitious composite for concrete columns confinement,” *Compos. Struct.*, vol. 210, pp. 695–706, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.11.093.
- [19] F. Faleschini, M. A. Zanini, L. Hofer, K. Toska, D. De Domenico, and C. Pellegrino, “Confinement of reinforced concrete columns with glass fiber reinforced cementitious matrix jackets,” *Eng. Struct.*, vol. 218, Sep. 2020, Art. no. 110847, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110847.

- [20] fib, *fib Model Code a. Model code for concrete structures 2010*, Lausanne, Switzerland, 2013.
- [21] H.-W. Reinhardt, M. Krüger, M. Raupach, and J. Orlowsky, "Behavior of textile-reinforced concrete in fire," *Symposium Paper*, vol. 250, pp. 99–110, 2008, doi: 10.14359/20143.
- [22] T. Hulin, D. H. Lauridsen, K. Hodicky, J. W. Schmidt, and H. Stang, "Influence of Basalt FRP mesh reinforcement on high-performance concrete thin plates at high temperatures," *J. Compos. Constr.*, vol. 218, Sep. 2020, Art. no. 110847, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000546.
- [23] *Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements*, ISO 834-1, 1999.
- [24] *Guide to design and construction of externally bonded fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and masonry structures*, ACI 549.4R-13, 2013.