

Ảnh hưởng của vật liệu chống cháy bề mặt đến khả năng chịu uốn của bản bê tông cốt thép dự ứng lực chịu cháy

Effect of spray-applied insulating materials on flexural capacity of prestressed concrete slabs under fire conditions

> TS NGUYỄN THỊ NGUYỆT HẰNG

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
Email: hangntn@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của vật liệu chống cháy bề mặt bao gồm vật liệu chống cháy trương nở (IM), vữa chống cháy vermiculite xi măng (VCM) và sợi khoáng phun (SMF) tới sự suy giảm khả năng chịu uốn của bản bê tông dự ứng lực (DUL). Bốn bản bê tông DUL được khảo sát trong đó S1-C là bản không sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt, S2-IM, S3-VCM và S4-SMF là ba bản bê tông DUL sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt. Sức kháng uốn của bản bê tông DUL có và không sử dụng vật liệu chống cháy theo thời gian cháy được tính toán và so sánh với cường độ ban đầu trước khi cháy. Thông qua kết quả tính toán có thể thấy rằng S1-C mất đến gần 50% cường độ chịu uốn sau 90 phút chịu lửa. Với việc sử dụng 10 mm vật liệu chống cháy bề mặt, S2-IM, S3-VCM và S4-SMF duy trì cường độ chịu uốn ở mức trên 94% so với cường độ ban đầu. Kết quả cũng cho thấy, trong ba loại vật liệu chống cháy khảo sát, IM có khả năng kiềm chế sự gia tăng nhiệt độ, từ đó làm giảm sự suy giảm sức kháng uốn theo thời gian cháy trong kết cấu bê tông tốt nhất. Trong khi đó, hiệu quả chống cháy của VCM và SMF gần như tương đương.

Từ khóa: Vật liệu chống cháy bề mặt, chống cháy trương nở, vữa chống cháy vermiculite xi măng, sợi khoáng phun, khả năng chịu uốn khi cháy.

ABSTRACT

This paper investigates the effect of spray-applied insulating materials, including Intumescent Mastic (IM), Vermiculite Cementitious Material (VCM) and Sprayed Mineral Fiber (SMF), on the flexural strength degradation of prestressed concrete (PSC) slabs under elevated temperatures. Four PSC slabs were examined: S1-C (without applied insulating material) and S2-IM, S3-VCM and S4-SMF, which were coated. The flexural capacity of PSC slabs, both with and without insulating materials, was assessed over different fire exposure durations and compared to their initial strength before heating. The results indicate that S1-C suffered nearly a 50% reduction in flexural strength after 90 minutes of fire exposure. In contrast, the fireproofed slabs - S2-IM, S3-VCM and S4-SMF - retained over 94% of their initial flexural strength. Among the three insulating materials, IM proved to be the most effective in limiting temperature rise, thereby reducing flexural strength degradation over time. Meanwhile, VCM and SMF exhibited nearly equivalent fire resistance performance.

Keywords: Spray-applied insulating material, intumescent mastic, vermiculite cementitious material, sprayed mineral fiber, flexural capacity under fire conditions.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khả năng chịu lửa là một yếu tố quan trọng trong việc đảm bảo an toàn và độ bền của các kết cấu bê tông DUL, đặc biệt là trong các công trình có yêu cầu cao về chịu cháy như công trình ngầm. Khi tiếp xúc với nhiệt độ cháy, bê tông và thép DUL bị suy giảm cường độ, dẫn đến suy giảm khả năng chịu lực trong kết cấu. Do đó, việc áp dụng các vật liệu chống cháy để bảo vệ bề mặt bê tông, làm chậm quá trình gia tăng nhiệt độ trong kết cấu đã trở thành một

giải pháp quan trọng giúp tăng cường khả năng chịu nhiệt và duy trì khả năng chịu lực kết cấu.

Nhiều giải pháp chống cháy cho công trình đã được nghiên cứu, trong đó có việc sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt đã được nghiên cứu. Một số vật liệu chống cháy bề mặt như vật liệu chống cháy trương nở (IM), vữa chống cháy vermiculite xi măng (VCM) và sợi khoáng phun (SMF) được sử dụng trên bề mặt bê tông hay kết cấu thép để làm chậm quá trình truyền nhiệt, từ đó hạn chế sự suy

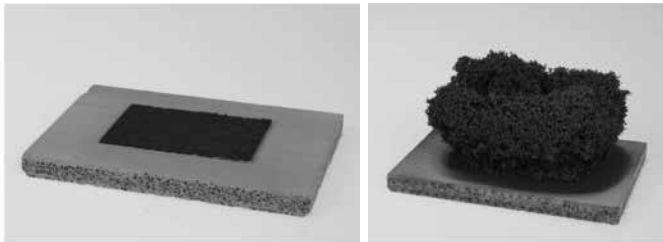
giảm cường độ của vật liệu và duy trì khả năng chịu uốn của kết cấu bê tông [1-6].

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của các vật liệu chống cháy bề mặt IM, VCM và SMF đến khả năng chịu uốn của bản bê tông DƯL khi tiếp xúc với nhiệt độ cháy. Bốn mẫu bản bê tông DƯL đã được khảo sát, bao gồm một mẫu không có lớp chống cháy (S1-C) và ba mẫu có lớp chống cháy bề mặt (S2-IM, S3-VCM, S4-SMF). Khả năng chịu uốn của các mẫu bản khảo sát theo thời gian cháy được tính toán dựa trên tiêu chuẩn ACI 318-19 [7], ACI-TMS 216.1-14 [8], hướng dẫn của Gustaferro và Martin [9] và so sánh với cường độ ban đầu trước khi cháy. Cơ sở lý thuyết, phương pháp tính toán và ví dụ cho một trường hợp cụ thể được trình bày trong bài này. Ảnh hưởng của bề dày lớp vật liệu chống cháy cũng như thời gian cháy tới sự suy giảm sức kháng uốn của các bản bê tông DƯL có và không sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt được khảo sát. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn vật liệu chống cháy phù hợp, góp phần nâng cao khả năng chịu lửa của kết cấu bê tông DƯL trong thực tế.

2. VẬT LIỆU CHỐNG CHÁY KHẢO SÁT

Ở nghiên cứu này, ba loại vật liệu chống cháy bề mặt được khảo sát, bao gồm:

- *Vật liệu chống cháy trương nở - Intumescent Mastic (IM)*: Loại vật liệu chống cháy đặc biệt có khả năng trương nở khi tiếp xúc với nhiệt độ cao, tạo ra một lớp bảo vệ cách nhiệt giúp làm chậm quá trình lan truyền nhiệt và ngăn chặn sự suy giảm cường độ của kết cấu bên dưới. Khi tiếp xúc với nhiệt độ cao (thường từ 200°C trở lên), IM sẽ trải qua phản ứng hóa học và trương nở mạnh mẽ, tạo thành một lớp bọt carbon cách nhiệt giúp hạn chế sự truyền nhiệt vào kết cấu (Hình 1).



a) - IM trước khi cháy

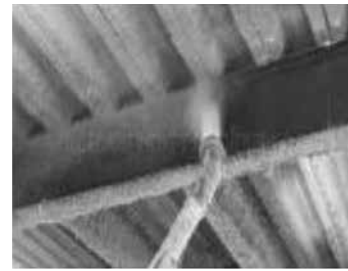
b) - IM sau khi cháy

Hình 1. Ví dụ về vật liệu chống cháy trương nở trước và sau khi cháy

(Nguồn: <https://idn.sika.com>).

- *Vữa chống cháy vermiculite xi măng - Vermiculite Cementitious Material (VCM)*: Một loại vữa có thành phần chính là vermiculite, một vật liệu có khả năng trương nở khi nung nóng, kết hợp với xi măng portland và các phụ gia khác để tạo thành một lớp phủ chống cháy hiệu quả (Hình 2a). Nhờ vào đặc tính nhẹ, bền và khả năng cách nhiệt tốt, loại vật liệu này được sử dụng rộng rãi để bảo vệ kết cấu thép và bê tông khỏi tác động của nhiệt độ cao trong các sự cố hỏa hoạn.

- *Sợi khoáng phun - Sprayed Mineral Fiber (SMF)*: Loại vật liệu được tạo thành từ hỗn hợp sợi khoáng, xi măng vô cơ, phụ gia kết dính và nước, sau đó được phun trực tiếp lên bề mặt kết cấu để tạo thành lớp phủ cách nhiệt và chống cháy (Hình 2b). SMF hoạt động theo cơ chế cách nhiệt và hấp thụ nhiệt, giúp giảm tốc độ gia tăng nhiệt độ của kết cấu thép hoặc bê tông bên dưới.



a) - Phun vữa chống cháy vermiculite xi măng (VCM)



b) - Sợi khoáng phun chống cháy (SMF)

Hình 2. Phun vật liệu chống cháy bề mặt cho công trình

(Nguồn: Internet).

3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Nghiên cứu này sử dụng Tiêu chuẩn ACI 318-19 [7], ACI-TMS 216.1-14 [8] và hướng dẫn của Gustaferro và Martin [9] để tính toán sức kháng uốn của bản bê tông DƯL có sử dụng và không sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt khi chịu tác động của nhiệt độ cao. Theo đó, dưới tác động của nhiệt độ, cường độ của bê tông và thép bị suy giảm. Khi tính toán sức kháng uốn của tiết diện dưới tác động của nhiệt độ cháy, hai giả thiết sau được áp dụng: (1) Diện tích cốt thép là không đổi nhưng cường độ của thép bị suy giảm; (2) Chiều cao vùng chịu nén bị giảm do tổng lực kéo trên tiết diện giảm. Tuy nhiên, cường độ của bê tông vùng chịu nén không thay đổi nếu nhiệt độ bê tông vùng chịu nén nhỏ hơn 482°C (900°F) [9]. Khi đó, sức kháng uốn của tiết diện dưới tác động của nhiệt độ được tính theo công thức (1):

$$M_{n\theta} = A_{ps} f_{ps\theta} (d - \frac{a_{\theta}}{2}) \quad (1)$$

Trong đó: θ - Biểu thị ảnh của nhiệt độ cao; $M_{n\theta}$ - Sức kháng mô-men; A_{ps} - Diện tích thép DƯL; $f_{ps\theta}$ - Cường độ của thép DƯL tại nhiệt độ mà thép phải chịu, được lấy theo Tiêu chuẩn ACI-TMS 216.1-14 [8]; d - Chiều cao có hiệu của tiết diện; a_{θ} - Chiều cao vùng chịu nén quy đổi khi cháy. Theo công thức (1), để tính khả năng kháng uốn của tiết diện khi cháy, nhiệt độ mà thép DƯL phải chịu và cường độ tương ứng của chúng phải được xác định. ACI-TMS 216.1-14 đưa ra biểu đồ xác định nhiệt độ tại các vị trí trong bản bê tông theo thời gian (Hình 4.4.2.2.1). Nhiệt độ của thép DƯL được giả thiết bằng nhiệt độ của bê tông tại vị trí đó. Từ nhiệt độ của thép DƯL, cường độ của chúng được xác định dựa vào Hình 4.4.2.2.1b trong Tiêu chuẩn ACI-TMS 216.1-14.

Đối với kết cấu bê tông sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt, Gustaferro và Martin [9] cho rằng bề dày của các loại chống cháy bề mặt có thể được quy đổi thành bề dày của lớp bê tông bảo vệ tương ứng (Hình A.5 trong Gustaferro và Martin [9]). Lớp bê tông quy đổi

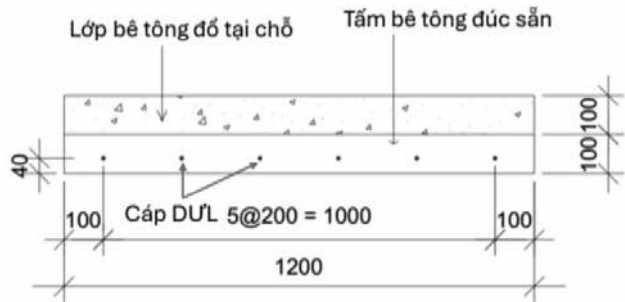
làm dày thêm lớp bảo vệ cốt thép và làm chậm sự phát triển nhiệt độ của cốt thép.

4. KHẢ NĂNG CHỊU CHÁY CỦA BẢN BÊ TÔNG DƯỠNG VÀ KHÔNG SỬ DỤNG VẬT LIỆU CHỐNG CHÁY BỀ MẶT

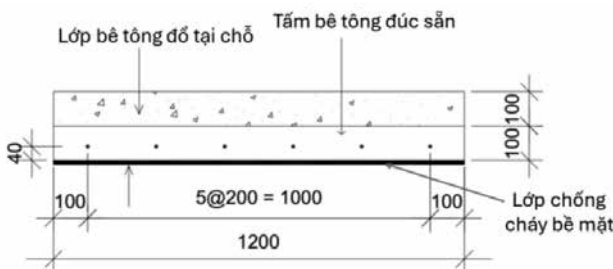
4.1. Ví dụ điển hình

4.1.1. Bản khảo sát

Để nghiên cứu ảnh hưởng của vật liệu chống cháy bề mặt đến khả năng kháng uốn của bản bê tông cốt thép DƯỠNG chịu nhiệt độ cháy, 4 bản bê tông DƯỠNG được ký hiệu là S1-C, S2-IM, S3-VCM, S4-SMF được khảo sát, trong đó IM, VCM, SMF là loại vật liệu bề mặt được sử dụng ở mỗi bản. S1-C là bản không sử dụng lớp chống cháy bề mặt. Các bản có kích thước mặt cắt ngang (phần bê tông) là (200×1200)mm (cao × rộng), trong đó bản đúc sẵn có bề dày bằng 100 mm và 100 mm còn lại sẽ được đổ tại chỗ. Bản làm bằng bê tông có cường độ $f'_c = 40$ MPa. Mỗi tấm đúc sẵn bao gồm 6 tảo cáp DƯỠNG có đường kính 9,6 mm với diện tích là 55 mm². Cáp DƯỠNG là loại tảo 7 sợi, có độ chùng thấp và cường độ bằng 1.860 MPa. Đối với bản S2-IM, S3-VCM, S4-SMF, 3 loại vật liệu chống cháy tương ứng sẽ được phủ lên mặt dưới của bản. Bề dày của các lớp vật liệu chống cháy này được thay đổi từ 5 đến 15 mm với bước thay đổi là 5 mm. Giả thiết rằng các lớp chống cháy bề mặt chỉ có tác dụng chống cháy bằng cách làm chậm quá trình truyền nhiệt trong bê tông mà không tham gia vào khả năng kháng uốn của bản. Sức kháng mô-men của bản ở nhiệt độ thường được tính theo Tiêu chuẩn ACI 318-19 và có giá trị tính toán bằng 90 kNm.



a) - Mặt cắt ngang Bản S1-C



b) - Mặt cắt ngang Bản S2-IM; S3-VCM; S4-SMF

Hình 3. Mặt cắt ngang bản khảo sát

4.1.2. Ví dụ tính toán

Để minh họa cho quy trình tính toán sức kháng mô-men của bản khảo sát theo cơ sở lý thuyết trình bày ở Mục 3, trong ví dụ này, giả thiết cháy xuất phát từ phía dưới bản và các lớp chống cháy bề mặt với bề dày bằng 10 mm sẽ được phủ lên bề mặt dưới của bản. Bảng 1 và 2 trình bày các đại lượng được xác định từ các bảng tra.

Các đại lượng này được sử dụng để tính toán sức kháng mô-men của bản khảo sát tại thời điểm 90 phút kể từ khi chịu cháy với đường gia nhiệt tiêu chuẩn ASTM E119. Từ bề dày lớp chống cháy bề mặt bằng 10 mm, sử dụng Hình A.3 theo hướng dẫn của Gustaferro và Martin [9], bề dày lớp bê tông bảo vệ tương đương và khoảng cách từ trọng tâm thép tới bề mặt lớp bê tông tương đương được xác định. Hình 4.4.2.2.a(b) trong ACI-TMS 216.1-14 cho phép người dùng xác định được nhiệt độ của bê tông và của thép DƯỠNG tại khoảng cách bất kỳ (từ 5 tới 180 mm) từ bề mặt cháy ở một thời điểm bất kỳ từ thời điểm bắt đầu cháy tới 240 phút chịu lửa. Tương tự, Hình 4.4.2.2.1b cho phép xác định cường độ của cáp DƯỠNG theo nhiệt độ tăng dần. Từ kết quả thu được, chiều cao vùng chịu nén và sức kháng mô-men của tiết diện sau 90 phút chịu lửa được xác định (Bảng 2). Kết quả cho thấy, việc sử dụng các vật liệu chống cháy bề mặt giúp làm giảm quá trình suy giảm cường độ chịu uốn của bản khi chịu tác động của nhiệt độ cháy. Với S1-C (bản không sử dụng lớp vật liệu cách nhiệt bề mặt), sau 90 phút chịu lửa, bản mất đi 49% khả năng kháng uốn. Trong khi đó, 3 bản sử dụng lớp vật liệu cách nhiệt chỉ mất 6% (đối với S3-VCM và S4-SMF) và 2% (đối với S2-IM) khả năng kháng uốn.

Bảng 1. Bề dày lớp bê tông bảo vệ tương đương và nhiệt độ cáp DƯỠNG tại 90 phút chịu lửa*

Bản khảo sát	Bề dày lớp bê tông bảo vệ tương đương, mm (theo Hình A.5 [9])	Khoảng cách từ bề mặt bê tông tới trọng tâm cốt thép quy đổi, mm	Nhiệt độ tại trọng tâm tảo cáp DƯỠNG (theo Hình 4.4.2.2.1a(b) [8])
S1-C	0	40	430
S2-IM	65,3	105,3	156
S3-VCM	32,0	72,0	204
S4-SMF	30,2	70,2	210

*Kết quả được trong bảng tương ứng với bề dày lớp chống cháy bề mặt bằng 10 mm

Bảng 2. Sức kháng của bản sau 90 phút chịu cháy với 10 mm lớp chống cháy bề mặt

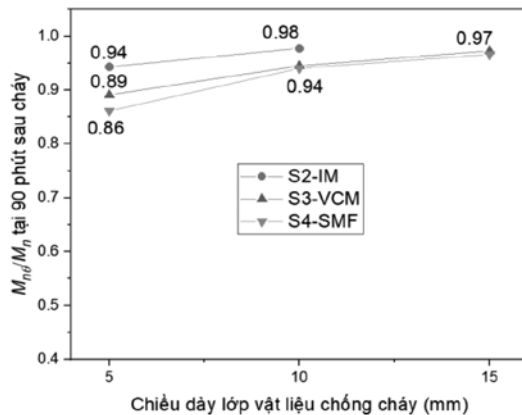
Bản khảo sát	Cường độ chịu kéo của cáp DƯỠNG, $f_{ps\theta}$ (MPa)	Cường độ chịu kéo của cáp DƯỠNG khi phá hoại, $f_{ps\theta}$ (MPa)	Chiều cao vùng chịu nén, mm	$M_{n\theta}$ (kNm)	$M_{n\theta}/M_n$
S1-C	902,1	884,6	7,15	45,66	0,51
S2-IM	1.813,5	1.742,8	14,10	87,97	0,98
S3-VCM	1.748,4	1.682,7	13,61	85,07	0,94
S4-SMF	1.739,1	1.674,1	13,54	84,65	0,94

4.2. Các tham số ảnh hưởng tới khả năng chịu uốn của bản sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt

4.2.1. Ảnh hưởng của bề dày lớp chống cháy bề mặt

Hình 4 biểu thị sức kháng còn lại của S2-IM, S3-VCM và S4-SMF sau 90 phút chịu lửa khi bề dày lớp vật liệu chống cháy bề mặt thay đổi từ 5 đến 15 mm với bước thay đổi là 5 mm. Cần được chú thích rằng, đối với bản sử dụng vật liệu IM, chiều dày khuyến nghị của

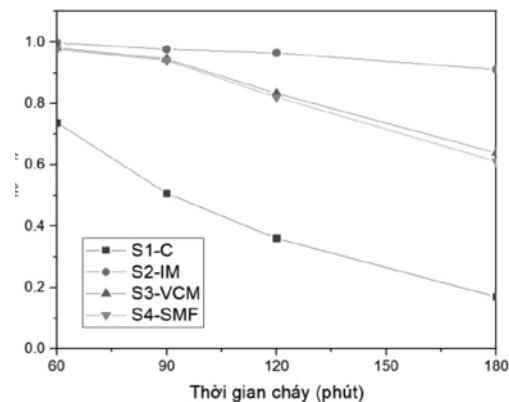
IM không vượt quá 12,7 mm (0,5 in.) [9]. Do đó, giá trị của S2-IM với lớp IM dày 15 mm không được đưa vào trong biểu đồ. Có thể thấy trên Hình 4, hiệu quả chống cháy (được biểu thị thông qua tỷ số sức kháng còn lại so với sức kháng ban đầu) tăng khi bề dày lớp chống cháy bề mặt tăng từ 5 đến 15 mm. Thêm vào đó, với cùng chiều dày lớp chống cháy bề mặt, IM cho kết quả chống cháy tốt nhất, tiếp đến là VCM và SMF. Với cùng bề dày là 10 và 15 mm, hiệu quả chống cháy của VCM và SMF gần như tương đương.



Hình 4. Sự suy giảm mô-men kháng uốn theo chiều dày lớp vật liệu chống cháy bề mặt

4.2.2. Ảnh hưởng của thời gian cháy

Hình 5 biểu thị sự thay đổi tỷ số M_{rd}/M_n theo thời gian của 4 bản khảo sát với 10 mm vật liệu chống cháy khác nhau. Kết quả cho thấy, S1-C (bản không sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt) có độ suy giảm mô-men kháng uốn nhanh nhất theo thời gian, với sức kháng mô-men còn lại sau 180 phút chịu lửa bằng khoảng 18% so với cường độ ban đầu. Trong khi đó, S2-IM duy trì khả năng kháng uốn còn trên 90% sau 180 phút chịu lửa, chứng tỏ khả năng bảo vệ kết cấu khỏi nhiệt độ cháy vượt trội theo thời gian. S3-VCM và S4-SMF có khả năng chống cháy gần tương đương nhau và có hiệu quả tốt hơn trong vòng 90 phút chịu cháy đầu tiên. Sau đó, tốc độ suy giảm cường độ của bản sử dụng VCM và SMF gần tương đương với S1-C (bản không sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt). Tuy nhiên, sau 180 phút chịu lửa, S3-VCM và S4-SMF vẫn duy trì sức kháng mô-men ở mức trên 60% so với sức kháng ban đầu và gấp hơn 3 lần sức kháng mô-men của bản không sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt (S1-C). Do vậy, có thể thấy rằng, lớp chống cháy bề mặt giúp giảm đáng kể sự suy giảm sức kháng mô-men theo thời gian cháy của bản bê tông cốt thép DƯL.



Hình 5. Sự suy giảm mô-men kháng uốn theo thời gian cháy

5. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày nghiên cứu về ảnh hưởng của các vật liệu chống cháy bề mặt tới sự suy giảm khả năng chịu uốn của bản bê tông DƯL chịu nhiệt độ cháy. Ba loại vật liệu chống cháy bề mặt bao gồm vật liệu chống cháy trương nở (IM), vữa chống cháy vermiculite xi măng (VCM) và sợi khoáng phun (SMF) được khảo sát. Sức kháng mô-men theo thời gian cháy của bản bê tông DƯL có và không sử dụng vật liệu chống cháy bề mặt được tính toán dựa trên các tiêu chuẩn ACI 318-19, ACI-TMS 216.1-14 và hướng dẫn của Gustaferro và Martin. Ảnh hưởng của bề dày lớp vật liệu chống cháy và thời gian cháy tới hiệu quả chống cháy thông qua mức độ suy giảm khả năng chịu uốn theo thời gian cháy được khảo sát. Dựa vào kết quả tính toán, một số kết luận quan trọng được rút ra:

- Sự suy giảm khả năng kháng uốn theo thời gian cháy giảm với bề dày của lớp chống cháy bề mặt tăng.

- S1-C (bản không sử dụng lớp chống cháy bề mặt) mất đi gần 50% cường độ chịu uốn sau 90 phút chịu lửa. Tuy nhiên, với việc sử dụng 10 mm lớp chống cháy bề mặt, S2-IM và S3-VCM duy trì khả năng kháng uốn ở mức 94% so với cường độ ban đầu trước khi cháy. Đặc biệt, S2-IM duy trì khả năng này ở mức 98%.

- Với cùng bề dày lớp chống cháy là 5 và 10 mm, IM cho hiệu quả chống cháy tốt nhất. Hiệu quả chống cháy của VCM và SMF gần như tương đương với bề dày phủ là 10 hay 15 mm.

- Tại 180 phút kể từ thời điểm cháy, các lớp vật liệu chống cháy bề mặt vẫn phát huy tốt hiệu quả chịu nhiệt độ cao.

- Việc sử dụng lớp chống cháy bề mặt giúp giảm đáng kể sự suy giảm khả năng chịu uốn của bản bê tông DƯL khi cháy. Do vậy, có thể cân nhắc sử dụng các loại vật liệu chống cháy bề mặt cho các công trình yêu cầu khả năng chịu lửa cao trong môi trường có nguy cơ xảy ra hỏa hoạn.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây dựng Hà Nội với Đề tài mã số 12-2025/KHXD.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Hertz, K.D.J.F.s.j. (2003), Limits of spalling of fire-exposed concrete, 38(2), pp.103-116.
- [2]. Hollingbery, L.A. and T.R. Hull (2012), The fire retardant effects of huntite in natural mixtures with hydromagnesite, Polymer Degradation and Stability, 97(4), pp.504-512.
- [3]. Mariappan, T.J.J.o.f.s. (2016), Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review, 34(2), pp.120-163.
- [4]. Murillo, A.M., et al. (2021), Comparison of the fire resistance behaviour of structural insulated panels with expanded polystyrene core treated with intumescent coating, 12, pp.1958-1969.
- [5]. Zhu, A., H. Wu and J.J.J.o.m.i.c.e. Liu (2022), Feasibility study on novel fire-resistant coating materials, 34(6), p.04022080.
- [6]. Hezhev, T., et al. (2018), Fire resistant fibre reinforced vermiculite concrete with volcanic application, (4 (80)), pp.181-194.
- [7]. ACI Committee 318, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318RM-19), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [8]. ACI-TMS CODE 216.1-14 Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Asse, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [9]. Gustaferro, A.H. and L.D. Martin (1989), Design for fire resistance of precast prestressed concrete, Prestressed Concrete Institute.