

Nghiên cứu tổng quan về ứng xử cơ học và tiềm năng ứng dụng của bê tông cốt lưới dệt dự ứng lực

Nguyễn Công Hậu^{1*}

¹Trường Đại học Giao thông vận tải

TỪ KHOÁ

Bê tông cốt lưới dệt
Dự ứng lực
Bê tông hạt mịn
Ván khuôn vĩnh cửu
Sàn liên hợp
Ứng xử cơ học

TÓM TẮT

Bê tông cốt lưới dệt (BTCLD) là vật liệu composite gồm bê tông hạt mịn và lưới sợi cường độ cao, có ưu điểm về trọng lượng nhẹ, độ bền cao và khả năng chống ăn mòn. Tuy nhiên, BTCLD thông thường dễ xuất hiện vết nứt sớm ở tải trọng thấp, làm hạn chế hiệu quả chịu lực của cấu kiện. Việc áp dụng công nghệ dự ứng lực (DUL) giúp trì hoãn sự hình thành vết nứt, kéo dài trạng thái đàn hồi và tăng độ cứng của cấu kiện. Bài báo tổng quan hai phương pháp tạo DUL là cơ học và hóa học, đồng thời phân tích vai trò của dự ứng lực và lớp phủ epoxy đối với khả năng dính bám của bó sợi. Ngoài ra, các yếu tố ảnh hưởng đến mất mát dự ứng lực dài hạn cũng được xem xét. Kết quả cho thấy BTCLD dự ứng lực có tiềm năng lớn khi sử dụng làm ván khuôn vĩnh cửu cho sàn liên hợp, đồng thời đặt ra nhu cầu nghiên cứu về hệ thống neo và hoàn thiện các hướng dẫn thiết kế cho loại kết cấu này.

KEYWORDS

Textile reinforced concrete
Prestressing
Fine-grained concrete
Permanent formwork
Composite slab
Mechanical behavior

ABSTRACT

Textile reinforced concrete (TRC) is an advanced composite material consisting of fine-grained concrete and high-strength fiber textiles, offering advantages such as lightweight, high durability, and excellent corrosion resistance. However, conventional TRC tends to develop cracks at relatively low load levels, which limits the structural efficiency and load-carrying capacity of the elements. The application of prestressing technology is considered an effective solution to delay crack initiation, extend the uncracked elastic stage, and increase the stiffness of the structural elements. This paper reviews two main methods for introducing prestress, namely mechanical prestressing and chemical prestressing, and analyzes the role of prestressing and epoxy coating in improving the bond performance of fiber bundles. In addition, factors influencing long-term prestress losses are discussed. The results indicate that prestressed TRC has significant potential for use as permanent formwork in composite slab systems. At the same time, further research on anchorage systems and the development of appropriate design guidelines is required to facilitate the practical application of this type of structure.

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh ngành xây dựng đang đóng vai trò then chốt trong nền kinh tế toàn cầu nhưng cũng đồng thời tiêu thụ một lượng lớn năng lượng, vật liệu và gây ra những ảnh hưởng tiêu cực đến môi trường [1], các sáng kiến về vật liệu xanh và bền vững ngày càng trở nên cấp thiết. Sự gia tăng dân số và tốc độ đô thị hóa nhanh chóng dẫn đến nhu cầu không lồ về nhà ở và cơ sở hạ tầng, thúc đẩy việc nghiên cứu các loại vật liệu tiên tiến nhằm giảm mức tiêu thụ tài nguyên. Trong xu hướng đó, bê tông cốt lưới dệt (Textile Reinforced Concrete - TRC) nổi lên như một vật liệu composite đầy hứa hẹn, được nghiên cứu lần đầu từ cuối những năm 1990 tại Đức [2].

Bê tông cốt lưới dệt là sự kết hợp giữa bê tông hạt mịn (BTHM) và lưới sợi dệt từ các loại vật liệu cường độ cao như các bon, thủy tinh, bazan hoặc aramid [2-4]. So với bê tông cốt thép truyền thống, BTCLD sở hữu nhiều ưu điểm vượt trội như: cốt lưới sợi phi kim nên không bị ăn mòn, cho phép chế tạo các cấu kiện thành mỏng đáng kể giúp tiết

kiệm vật liệu, giảm trọng lượng bản thân, từ đó thuận tiện cho việc vận chuyển và lắp đặt. Đặc biệt, tính linh hoạt của lưới dệt cho phép tạo hình các kết cấu phức tạp mà vẫn duy trì khả năng chịu tải và chống nứt cao [3, 5].



Hình 1. Bê tông cốt lưới dệt [6].

Tuy nhiên, một hạn chế kỹ thuật lớn của BTCLD thông thường là bê tông hạt mịn có xu hướng bị nứt rất sớm ngay cả ở mức tải trọng nhỏ [7]. Khi vết nứt xuất hiện, cường độ chịu kéo cực cao của lưới sợi vẫn chưa được khai thác hết khả năng, làm giảm hiệu quả chịu lực tổng

*Liên hệ tác giả: haunc_ph@utc.edu.vn

Nhận ngày 16/03/2026, sửa xong ngày 20/03/2026, chấp nhận đăng ngày 22/03/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1286>

thể của kết cấu [7, 8]. Bên cạnh đó, do lưới dệt có mô đun đàn hồi thấp hơn thép, cấu kiện thường gặp hiện tượng biến dạng lớn ngay sau khi nứt [7, 9], gây mất an toàn và không đáp ứng được các giới hạn về điều kiện sử dụng. Trong thực tế thi công, cốt lưới sợi thường không ở trạng thái thẳng tuyệt đối mà bị nhăn hoặc gợn sóng [8, 10, 11], khiến chúng phản ứng chậm với ứng suất kéo và làm bê tông bị nứt nhiều hơn trước khi cốt sợi thực sự được kích hoạt.

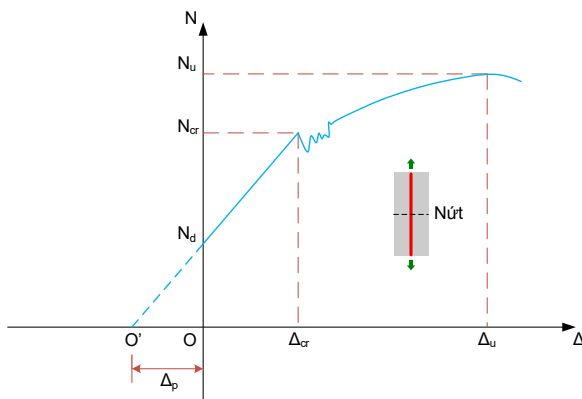
Để khắc phục những nhược điểm này, việc ứng dụng công nghệ dự ứng lực cho cốt lưới dệt là giải pháp hiệu quả nhằm tận dụng tối đa cường độ của sợi và cải thiện khả năng làm việc của kết cấu [8]. Việc tạo ứng suất nén trước giúp trì hoãn sự hình thành vết nứt, mở rộng trạng thái đàn hồi không nứt của bê tông và tăng độ cứng tổng thể cho cấu kiện. Các nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh rằng tấm BTCLD dự ứng lực hai phương có thể tăng khả năng chịu tải thêm khoảng 20 % và giúp các vết nứt được khép lại gần như hoàn toàn sau khi dỡ tải [8, 9].

Một ứng dụng tiềm năng của BTCLD dự ứng lực là làm ván khuôn tích hợp (ván khuôn vĩnh cửu) cho kết cấu sàn liên hợp. Tấm ván khuôn này không chỉ đóng vai trò là khuôn đúc trong giai đoạn thi công mà còn trở thành một phần chịu lực của kết cấu, hoạt động như lớp bảo vệ và thành phần chịu kéo trong giai đoạn khai thác. Các thử nghiệm cho thấy hệ sàn liên hợp sử dụng ván khuôn BTCLD có khả năng chịu tải cực hạn cao hơn đáng kể so với sàn bê tông cốt thép thông thường [5].

Mặc dù có tiềm năng rất lớn, các nghiên cứu về BTCLD dự ứng lực hiện nay vẫn còn khá hạn chế. Hiện chưa có nhiều nghiên cứu chuyên sâu về việc kiểm soát các tính chất cơ học dài hạn như từ biến, chùng cốt sợi, cũng như thiếu các tiêu chuẩn thiết kế đầy đủ để ứng dụng công nghệ này vào các cấu kiện thành mỏng vượt nhịp lớn hoặc ván khuôn sàn liên hợp trong thực tế. Vì vậy, việc tổng hợp, phân tích và đánh giá có hệ thống các kết quả nghiên cứu hiện có về BTCLD dự ứng lực là cần thiết nhằm làm rõ khoảng trống khoa học, định hướng các nghiên cứu tiếp theo, đồng thời tạo cơ sở cho việc phát triển các khuyến nghị thiết kế và thúc đẩy khả năng ứng dụng trong thực tiễn.

2. Bê tông cốt lưới dệt dự ứng lực

2.1. Nguyên lý cơ bản của dự ứng lực trong BTCLD

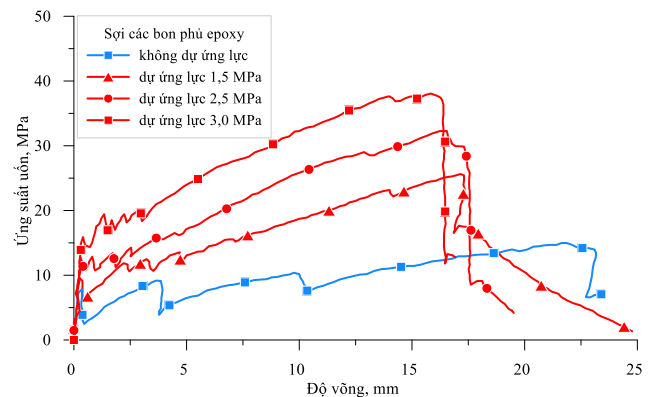


Hình 2. Nguyên lý làm việc của kết cấu dự ứng lực [8].

Nguyên lý cốt lõi của việc ứng dụng dự ứng lực vào BTCLD là chủ động tạo ra một lực nén trước trong bê tông hạt mịn thông qua việc kéo căng các bó sợi lưới dệt trước khi cấu kiện chịu tải trọng khai thác. Lực nén này giúp dịch chuyển điểm bắt đầu làm việc của vật liệu từ gốc O sang O', từ đó mở rộng trạng thái đàn hồi không nứt của bê tông. Cấu kiện chỉ bắt đầu bị nứt khi ngoại lực kéo tác động đủ lớn để triệt tiêu hoàn toàn ứng suất nén trước (tại điểm giải nén N_d) và tiếp tục vượt quá giới hạn chịu kéo của bê tông [8].

2.2. Hiệu quả của dự ứng lực trong BTCLD

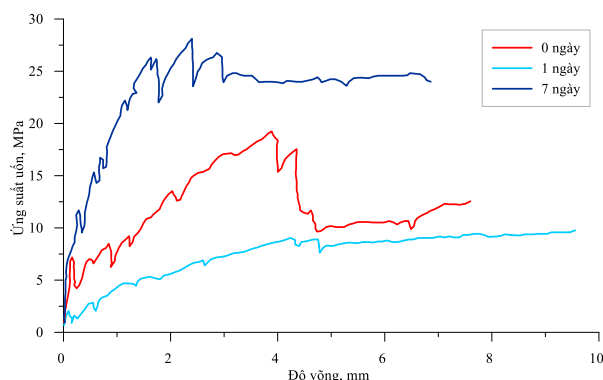
Các nghiên cứu tiên phong về tính khả thi và hiệu quả của BTCLD dự ứng lực được Reinhardt và cộng sự thực hiện từ đầu những năm 2000. Đây là một trong những nhóm nghiên cứu đầu tiên khẳng định hiệu quả vượt trội của giải pháp BTCLD ứng suất trước sử dụng sợi thủy tinh và sợi các bon [8, 9]. Nghiên cứu chỉ ra rằng DUL giúp loại bỏ độ chùng ban đầu của lưới dệt, từ đó giảm thiểu đáng kể độ võng và bề rộng vết nứt. Các tấm được dự ứng lực hai phương có khả năng chịu tải cao hơn khoảng 20 % so với mẫu thông thường và tạo ra hiệu ứng màng giúp hạn chế phá hoại chọc thủng. Đặc biệt, lưới dệt các bon tấm epoxy được đánh giá là rất phù hợp và đạt hiệu quả cao.



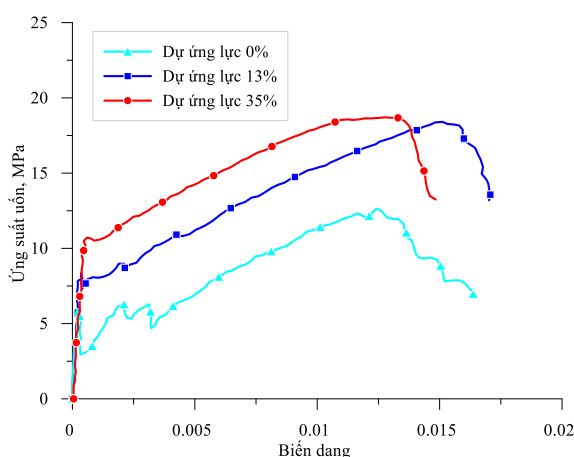
Hình 3. Quan hệ ứng suất uốn – độ võng của mẫu BTCLD sợi các bon DUL [8].

Meyer và Vilkner [12] sử dụng lưới sợi aramid cường độ cao kết hợp với hệ thống neo bằng khối epoxy. Kết quả cho thấy dự ứng lực giúp duy trì tính toàn vẹn của cấu kiện và tăng cường khả năng chịu lực, minh chứng rõ nhất là việc các vết nứt mở rộng đến 1 mm có thể đóng lại gần như hoàn toàn sau khi dỡ tải.

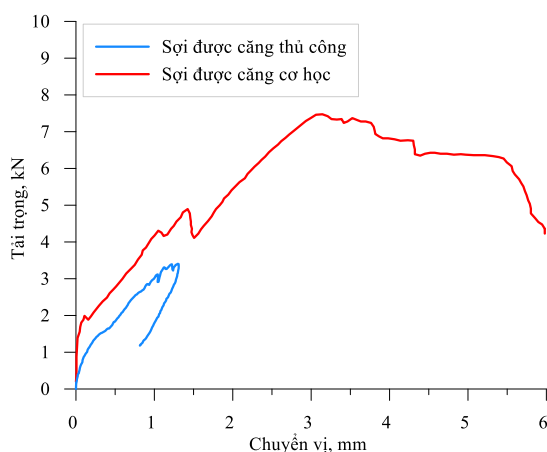
Nghiên cứu về cơ chế dính bám và thời điểm giải phóng ứng suất của Peled [10] tập trung vào các loại sợi như polyetylen, polypropylene và kevlar để tìm hiểu ảnh hưởng của DUL đến lực dính bám. Tác giả kết luận rằng sợi có mô đun đàn hồi càng cao thì độ cứng của tấm BTCLD càng lớn. Đặc biệt, thời gian giải phóng DUL muộn (7 ngày) mang lại hiệu quả cải thiện rõ rệt, giúp khả năng chịu lực và biến dạng cao hơn 30 % so với giải phóng ngay lập tức. Ngược lại, nếu giải phóng quá sớm (1 ngày), kết cấu có thể bị suy yếu đến 50 %.



Hình 4. Quan hệ ứng suất uốn - độ võng của sợi kevlar dự ứng lực [10].



Hình 5. Quan hệ ứng suất uốn – biến dạng ở các mức dự ứng lực khác nhau [13].



Hình 6. Quan hệ tải trọng – chuyển vị của mẫu DUL kéo dọc trục [11].

Hutaibat và cộng sự [13] khảo sát các yếu tố như mức ứng suất trước, thời gian giải phóng DUL và loại lớp phủ trên sợi bazan. Nghiên cứu phát hiện ở mức DUL 35 %, ứng suất gây nứt có thể tăng tới 176 % (với mẫu nhả tải sau 1 ngày) và độ cứng trước khi nứt tăng gấp đôi. Tác giả cũng nhấn mạnh vai trò của lớp phủ cát, giúp tăng ứng

suất phá hoại thêm 50 % và độ dẻo dai thêm 70 % so với lớp phủ polyme thông thường. Kết quả còn cho thấy thời gian giải phóng DUL trễ giúp các vết nứt xuất hiện dày hơn đồng thời có bề rộng nhỏ hơn.

Ảnh hưởng của phương pháp thi công trong nghiên cứu của Gopinath và cộng sự [11] đã chỉ ra tầm quan trọng của việc kéo căng cơ học so với kéo căng thủ công. Việc kéo căng cơ học giúp loại bỏ độ chùng ban đầu, giúp ứng suất gây nứt tăng 2,65 lần và ứng suất phá hoại cuối cùng tăng 2,45 lần. Trong khi mẫu kéo thủ công thường bị tuột sợi khi phá hoại, mẫu kéo cơ học cho thấy sợi dẹt bị đứt. Ngoài ra, các mẫu được kéo căng cơ học có độ rộng vết nứt thấp hơn và khoảng cách vết nứt trung bình nhỏ hơn so với mẫu kéo căng thủ công.

Ngo và cộng sự [14] sử dụng kết hợp thực nghiệm và mô phỏng số trên BTCLD các bon. Kết quả cho thấy DUL làm tăng rõ rệt tải trọng gây nứt (tăng từ 83,3 % đến 86,7 %) và khả năng tiêu tán năng lượng, đồng thời làm giảm độ rộng vết nứt và độ võng cuối cùng của cấu kiện.

Du và cộng sự [15] khẳng định số lượng lớp dẹt (từ 3 đến 5 lớp) là yếu tố quyết định đến độ cứng và khả năng chịu kéo. Nghiên cứu chỉ ra rằng, DUL góp phần cải thiện rõ rệt tải trọng gây nứt (tăng khoảng 19 đến 65 %), nhưng chỉ có tác dụng nhỏ đến khả năng chịu kéo cuối cùng (tăng nhẹ khoảng 1 đến 16 %). Nhóm nghiên cứu cũng đề xuất giải pháp thêm sợi thép ngắn để tạo hiệu ứng bắt cầu giữa các vết nứt vi mô, giúp hạn chế sự phá hủy giòn và đột ngột khi sử dụng mức DUL quá cao.

Các nghiên cứu ban đầu cho thấy BTCLD dự ứng lực mang lại những kết quả rất tích cực. Việc kết hợp chủ động hai loại vật liệu cường độ cao là bê tông hạt mịn và lưới sợi dẹt thông qua công nghệ dự ứng lực cho phép cải thiện khả năng chịu lực, từ đó nâng cao hiệu quả kinh tế của thiết kế, đồng thời kéo dài trạng thái không nứt và tuổi thọ công trình. Nhờ đó, hình thành nên một loại vật liệu composite có tiềm năng ứng dụng cao và bền vững, phù hợp cho các cấu kiện thành móng hoặc gia cường các kết cấu hiện hữu.

3. Phương pháp tạo dự ứng lực cho BTCLD

Bê tông cốt lưới dẹt là vật liệu composite tiên tiến, nhưng để khai thác hiệu quả khả năng chịu lực của các sợi dẹt phi kim có cường độ cao, việc tạo dự ứng lực là một yêu cầu tất yếu. Khác với bê tông cốt thép truyền thống có thể sử dụng phương pháp kéo sau, cốt lưới dẹt với cấu trúc sợi bố trí theo hai phương khiến việc luồn vào ống gen trở nên khó khả thi. Do đó, công nghệ DUL cho BTCLD chủ yếu tập trung vào phương pháp căng trước, phù hợp cho các cấu kiện đúc sẵn. Thách thức lớn nhất nằm ở việc kẹp chặt một số lượng lớn các bó sợi sao cho chúng có độ giãn dài đồng đều và duy trì lực kéo ổn định trong suốt quá trình thi công [13, 16]. Hiện nay, cốt lưới dẹt có thể được tạo dự ứng lực thông qua hai phương pháp chủ yếu, gồm phương pháp cơ học và phương pháp hóa học.

3.1. Phương pháp tạo dự ứng lực cơ học

Trong phương pháp này, cốt lưới dệt được kéo căng bằng các thiết bị cơ khí trước khi đổ bê tông. Sau khi bê tông đạt cường độ, lưới sợi được cắt khỏi hệ thống, lực co lại của sợi sẽ truyền ứng suất nén vào bê tông thông qua lực dính bám, qua đó hình thành trạng thái ứng suất trước trong cấu kiện. Cho phép kiểm soát chính xác mức ứng suất thiết kế và có thể tạo ra dự ứng lực rất lớn [8].

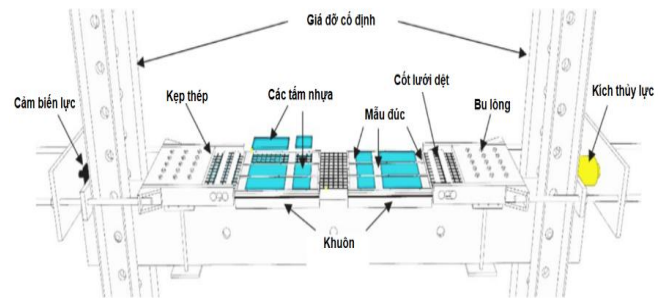
Các nghiên cứu đã phát triển nhiều hệ thống kẹp khác nhau để phân phối ứng suất đồng đều lên lưới sợi. Reinhardt [8, 9] sử dụng hệ thống 10 kẹp riêng biệt cho từng bó sợi, có thể tạo lực căng lên tới 40 kN/m². Trong khi đó, Hutaibat [13] sử dụng các bản thép lớn và bu lông siết chặt để kẹp toàn bộ lớp lưới. Để giảm thiểu rủi ro trượt sợi, các tác giả như Du [15] và Ngo [14] đã cải tiến bằng cách quấn lưới dệt quanh các con lăn hình trụ tròn trước khi kẹp. Một hướng đi khác của Meyer và Vilkner [12] là bọc đầu lưới sợi trong khối neo epoxy để căng đồng thời nhiều lớp lưới.

Ưu điểm lớn nhất của phương pháp cơ học là khả năng kiểm soát chính xác mức ứng suất và tạo ra lực nén lớn. Tuy nhiên, nhược điểm chủ yếu là lưới sợi rất nhạy cảm với ứng suất kẹp bề mặt [8], dễ dẫn đến đứt gãy bó sợi nếu kẹp quá chặt hoặc trượt sợi nếu kẹp không đủ lực. Thêm vào đó, việc ứng suất kéo không phân bố đồng đều giữa các bó sợi do sự tiếp xúc khác nhau tại bản kẹp là một rủi ro làm giảm hiệu quả chịu lực tổng thể [13]. Ngay cả giải pháp neo epoxy dù giúp căng nhiều lớp lưới cùng lúc nhưng cũng gặp hạn chế do nhựa epoxy khó thấm sâu vào lõi bó sợi, gây ra hiện tượng trượt nội bộ giữa các sợi đơn lẻ [12].

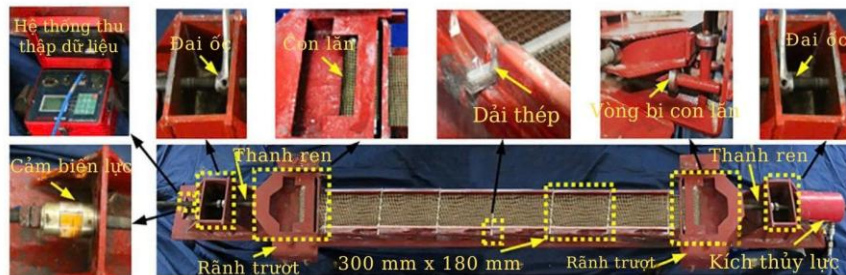
Vì vậy, yêu cầu cần phải có một giải pháp sao cho có thể tạo được DUL cho một hoặc nhiều lớp lưới dệt cùng lúc, tạo ra ứng suất đồng đều giữa các bó sợi của lưới cũng như trong mỗi bó, đồng thời ít gây mất mát ứng suất nhất có thể và chi phí cho hệ thống neo cũng phải phù hợp để đảm bảo tính kinh tế khi chế tạo các cấu kiện có kích thước lớn.



(a) Các kẹp thép nhỏ [8, 9]



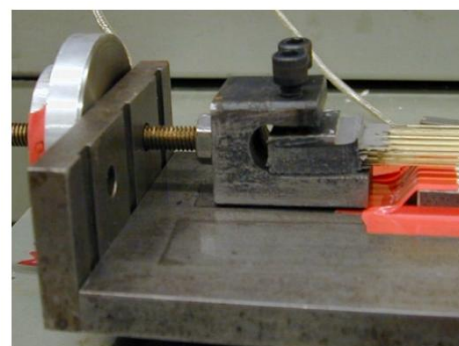
(b) Kẹp thép bản lớn và bu lông [13]



(c) Hệ thống con lăn và máng trượt [15]



(d) Kẹp thép bản lớn và con lăn [14]



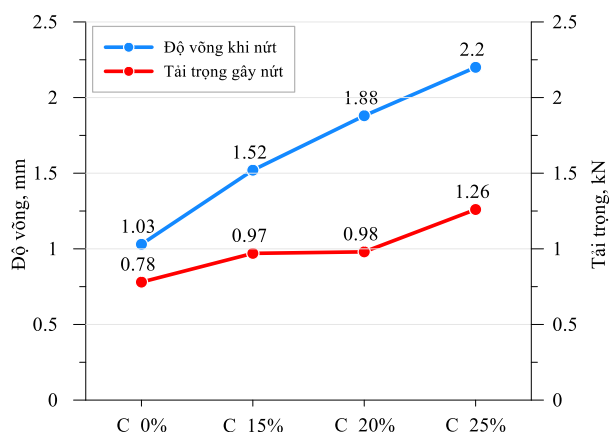
(e) Đầu neo bằng epoxy [12]

Hình 7. Cấu tạo neo cốt lưới dệt dự ứng lực.

3.2. Phương pháp tạo dự ứng lực hóa học

Phương pháp này không sử dụng các thiết bị cơ khí bên ngoài mà dựa vào sự biến đổi thể tích bản thân của vật liệu để tạo lực nén. Bê tông được trộn bằng xi măng trương nở hoặc sử dụng các phụ gia trương nở, phổ biến nhất là canxi sulphoaluminates (CSA). Khi hỗn hợp này phản ứng với nước, nó tạo ra một loại bê tông có khả năng tăng thể tích đáng kể sau khi ninh kết so với bê tông sử dụng xi măng Portland thông thường [17, 18]. Cơ chế trương nở chủ yếu được thúc đẩy bởi sự hình thành các tinh thể ettringite ($C_6AS_3H_{32}$), tạo ra áp suất trương nở bên trong cấu trúc bê tông [17]. Sự trương nở của bê tông bị cốt lưới dẹt bên trong hạn chế lại, ứng suất kéo được hình thành trong cốt sợi. Do tính chất đàn hồi, cốt lưới dẹt có xu hướng co lại, từ đó truyền ứng suất nén ngược trở lại lên bê tông, tạo thành trạng thái dự ứng lực.

Phương pháp này mang lại những cải thiện rõ rệt về khả năng làm việc của cấu kiện, đặc biệt là với cốt lưới phi kim. Các nghiên cứu của Zdanowicz và cộng sự [17] cho thấy mô men gây nứt có thể tăng tới 150% so với các tấm không trương nở. Wyrzykowski và cộng sự [19] phát hiện ra ứng suất trước hóa học giúp tăng mô men nứt của các dầm hơn ba lần so với mẫu đối chứng. Nghiên cứu của Dhahir [20] cũng chỉ ra ứng suất gây nứt tăng 96%, đồng thời độ cứng ban đầu trước khi nứt cũng cao hơn đáng kể. Dự ứng lực hóa học giúp thay đổi hình thái vết nứt với các vết nứt xuất hiện nhỏ hơn và mật độ dày hơn thay vì các vết nứt lớn.



Hình 8. Tải trọng và độ võng khi nứt theo hàm lượng CSA [17].

Ứng suất kéo sinh ra trong cốt lưới sợi các bon có thể đạt giá trị rất lớn. Dhahir và Marx [21] ghi nhận ứng suất kéo trong cốt lưới sợi dao động từ 352,6 MPa đến 524,6 MPa. Khi áp dụng điều kiện bảo dưỡng thích hợp và hàm lượng phụ gia tối ưu (17,5 % CSA), ứng suất kéo cuối cùng trong sợi các bon có thể đạt tới 902 MPa (Dhahir [22]). Theo Wyrzykowski và cộng sự [19], giá trị này thậm chí có thể vượt quá 1000 MPa, đồng thời tạo ra ứng suất nén trung bình trong bê tông khoảng 4–5,2 MPa. Các thử nghiệm kéo dài tới 3 năm cho thấy mất mát

dự ứng lực do co ngót và từ biến là rất thấp so với ứng suất ban đầu và ứng suất thường ổn định sau khoảng 1 năm tuổi.

Đây là giải pháp rất phù hợp với cốt sợi phi kim vì tránh được việc kẹp cơ khí gây hỏng sợi. Tuy nhiên, phương pháp này đòi hỏi sự kiểm soát chặt chẽ. Phụ gia trương nở thường thay thế từ 10 % đến 20 % trọng lượng xi măng, tỷ lệ dưới 10 % chỉ đủ để bù co ngót, trong khi trên 20 % có thể gây phá hủy cấu trúc bê tông [17]. Dhahir và Marx [21] phát hiện ra việc bổ sung phụ gia trương nở có thể làm giảm cường độ bê tông ở giai đoạn đầu khoảng 9,5–13 %. Sự trương nở thường xảy ra mạnh nhất sau 5–7 ngày, đây là khoảng thời gian đủ để bê tông đạt được cường độ cần thiết nhằm hình thành liên kết dính bám và chịu được ứng suất nén. Quá trình này yêu cầu chế độ bảo dưỡng nghiêm ngặt (ưu tiên bảo dưỡng dưới nước hoặc giữ ẩm liên tục) để đạt được độ trương nở tối ưu [18, 20]. Hiện nay, việc ước tính chính xác mức DUL hóa học bằng các mô hình phân tích vẫn còn nhiều hạn chế và có thể xảy ra sai lệch. Do đó, mức DUL tạo ra rất khó được kiểm soát chính xác chỉ thông qua tính toán lý thuyết, mà thường cần được xác định bằng các phép đo thực nghiệm trong phòng thí nghiệm [17].

3.3. Đánh giá so sánh và lựa chọn công nghệ

Khi so sánh hai phương pháp tạo dự ứng lực cho cốt lưới dẹt, có thể thấy sự khác biệt rõ rệt về khả năng kiểm soát ứng suất và tính khả thi trong thi công.

Phương pháp cơ học có ưu điểm nổi bật về độ ổn định và khả năng kiểm soát chính xác mức ứng suất trước, đồng thời có thể tạo ra mức ứng suất lớn và phân bố tương đối đồng đều trong cốt lưới dẹt. Tuy nhiên, phương pháp này đòi hỏi hệ thống neo và thiết bị căng kéo tương đối phức tạp, chi phí cao, đồng thời tồn tại nguy cơ hư hỏng hoặc đứt sợi tại vị trí kẹp neo do cốt sợi dẹt nhạy cảm với lực ngang.

Ngược lại, phương pháp dự ứng lực hóa học có ưu điểm ở khả năng bảo vệ cốt sợi và đơn giản hóa quy trình tạo ứng suất, do không cần sử dụng hệ thống neo cơ học phức tạp. Tuy nhiên, hiệu quả của phương pháp này phụ thuộc chính vào điều kiện dưỡng hộ, đặc biệt cần duy trì độ ẩm nghiêm ngặt trong những ngày đầu để đảm bảo quá trình trương nở diễn ra đầy đủ. Ngoài ra, mức ứng suất trước cuối cùng khó được dự đoán chính xác, do chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố như thành phần cấp phối, điều kiện dưỡng hộ và mức độ liên kết giữa bê tông và cốt sợi.

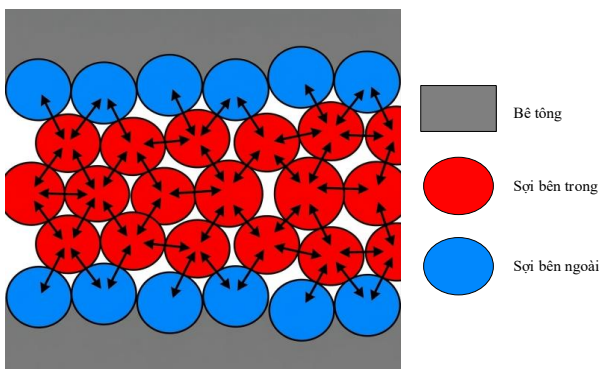
Mặc dù công nghệ dự ứng lực hóa học cho thấy nhiều triển vọng và đã đạt được những bước tiến đáng kể trong thời gian gần đây, xét về độ tin cậy trong nghiên cứu cũng như khả năng áp dụng trong thực tế, phương pháp dự ứng lực cơ học hiện vẫn được xem là lựa chọn ưu tiên nhằm đảm bảo tính ổn định và khả năng kiểm soát của cấu kiện. Để nâng cao hiệu quả của phương pháp này, các nghiên cứu trong tương lai cần tập trung vào cải tiến thiết kế hệ thống neo, nhằm phân bố ứng suất đồng đều giữa các lớp lưới, đồng thời giảm chi phí và đảm bảo tính kinh tế đối với các cấu kiện có kích thước lớn.

4. Tương tác dính bám giữa bê tông hạt mịn và cốt lưới dệt

4.1. Cơ chế dính bám

Trong kết cấu bê tông cốt lưới dệt, lực dính bám giữa lưới sợi và bê tông hạt mịn là yếu tố quyết định khả năng làm việc đồng thời của vật liệu composite. Lực dính bám này không chỉ quyết định chiều dài neo của cốt lưới sợi trong bê tông, mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến bề rộng và khoảng cách giữa các vết nứt trong cấu kiện. Khác với cốt thép truyền thống, cơ chế dính bám chủ yếu dựa vào liên kết cơ học nhờ các gờ trên bề mặt thanh thép, cốt lưới dệt không có gờ nên cơ chế truyền lực với bê tông hạt mịn (BTHM) chủ yếu dựa vào dính bám hóa học và ma sát, trong đó thành phần ma sát đóng vai trò chủ đạo.

Một thách thức lớn từ cấu trúc của bó sợi đó là bó sợi không phải một vật liệu đồng nhất mà được tổ hợp từ hàng nghìn sợi đơn, giữa các sợi tồn tại các khe rỗng có kích thước rất nhỏ. Do kích thước khe rỗng hạn chế, BTHM thường chỉ có thể tiếp xúc và liên kết tốt với các sợi ở lớp bề mặt của bó sợi, trong khi các sợi ở phần lõi bên trong chủ yếu liên kết với nhau thông qua ma sát nội bộ giữa các sợi cơ bản [2, 8, 23]. Lực ma sát này tương đối nhỏ, khiến các sợi bên trong dễ xảy ra trượt tương đối, làm cho bó sợi chỉ phát huy được một phần khả năng chịu kéo của các sợi đơn [24, 25]. Các nghiên cứu cho thấy bó sợi không được phủ chỉ đạt khoảng 30 % khả năng chịu kéo của sợi đơn [23, 26].

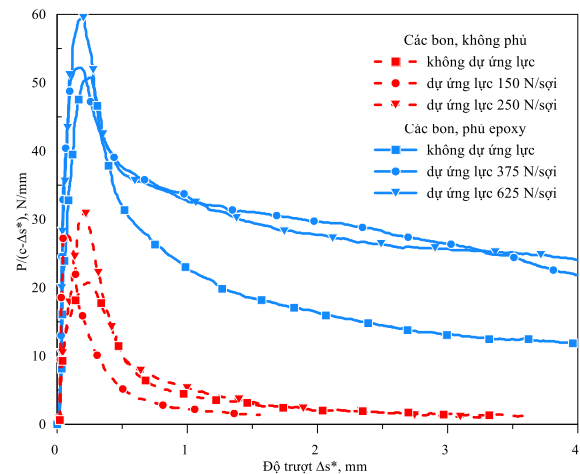


Hình 9. Cơ chế dính bám của BTHM và bó sợi [8].

Để khắc phục hạn chế này, các bó sợi thường được tẩm phủ nhựa epoxy trong quá trình sản xuất. Lớp phủ epoxy bao quanh các sợi đơn, giúp tăng ma sát nội bộ giữa các sợi và phân bố lực đều hơn trong toàn bộ tiết diện bó sợi. Các nghiên cứu của Kulas [23] và Hegger [26] cho thấy việc sử dụng lớp phủ epoxy có thể nâng hiệu suất chịu kéo của bó sợi lên khoảng 70 % so với sợi đơn, cao hơn đáng kể so với bó sợi không được phủ. Ngoài ra, lớp phủ epoxy còn có thể được phủ thêm cát mịn trên bề mặt [9], giải pháp này giúp tăng đáng kể độ bền liên kết giữa lưới dệt và bê tông, đồng thời ổn định hình dạng của lưới dệt [23], tạo thuận lợi cho việc chế tạo các cấu kiện có hình dạng phức tạp hoặc các tấm bản cong.

4.2. Ảnh hưởng của dự ứng lực đến dính bám

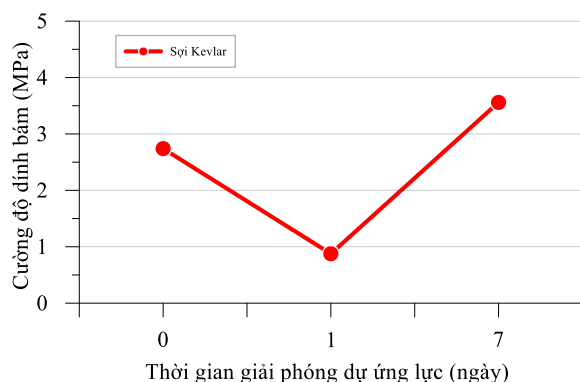
Việc tạo dự ứng lực cho sợi trước khi đổ bê tông mang lại những thay đổi đáng kể trong cơ chế dính bám, nhưng kết quả thu được lại có sự khác biệt lớn tùy thuộc vào loại sợi. Theo Krüger [27], khi giải phóng DUL, cốt sợi các bon phủ epoxy có xu hướng ngấn lại và nở ngang do hiệu ứng Poisson, tạo ra áp lực lớn lên bề mặt bê tông cũng như làm tăng ma sát giữa các sợi bên trong bó, dẫn đến sự gia tăng ứng suất dính bám. Tuy nhiên, đối với sợi các bon không phủ epoxy, hiệu quả của dự ứng lực có thể bị hạn chế. Trong các thí nghiệm chịu uốn, Reinhardt [8] nhận thấy rằng các mẫu sử dụng sợi các bon không phủ epoxy khi được dự ứng lực lại có khả năng chịu uốn thấp hơn và dễ xảy ra hiện tượng kéo tuột cốt sợi so với các mẫu không dự ứng lực. Nguyên nhân là khi bị kéo căng trước, các sợi trong bó có xu hướng duỗi thẳng và ép sát lại với nhau, làm giảm các khe rỗng vi mô giữa các sợi và hạn chế khả năng thâm nhập của BTHM vào lõi bó sợi. Điều này dẫn đến suy giảm đáng kể hiệu quả dính bám. Kết quả thí nghiệm kéo tuột của Krüger [27] cũng cho thấy xu hướng tương tự khi so sánh giữa sợi có phủ và không phủ epoxy. Cụ thể, sợi không phủ thể hiện ứng suất dính bám cực đại thấp và khả năng chống trượt sau khi phá hoại rất kém, trong khi sợi được phủ epoxy có khả năng dính bám với bê tông tốt hơn đáng kể. Những kết quả này cho thấy rằng lớp phủ epoxy đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện hiệu quả dính bám và giúp dự ứng lực phát huy hiệu quả đối với cốt lưới dệt sợi các bon.



Hình 10. Quan hệ ứng suất dính bám – độ trượt của sợi các bon [27].

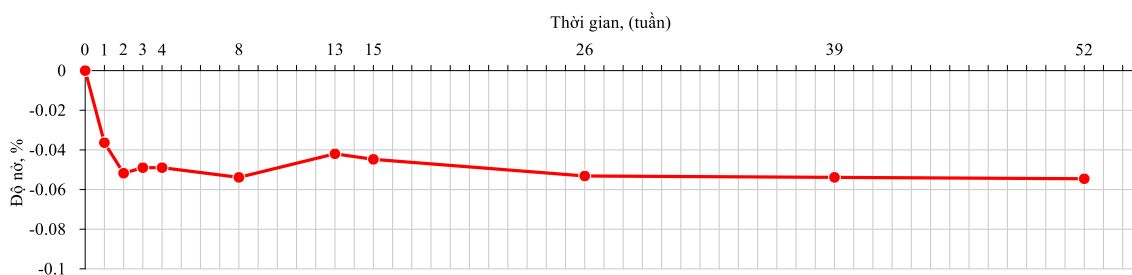
Ngoài lớp phủ bề mặt của cốt sợi, thời điểm giải phóng dự ứng lực cũng là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến khả năng dính bám giữa cốt lưới dệt và bê tông. Các nghiên cứu của Peled [10] và Hutaibat [28] cho thấy hiệu quả dính bám phụ thuộc mạnh vào mức độ phát triển cường độ của bê tông tại thời điểm nhả kích. Khi dự ứng lực được giải phóng ngay sau khi đổ bê tông, lúc này bê tông vẫn còn ở trạng thái dẻo nên bê tông có thể tái lập trạng thái liên kết mới quanh sợi, giúp duy trì hiệu quả ma sát tại bề mặt tiếp xúc. Ngược lại, nếu giải phóng dự ứng lực quá sớm (khoảng 1 ngày) khi bê tông còn non, lực co lại

của các sợi có mô đun đàn hồi cao có thể gây ra các phá hủy vi mô tại vùng tiếp xúc, dẫn đến suy giảm đáng kể ứng suất dính bám, có thể lên tới 70 % đối với sợi kevlar hoặc khoảng 47 % đối với sợi bazan. Trong khi đó, khi dự ứng lực được giải phóng muộn hơn (khoảng 7 ngày), bê tông đã phát triển đủ cường độ để chống lại hiệu ứng nở ngang và lực kéo tuột của sợi, nhờ đó hiệu quả dính bám có thể tăng khoảng 20 % so với trường hợp giải phóng ngay sau khi đổ bê tông.



Hình 11. Quan hệ cường độ dính bám – thời gian giải phóng DUL [10].

Các kết quả thực nghiệm cho thấy dự ứng lực có tác động tích cực đến ứng xử dính bám của BTCLD, nhưng hiệu quả này phụ thuộc chủ yếu vào lớp phủ cốt sợi và thời điểm nhả kích. Để đưa BTCLD dự ứng lực vào ứng dụng thực tế, các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung xác định chính xác chiều dài neo và chiều dài triển khai ứng suất cho từng loại sợi trong các điều kiện mức độ DUL khác nhau. Việc chuẩn hóa các thông số này là cơ sở quan trọng để thiết kế đầu neo và tính toán khả năng chịu lực của cấu kiện thành mỏng trong tương lai.



Hình 12. Biến dạng co ngót của bê tông hạt mịn [30].

5.1.2. Từ biến của bê tông hạt mịn

Biến dạng dài hạn trong bê tông dự ứng lực chủ yếu là biến dạng nén do tải trọng và dự ứng lực, biến dạng này tăng dần theo thời gian do hiện tượng từ biến, làm cốt dự ứng lực ngắn lại và gây tổn hao ứng suất dự ứng lực. Nghiên cứu của Tran [32] trên hai loại bê tông hạt mịn có cùng cấp phối nhưng khác công nghệ chế tạo (trộn thông thường và đùn ép) trong 360 ngày cho thấy biến dạng từ biến của bê tông đùn ép ($110,2 \times 10^{-5}$) nhỏ hơn khoảng 40 % so với loại thông thường ($176,8 \times 10^{-5}$). Trong khi đó, biến dạng co ngót của hai loại gần tương

5. Tính chất dài hạn và mất mát dự ứng lực

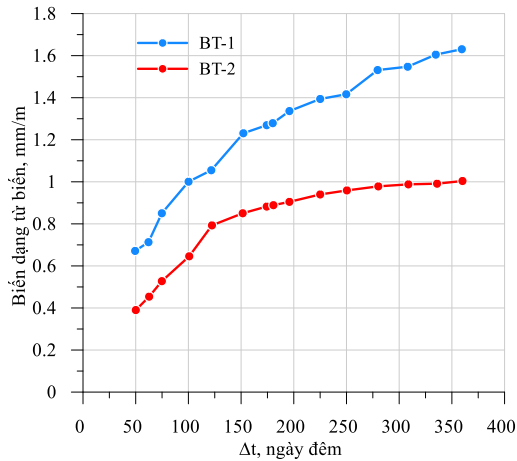
Các tính chất dài hạn là yếu tố quan trọng trong thiết kế kết cấu BTCLD dự ứng lực, bởi chúng ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng duy trì lực nén trước để chống nứt và đảm bảo độ bền cho cấu kiện trong suốt tuổi thọ công trình.

5.1. Tính chất dài hạn của bê tông hạt mịn

5.1.1. Co ngót của bê tông hạt mịn

Trong kết cấu bê tông dự ứng lực, hiện tượng co ngót của bê tông làm giảm thể tích cấu kiện và gây tổn hao ứng suất trong cáp dự ứng lực. Đối với bê tông thường, biến dạng co ngót khoảng 0,04–0,08 % [29]. Nghiên cứu của Mai [30] cho thấy bê tông hạt mịn tính năng cao sử dụng cát biển xây ra co ngót mạnh trong hai tuần đầu, sau đó gần như ổn định trong năm đầu, với giá trị cực đại dưới 0,06 %, tương đương bê tông thường. Bên cạnh đó, Brockmann [31] ghi nhận biến dạng co ngót của bê tông hạt mịn sau 365 ngày dao động khoảng 0,07–0,2 %. Hàm lượng tro bay cao có thể làm chậm thủy hóa và giảm co ngót sớm, trong khi hàm lượng chất kết dính lớn và tỷ lệ nước/chất kết dính thấp làm tăng co ngót hóa học và co ngót khô. Ngoài ra, việc không có cốt liệu lớn khiến bê tông hạt mịn có khả năng hạn chế co ngót kém hơn so với bê tông thường. Do đó, hiện tượng co ngót cần được xem xét cẩn thận trong thiết kế cấu kiện mỏng và cấu kiện dự ứng lực để hạn chế nứt và tổn hao ứng suất.

đương, nằm trong khoảng 0,0495–0,057 %. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng tốc độ phát triển từ biến lớn hơn hai lần so với co ngót. Ngoài ra, Brockmann [31] cho thấy từ biến của bê tông hạt mịn có thể coi tuyến tính đến khoảng 0,65 ƒ_c, cao hơn giới hạn khoảng 0,40 ƒ_c thường gặp ở bê tông thường. Do hàm lượng chất kết dính cao và lượng hồ xi măng lớn, bê tông hạt mịn có thể xuất hiện biến dạng từ biến lớn hơn đáng kể, vì vậy khi thiết kế cấu kiện bê tông cốt lưới dệt dự ứng lực cần tính toán cẩn thận để hạn chế tổn thất ứng suất và biến dạng dài hạn quá lớn.



Hình 13. Biến dạng từ biến của bê tông hạt mịn [32].

5.2. Tính chất dài hạn của cốt lưới dệt dệt ứng lực

5.2.1. Từ biến cốt lưới dệt

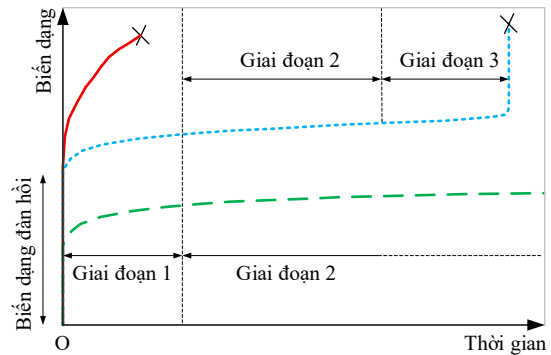
Vật liệu polyme cốt sợi (FRP), đặc biệt là cốt lưới dệt sợi các bon (CFRP), ngày càng được sử dụng rộng rãi trong xây dựng nhờ cường độ cao, khả năng chống ăn mòn tốt và độ bền lâu dài. Tuy nhiên, trong các cấu kiện dự ứng lực, một yếu tố quan trọng cần xem xét là phá hoại do từ biến dưới tải trọng duy trì [33, 34]. Từ biến là hiện tượng biến dạng tăng dần theo thời gian dưới ứng suất duy trì trong điều kiện môi trường bình thường [34], làm ảnh hưởng đáng kể đến độ bền lâu dài của cấu kiện. Vật liệu FRP được tạo thành từ các sợi (các bon, thủy tinh, aramid...) kết hợp với nhựa nền. Do nhựa nền là vật liệu nhạy với các hiện tượng nhớt, FRP cũng thể hiện tính nhớt và vì vậy dễ xảy ra từ biến dưới tải trọng lâu dài [33, 34]. Theo Rossini [33], khi FRP chịu tải trọng dọc trục, cả sợi và nhựa nền cùng tham gia chịu lực. Tuy nhiên, dưới tải trọng duy trì, các hư hỏng và vết nứt vi mô trong nhựa nền dần phát triển, làm tải trọng chuyển dần từ nhựa sang sợi, quá trình này tiếp tục cho đến khi sợi bị đứt gãy.



Hình 14. Phá hoại sợi các bon trong thí nghiệm xác định giới hạn từ biến [35].

Quá trình từ biến của FRP thường gồm ba giai đoạn: sơ cấp, thứ cấp và cuối cùng. Giai đoạn sơ cấp diễn ra ngay sau khi chịu tải với tốc

độ biến dạng giảm dần; ở CFRP giai đoạn này thường nhỏ do mô đun đàn hồi và tỷ lệ thể tích sợi cao [34]. Giai đoạn thứ cấp có tốc độ biến dạng gần như không đổi và chiếm phần lớn thời gian khai thác của kết cấu. Nếu mức ứng suất đủ thấp, vật liệu có thể làm việc lâu dài trong giai đoạn này. Giai đoạn cuối xảy ra khi ứng suất lớn, tốc độ biến dạng tăng nhanh và dẫn đến phá hủy sợi [34, 36].



Hình 15. Các giai đoạn từ biến của FRP [33, 36].

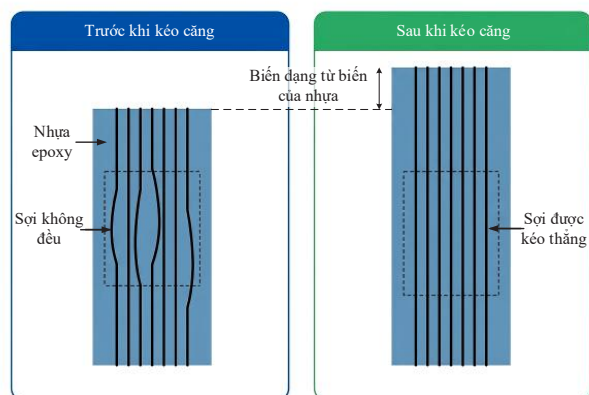
Các nghiên cứu cho thấy CFRP có khả năng kháng từ biến tốt nhất trong các loại FRP phổ biến [37]. Cường độ phá hoại do từ biến thường được xác định bằng cách ngoại suy dữ liệu thử nghiệm dài hạn (tới 1 triệu giờ) [35]. Một số kết quả nghiên cứu cho thấy giới hạn phá hoại do từ biến của CFRP dạng thanh khá cao: khoảng 93 % cường độ kéo đứt trong nghiên cứu của Yamaguchi [38], 88 % theo ngoại suy của Grace [37], và 77 % cho tuổi thọ 100 năm theo Dolan [36]. Đối với lưới CFRP, Phoeuk [35] cho thấy các mẫu chịu 92 % cường độ kéo đứt vẫn không bị phá hoại sau hơn 10000 giờ, với biến dạng từ biến chỉ 1–4 % biến dạng ban đầu và giới hạn phá hoại do từ biến của lưới CFRP nằm khoảng 94–98 % cường độ kéo đứt của sợi. Thí nghiệm trên các tấm CFRP mỏng của Ascione [34] cũng cho thấy khi chịu ứng suất duy trì bằng 75 % cường độ kéo đứt, biến dạng từ biến chỉ khoảng 1,93 % so với biến dạng đàn hồi ban đầu sau hơn 76 ngày (khoảng 1800 giờ).

Mặc dù vậy, các tiêu chuẩn thiết kế quốc tế vẫn đưa ra các giới hạn ứng suất thận trọng nhằm đảm bảo độ tin cậy lâu dài. Theo ACI 440.4R-04 [39], ứng suất tại đầu kích và sau truyền lực đối với CFRP được khuyến nghị lần lượt là 65% và 60% cường độ kéo đứt sợi. Ngoài ra, nhiều tiêu chuẩn sử dụng hệ số chiết giảm do phá hoại từ biến (C_c) để xác định cường độ kéo thiết kế của FRP.

Bảng 1. Hệ số chiết giảm do phá hoại từ biến.

Tiêu chuẩn/chỉ dẫn	Năm	Hệ số C_c (CFRP)
ACI 440.1R [40]	2015	0,55
AASHTO [41]	2018	0,65
JSCE CES23 [42]	1997	0,70
CSA S806 [43]	2012	0,65
CNR DT203 [44]	2007	0,90

Các nghiên cứu gần đây cũng đề xuất nhiều giải pháp giảm ảnh hưởng từ biến, như sử dụng FRP lai (aramid-thủy tinh) để giảm biến dạng từ biến [45], bổ sung vật liệu nano vào nhựa epoxy giúp giảm tới 30 % biến dạng từ biến [46], hoặc kéo trước có kiểm soát để làm thẳng sợi và ổn định cấu trúc vật liệu trước khi sử dụng [47].



Hình 16. Cơ chế kéo trước có kiểm soát để làm thẳng sợi [47].

Các kết quả thực nghiệm cho thấy lưới CFRP có khả năng kháng từ biến rất tốt. Tuy nhiên, do các quy định thiết kế hiện hành còn khá thận trọng nên hiệu quả khai thác vật liệu chưa được tận dụng tối đa. Vì vậy, cần nghiên cứu thực nghiệm bổ sung đối với từng loại lưới CFRP cụ thể nhằm đề xuất mức ứng suất dự ứng lực hợp lý hơn, vừa nâng cao hiệu quả sử dụng vừa đảm bảo độ an toàn và độ bền lâu dài của kết cấu.

5.2.2. Chùng cốt lưới dệt

Chùng ứng suất của cốt FRP dự ứng lực là hiện tượng giảm dần ứng suất theo thời gian khi vật liệu được duy trì ở trạng thái biến dạng không đổi [48-50]. Đây là một yếu tố quan trọng trong thiết kế vì nó gây tổn hao lực dự ứng lực dài hạn, ảnh hưởng trực tiếp đến độ võng và khả năng chống chế nứt của cấu kiện [51, 52].

Cơ chế chùng ứng suất trong cốt FRP dự ứng lực khá phức tạp và chủ yếu xuất phát từ ba nguồn chính [39]. Thứ nhất, nhựa nền có tính đàn hồi nhớt, ban đầu tham gia chịu tải nhưng theo thời gian tải trọng dần chuyển sang sợi, làm ứng suất tổng thể giảm. Hiện tượng này thường xảy ra mạnh nhất trong 24-96 giờ đầu sau khi căng dự ứng lực [52, 53]. Thứ hai, trong quá trình sản xuất, các sợi cơ bản không hoàn toàn song song, khi chịu lực kéo lớn chúng có xu hướng tự duỗi thẳng trong nhựa nền, gây tổn thất ứng suất [52, 53]. Đồng thời, sự phân bố ứng suất không đều trong bó sợi có thể dẫn đến đứt gãy cục bộ một số sợi yếu trong giai đoạn đầu [53]. Thứ ba, bản thân sợi cũng có hiện tượng chùng, mức độ phụ thuộc vào loại sợi. Sợi các bon có độ chùng rất nhỏ, trong khi sợi aramid có độ chùng lớn do đặc tính nhớt đàn hồi

của cấu trúc phân tử, sợi thủy tinh và bazan có mức chùng trung bình [52-54].

Ngoài bản chất vật liệu, mức ứng suất ban đầu và điều kiện môi trường cũng ảnh hưởng mạnh đến hiện tượng chùng. Tỷ lệ chùng thường tăng khi ứng suất ban đầu tăng, do sự hình thành các vết nứt vi mô trong nhựa nền và tại bề mặt tiếp xúc sợi-nhựa [51, 52]. Nhiệt độ cao được xem là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất vì làm mềm nhựa nền và suy yếu liên kết sợi-nhựa, từ đó làm tăng tốc độ chùng [51]. Bên cạnh đó, môi trường axit và kiềm cũng có thể đẩy nhanh quá trình suy giảm tính chất vật liệu, với mức độ ảnh hưởng theo thứ tự axit > kiềm > nước.

Nhìn chung, mặc dù cốt CFRP thể hiện khả năng kháng chùng tốt hơn so với các loại FRP khác, hiện tượng chùng ứng suất vẫn là một nguồn tổn hao dự ứng lực dài hạn quan trọng. Do đó, việc xem xét đầy đủ ảnh hưởng của chùng ứng suất trong tính toán là cần thiết để dự báo chính xác tổn hao dự ứng lực và đảm bảo độ tin cậy lâu dài của kết cấu.

5.3. Mất mát dự ứng lực

Tổng mất mát dự ứng lực trong cấu kiện BTCLD bao gồm mất mát tức thời và mất mát dài hạn, chịu ảnh hưởng đồng thời bởi đặc tính của cốt FRP và bê tông [48, 52]. Mất mát tức thời chủ yếu xảy ra do co ngấn đàn hồi của bê tông khi truyền lực dự ứng, làm giảm ứng suất trong cốt. Mức độ mất mát này phụ thuộc vào mô đun đàn hồi của cả cốt dự ứng lực và bê tông. Do FRP có mô đun đàn hồi thấp hơn thép, nên với cùng một mức biến dạng đàn hồi của bê tông, sự sụt giảm ứng suất trong cốt FRP thường nhỏ hơn so với cốt thép dự ứng lực truyền thống [48, 54, 55]. Tuy nhiên, trong kết cấu BTCLD, bê tông hạt mịn thường có mô đun đàn hồi thấp hơn khoảng 20-25 % so với bê tông thông thường có cùng cường độ [29, 30], dẫn đến biến dạng đàn hồi lớn hơn khi truyền lực và có thể làm tăng tổn hao do co ngấn đàn hồi của bê tông.

Mất mát dài hạn chủ yếu bao gồm ảnh hưởng của co ngót và từ biến của bê tông cùng với hiện tượng chùng ứng suất của cốt sợi. Co ngót và từ biến làm cấu kiện ngắn dần theo thời gian, khiến lực căng trong cốt giảm dần, do đó độ chùng thực tế trong cấu kiện thường nhỏ hơn giá trị chùng xác định trong thí nghiệm khi biến dạng được giữ không đổi [48, 54]. Bên cạnh đó, chùng ứng suất của cốt sợi cũng góp phần vào tổn hao dự ứng lực dài hạn. Đối với cốt CFRP, khả năng kháng chùng tương đối tốt nên mức tổn hao ứng suất do chùng thường nhỏ. Ngược lại, đối với các loại sợi có độ chùng lớn như sợi aramid, tổn hao ứng suất do chùng có thể đáng kể, dẫn đến tổng mất mát dự ứng lực dài hạn ở mức cao [55].

Nhìn chung, mức mất mát dự ứng lực trong kết cấu BTCLD phụ thuộc vào sự tương tác giữa các đặc tính cơ học của cốt FRP và bê tông, trong đó mô đun đàn hồi của bê tông hạt mịn, co ngót-từ biến bê tông và chùng của cốt sợi là các yếu tố chi phối chủ yếu. Việc xem xét đồng thời các cơ chế mất mát trong tính toán là cần thiết để dự báo chính xác lực dự ứng lực còn lại và đảm bảo độ bền lâu dài của kết cấu.

Bảng 2. Mức độ chùng ứng suất của các loại sợi FRP.

Loại sợi FRP	Sau 1.000 giờ (%)	Dự báo sau 50 năm (%)	Dự báo sau 1 triệu giờ (~114 năm) (%)
Các bon	<1,0 % [52, 54]	2,0–10,0 % [52]	3,0–6,3 % [51, 54]
Thủy tinh	1,8–2,0 % [52]	4,0–14,0 % [52]	---
Bazan	4,2–6,7 % [49, 51]	---	6,2 % [51]
Aramid	5,0–8,0 % [52]	11,0–25,0 % [52]	11,5–12,5 % [51, 54]

6. Ứng dụng ván khuôn BTCLD trong kết cấu sàn liên hợp

6.1. Ván khuôn vĩnh cửu

Ván khuôn vĩnh cửu là các cấu kiện được chế tạo sẵn, đóng vai trò làm khuôn đúc trong quá trình đổ bê tông và được giữ lại như một bộ phận kết cấu trong suốt vòng đời công trình [56, 57]. So với ván khuôn truyền thống, giải pháp này giúp giảm chi phí và thời gian thi công do không cần tháo dỡ sau khi bê tông đông cứng, đồng thời có thể tham gia chịu lực cùng cấu kiện. Theo chức năng làm việc, ván khuôn vĩnh cửu được chia thành hai loại chính: loại tham gia chịu lực, làm việc đồng thời với bê tông đổ tại chỗ để góp phần vào khả năng chịu tải của cấu kiện và loại không tham gia chịu lực, chỉ đóng vai trò chịu tải tạm thời trong giai đoạn thi công [58, 59].

Nhiều loại vật liệu đã được sử dụng để chế tạo ván khuôn vĩnh cửu như gỗ, thép và các vật liệu composite [60]. Tuy nhiên, gỗ có độ bền thấp và dễ bị mối mọt; thép có cường độ cao nhưng dễ ăn mòn và có trọng lượng lớn; trong khi polyme cốt sợi tuy có tỷ lệ cường độ trên trọng lượng cao và khả năng chống ăn mòn tốt nhưng chi phí lớn và khả năng chịu lửa hạn chế. Trong bối cảnh đó, bê tông cốt lưới dệt được xem là một vật liệu tiềm năng nhờ sử dụng cốt sợi không bị ăn mòn, khả năng chịu lực cao, cho phép chế tạo các tấm mỏng nhẹ với hình dạng linh hoạt và bề mặt hoàn thiện tốt [3, 56-62].

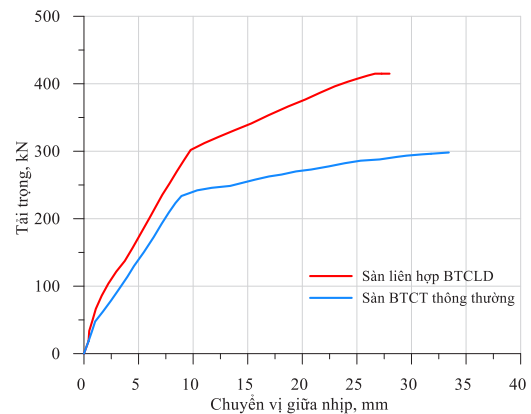


Hình 17. Tấm ván khuôn BTCLD [61].

6.2. Hiệu quả của sàn liên hợp sử dụng ván khuôn BTCLD

Các nghiên cứu cho thấy việc sử dụng ván khuôn BTCLD giúp tăng đáng kể khả năng chịu uốn của cấu kiện so với sàn bê tông cốt thép (BTCT) truyền thống. Các nghiên cứu của Papantoniou [58] và Kim [5] chỉ ra khả năng chịu tải của sàn liên hợp BTCLD tăng từ 70 %

đến 145 % so với mẫu sàn BTCT thông thường. Papanicolaou [56] còn ghi nhận cường độ chịu uốn cực hạn có thể đạt gấp 1,3 đến 1,8 lần. Martins và cộng sự [63] cho thấy rằng việc sử dụng mặt cắt dạng hình thang giúp tăng cánh tay đòn nội lực giữa vùng nén và lớp cốt lưới dệt, qua đó cải thiện đáng kể khả năng chịu uốn của cấu kiện. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng khi tăng số lớp lưới dệt từ 2 lớp lên 4 lớp, khả năng chịu tải của cấu kiện có thể tăng tới 302,3 %. Bên cạnh đó, độ cứng của cấu kiện cũng được nâng cao, nghiên cứu của Kim cho thấy trước khi phá hoại, độ cứng của sàn BTCT thông thường chỉ bằng khoảng 37 % so với hệ sàn liên hợp có ván khuôn BTCLD [5], điều này giúp giảm độ võng của cấu kiện lên đến 30 % [56].



Hình 18. Quan hệ tải trọng-chuyển vị của các loại sàn [5].

Ván khuôn BTCLD không chỉ làm tăng khả năng chịu lực mà còn giúp bảo vệ kết cấu. Nguyen [3] và Kim [5] quan sát thấy ván khuôn BTCLD giúp tăng tải trọng gây nứt ban đầu lên ít nhất 175 %, đồng thời làm chậm đáng kể sự phát triển của các vết nứt vào lớp bê tông đổ tại chỗ. Thay vì xuất hiện ít vết nứt lớn gây nguy hiểm, hệ sàn liên hợp tạo ra nhiều vết nứt mịn với bề rộng nhỏ hơn 0,2 mm. Brameshuber [61] ghi nhận khoảng cách giữa các vết nứt rất nhỏ, giúp bảo vệ cốt thép bên trong tốt hơn trước tác động của môi trường.

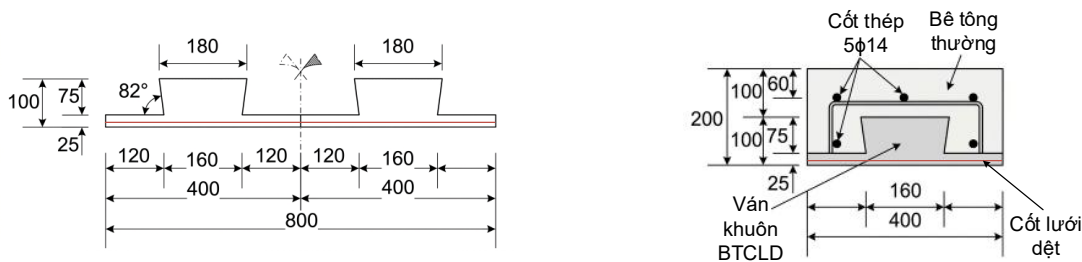
Bên cạnh đó, tương tác tại mặt tiếp xúc giữa lớp BTCLD và bê tông đổ sau là một yếu tố quan trọng quyết định hiệu quả làm việc liên hợp của hệ kết cấu. Các thí nghiệm uốn trên dầm và sàn liên hợp cho thấy sự truyền lực cắt giữa hai lớp vật liệu diễn ra rất hiệu quả, với độ trượt tại mặt tiếp xúc rất nhỏ và hầu như không quan sát thấy hiện tượng bong tách trong suốt quá trình thí nghiệm [56, 58]. Điều này cho thấy lớp BTCLD có thể liên kết tốt với bê tông đổ sau nhờ sự kết hợp giữa liên kết hóa học, ma sát bề mặt và liên kết cơ học. Quan sát thực nghiệm cho thấy

các vết nứt xuất hiện trong lớp BTCLD có xu hướng lan truyền liên tục sang lớp bê tông phía trên mà không gây tách lớp, cho thấy hai lớp vật liệu có thể làm việc như một hệ kết cấu thống nhất [3].

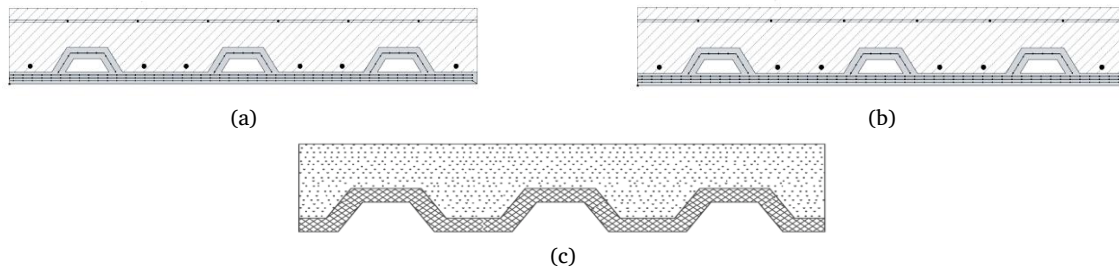
Ngoài các yếu tố vật liệu, hình dạng mặt cắt của tấm ván khuôn BTCLD cũng có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu lực và hiệu quả làm việc liên hợp của cấu kiện. Nhờ khả năng tạo hình tốt của vật liệu BTCLD, nhiều dạng mặt cắt khác nhau đã được đề xuất nhằm tăng cường liên kết cơ học với lớp bê tông phía trên, chẳng hạn như các mặt cắt dạng chữ U, dạng sườn nghiêng, dạng rỗng hoặc dạng hình thang [3, 58, 61, 63]. Các hình dạng này giúp cải thiện khả năng truyền lực cắt giữa hai lớp vật liệu, giảm trọng lượng bản thân của tấm ván khuôn, đồng thời tăng cánh tay đòn nội lực giữa vùng nén và vùng kéo, từ đó nâng cao khả năng chịu lực của cấu kiện.

Các kết quả nghiên cứu cho thấy hệ ván khuôn vĩnh cửu bằng BTCLD là một giải pháp kết cấu có nhiều tiềm năng, đặc biệt đối với các hệ sàn yêu cầu trọng lượng nhẹ, khả năng chịu lực cao và độ bền

lâu dài. Khi được thiết kế hợp lý, tấm BTCLD có thể thay thế ván khuôn truyền thống trong giai đoạn thi công, đồng thời hoạt động như một thành phần chịu lực hiệu quả và một lớp bảo vệ chống ăn mòn cho kết cấu. Tuy nhiên, một hạn chế chung của các hệ ván khuôn BTCLD là không thể tránh khỏi sự hình thành vết nứt trong giai đoạn thi công và khai thác, điều này có thể làm giảm độ cứng, khả năng chịu lực cũng như làm tăng biến dạng của cấu kiện. Một hướng tiếp cận tiềm năng để khắc phục vấn đề này là ứng dụng dự ứng lực cho lớp BTCLD, nhằm tạo trạng thái nén ban đầu trong vùng kéo và trì hoãn sự xuất hiện của các vết nứt. Mặc dù vậy, cho đến nay các nghiên cứu về kết cấu sàn liên hợp sử dụng ván khuôn BTCLD dự ứng lực vẫn còn rất hạn chế, đặc biệt là các nghiên cứu về ứng xử chịu uốn và cơ chế làm việc liên hợp của hệ cấu kiện này. Do đó, việc nghiên cứu hệ sàn liên hợp BTCLD dự ứng lực là cần thiết nhằm khai thác tối đa tiềm năng của vật liệu và phát triển các giải pháp kết cấu mới hiệu quả hơn.



Hình 19. Ván khuôn BTCLD và sàn liên hợp [3].



Hình 20. Một số dạng mặt cắt sàn liên hợp BTCLD [58, 63].

7. Kết luận và hướng nghiên cứu

7.1. Kết luận

Tổng hợp các nghiên cứu cho thấy bê tông cốt lưới dẹt dự ứng lực là vật liệu composite có tiềm năng lớn cho các kết cấu mỏng và nhẹ. Việc áp dụng dự ứng lực giúp trì hoãn sự hình thành vết nứt của bê tông hạt mịn, khai thác hiệu quả khả năng chịu kéo của cốt lưới sợi và cải thiện đáng kể độ cứng cũng như khả năng chịu lực của cấu kiện. Khi được sử dụng làm ván khuôn vĩnh cửu cho sàn liên hợp, lớp BTCLD không chỉ đóng vai trò ván khuôn trong giai đoạn thi công mà còn tham gia chịu lực hiệu quả, giúp tăng đáng kể tải trọng gây nứt và cải thiện hiệu quả làm việc liên hợp với lớp bê tông đổ tại chỗ. Tuy nhiên, hiệu quả truyền lực dự ứng lực và khả năng làm việc tổng thể của cấu kiện

phụ thuộc đáng kể vào đặc tính dính bám giữa cốt sợi và bê tông, công nghệ neo, cũng như thời điểm giải phóng dự ứng lực. Bên cạnh đó, các vấn đề liên quan đến ứng xử dài hạn và sự suy giảm ứng suất theo thời gian vẫn chưa được đánh giá đầy đủ ở cấp độ cấu kiện và hệ kết cấu.

7.2. Hướng nghiên cứu

Mặc dù có nhiều ưu điểm, việc ứng dụng BTCLD dự ứng lực vẫn còn một số thách thức như phát triển hệ thống neo phù hợp cho lưới sợi, kiểm soát mất mát dự ứng lực do co ngót-từ biến bê tông và chùng ứng suất của cốt sợi, cũng như thiếu các hướng dẫn thiết kế cho cấu kiện BTCLD dự ứng lực. Do đó, các nghiên cứu trong tương lai cần tập trung vào việc hoàn thiện giải pháp neo và công nghệ tạo dự ứng lực,

đánh giá ứng xử dài hạn của vật liệu và tối ưu hóa cấu hình mặt cắt của hệ sàn liên hợp BTCLD dự ứng lực, đồng thời xây dựng các mô hình tính toán và cơ sở thực nghiệm phục vụ cho việc hình thành các tiêu chuẩn thiết kế trong tương lai.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2026-PHII_CT-003.

Tài liệu tham khảo

- [1]. M. Scheurer *et al.*, "Current and Future Trends in Textiles for Concrete Construction Applications," *Textiles*, vol. 3, pp. 408-437, 10/17 2023.
- [2]. J. Hegger, N. Will, and K. Rüberg, "Textile Reinforced Concrete — A new Composite Material," in *Advances in Construction Materials 2007*, Berlin, Heidelberg, 2007, pp. 147-156: Springer Berlin Heidelberg.
- [3]. H.-C. Nguyen and T.-T.-T. Pham, "Flexural and Shear Behavior of Hybrid Deck Structures Composed of Textile Reinforced Concrete Integrated Formwork and Reinforced Concrete," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 21, no. 6, 2024.
- [4]. C. G. Papanicolaou and I. C. Papantoniou, "Mechanical Behavior of Textile Reinforced Concrete (TRC) / Concrete Composite Elements," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 35-47, 2010.
- [5]. H.-Y. Kim *et al.*, "Load-deflection behaviour of concrete slab-type elements casted on stay-in-place TRC formwork," *Composite Structures*, vol. 244, 2020.
- [6]. N. Portal, "Usability of Textile Reinforced Concrete: Structural Performance, Durability and Sustainability," 2015.
- [7]. J. Hegger, N. Will, O. Bruckermann, and S. Voss, "Loadbearing behavior and simulation of textile reinforced concrete," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 39, pp. 765-776, 10/01 2006.
- [8]. H. Reinhardt, M. Krüger, and C. Grosse, "Concrete Prestressed with Textile Fabric," *Journal of Advanced Concrete Technology - J ADV CONCR TECHNOL*, vol. 1, pp. 231-239, 11/01 2003.
- [9]. H. W. Reinhardt and M. Krueger, "Prestressed concrete plates with high strength fabric," presented at the 6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes, Varenna, Italy, 2004.
- [10]. A. Peled, "Pre-tensioning of fabrics in cement-based composites," *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 5, pp. 805-813, 2007/05/01/ 2007.
- [11]. S. Gopinath, R. Gettu, and N. Iyer, "Influence of prestressing the textile on the tensile behaviour of textile reinforced concrete," *Materials and Structures*, vol. 51, 06/08 2018.
- [12]. C. Meyer and G. Vilkner, "Glass concrete thin sheets prestressed with aramid fiber mesh," 01/01 2003.
- [13]. M. Hutaibat, B. Ghiassi, and W. Tizani, "Flexural behaviour of concrete thin sheets prestressed with basalt-textile reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 404, p. 133213, 2023/11/10/ 2023.
- [14]. Q. Ngo and H.-C. Nguyen, "Experimental and Numerical Investigations on Flexural Behaviour of Prestressed Textile Reinforced Concrete Slabs," *Civil Engineering Journal*, vol. 7, pp. 1084-1097, 06/02 2021.
- [15]. Y. Du, M. Zhang, F. Zhou, and D. Zhu, "Experimental study on basalt textile reinforced concrete under uniaxial tensile loading," *Construction and Building Materials*, vol. 138, pp. 88-100, 2017/05/01/ 2017.
- [16]. J. P. Osman Letelier, A. Hueckler, and M. Schlaich, *Application of Prestressed CFRP Textiles for the Development of Thin-Walled Concrete Structural Elements*. 2019, pp. 102-109.
- [17]. K. Zdanowicz and S. Marx, *Chemical prestress of concrete with carbon textile reinforcement: Theoretical and analytical approaches*. 2019.
- [18]. M. K. Dhahir, S. Marx, and K. Zdanowicz, "Chemical prestressing of concrete structures; state of the art review," *Structural Concrete*, vol. 25, no. 2, pp. 1450-1464, 2024.
- [19]. M. Wyrzykowski, G. Terrasi, and P. Lura, "Chemical prestressing of high-performance concrete reinforced with CFRP tendons," *Composite Structures*, vol. 239, p. 112031, 2020/05/01/ 2020.
- [20]. M. K. Dhahir, T. Neef, V. Mechtcherine, and S. Marx, "Chemical prestressing of concrete thin plates reinforced with mineral-impregnated carbon fibre (MCF) composites," *Engineering Structures*, vol. 317, p. 118651, 2024/10/15/ 2024.
- [21]. M. K. Dhahir and S. Marx, "Stress development and deformation characteristics of chemically prestressed high-strength concrete plates reinforced with different ratios of carbon textile reinforcement," *Engineering Structures*, vol. 337, p. 120500, 2025/08/15/ 2025.
- [22]. M. K. Dhahir and S. Marx, "Long-term stability and tensile behaviour of chemically-prestressed high-strength concrete plates reinforced with carbon textile reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 463, p. 140040, 2025/02/14/ 2025.
- [23]. C. Kulas, "Actual applications and potential of textile-reinforced concrete," in *Proceedings of the 17th International Congress of the GRCA*, Dubai, United Arab Emirates, 2015, pp. 1-11.
- [24]. S. Ohno and D. J. Hannant, "Modelling the Stress-Strain Response of Continuous Fibre Reinforced Cement Composites," *ACI Materials Journal*, vol. 91, pp. 306-312, 1994.
- [25]. B. Banholzer, "Bond behaviour of a multi-filament yarn embedded in a cementitious matrix," Ph.D. Thesis, RWTH Aachen University, Germany, 2004.
- [26]. J. Hegger, M. Schneider, and C. Kulas, *Dimensioning of TRC with Application to Ventilated Facade Systems*. 2010.
- [27]. M. Krüger, Reinhardt, and Fichtlscherer, "Bond behaviour of textile reinforcement in reinforced and prestressed concrete," *Otto-Graf-Journal*, vol. 2001, pp. 33-50, 01/01 2001.
- [28]. M. Hutaibat, B. Ghiassi, and W. Tizani, "Bond behaviour of prestressed basalt textile reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 438, p. 137309, 2024/08/09/ 2024.
- [29]. M. C. Lê, "Nghiên cứu chế tạo và xác định các đặc tính cơ học và độ bền của bê tông hạt mịn tính năng cao cốt lưới dệt ứng dụng trong công trình cầu," Báo cáo tổng kết đề tài khoa học và công nghệ cấp Bộ, Hà Nội, Việt Nam, 2017.
- [30]. Đ. L. Mai, "Nghiên cứu chế tạo bê tông hạt mịn tính năng cao có sử dụng cát biển ứng dụng trong các công trình hạ tầng, dân dụng, công nghiệp ở vùng ven biển," Báo cáo tổng kết đề tài khoa học và công nghệ cấp Bộ, Hà Nội, Việt Nam, 01/2023.
- [31]. T. Brockmann, "Mechanical and Fracture Mechanical Properties of Fine Grained Concrete for TRC Structures," 2007, pp. 119-129.
- [32]. M. Đ. Trần, "Từ biến của bê tông hạt mịn," *Tạp chí Xây dựng & Vật liệu (IBST)*, 2011.
- [33]. M. Rossini, E. Saqan, and A. Nanni, "Prediction of the creep rupture strength of GFRP bars," *Construction and Building Materials*, vol. 227, p. 116620, 2019/12/10/ 2019.
- [34]. F. Ascione, V. P. Berardi, L. Feo, and A. Giordano, "An experimental study on the long-term behavior of CFRP pultruded laminates suitable to concrete structures rehabilitation," *Composites Part B: Engineering*, vol. 39, no. 7, pp. 1147-1150, 2008/10/01/ 2008.

- [35]. M. Phoeuk, D.-Y. Choi, and M. Kwon, "Long-Term Creep Rupture of Carbon Fiber Reinforced Polymer Grids Under High Stress Levels: Experimental Investigation," *Materials*, vol. 18, no. 1, p. 35. doi: 10.3390/ma18010035
- [36]. C. W. Dolan, H. R. Hamilton, C. E. Bakis, and A. Nanni, "Design recommendations for concrete structures prestressed with frp tendons. volume 1," 2001.
- [37]. N. F. Grace, M. E. Mohamed, and M. R. Bebawy, "Evaluating fatigue, relaxation, and creep rupture of carbon-fiber-reinforced polymer strands for highway bridge construction," *PCI Journal*, vol. 68, no. 3, pp. 36-61, 2023.
- [38]. T. Yamaguchi, T. Nishimura, T. J. S. E. Uomoto, P. Construction: Tradition, and Future., "Creep rupture of FRP rods made of aramid, carbon and glass fibers," vol. 2, pp. 1331-1336, 1998.
- [39]. A. C. I. Committee, "ACI 440.4-04: Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI9780870311666, 2004.
- [40]. A. C. I. Committee, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI0870311182, 2015.
- [41]. H. American Association of State and O. Transportation, "Guide Specifications for the Design of Concrete Bridge Beams Prestressed with CFRP Systems," American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC9781560517160, 2018.
- [42]. E. Japan Society of Civil, "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials," Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan1997.
- [43]. *Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers*, CSA S806-12, 2012.
- [44]. C. National Research, "Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars," in "CNR-DT 203/2006," National Research Council, Rome, Italy2007.
- [45]. R. D. Maksimov and E. Plume, "Long-Term Creep of Hybrid Aramid/Glass-Fiber-Reinforced Plastics," *Mechanics of Composite Materials*, vol. 37, no. 4, pp. 271-280, 2001/07/01 2001.
- [46]. P. Santos, A. P. Silva, and P. N. B. Reis, "Effect of Carbon Nanofibers on the Viscoelastic Response of Epoxy Resins," *Polymers*, vol. 15, no. 4, p. 821. doi: 10.3390/polym15040821
- [47]. X. Wang, J. Shi, Z. Wu, and Z. Zhu, "Creep strain control by pretension for basalt fiber-reinforced polymer tendon in civil applications," *Materials & Design*, vol. 89, pp. 1270-1277, 2016/01/05/ 2016.
- [48]. S. A. Youakim and V. M. Karbhari, "An approach to determine long-term behavior of concrete members prestressed with FRP tendons," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 5, pp. 1052-1060, 2007/05/01/ 2007.
- [49]. M. Atutis, J. Valivonis, and E. Atutis, "Experimental study of concrete beams prestressed with basalt fiber reinforced polymers. Part II: Stress relaxation phenomenon," *Composite Structures*, vol. 202, pp. 344-354, 2018/10/15/ 2018.
- [50]. P. Kumar, H. S. Gupta, and T. K. Maiti, "Stress relaxation behavior of polymer composites," in *Dynamic Mechanical and Creep-Recovery Behavior of Polymer-Based Composites*, A. Verma, N. Jain, S. Mavinkere Rangappa, S. Siengchin, and D. Matykiewicz, Eds.: Elsevier, 2024, pp. 167-188.
- [51]. X. He, S. B. A. Limon, G. Li, Y. Zhou, G. He, and A. C. Amenuvor, "Dependence of stress relaxation behavior of prestressed GFRP bar anchor structures on environmental pH and temperature," *Journal of Building Engineering*, vol. 111, p. 113312, 2025/10/01/ 2025.
- [52]. M. Przygocka and R. Kotynia, "Pre-Stress Losses in FRP Pre-Stressed Reinforced Concrete – Subject Overview," *Archives of Civil Engineering*, vol. 64, pp. 257-268, 12/01 2018.
- [53]. A. Oskoue and S. Taleie, "Experimental Investigation of Relaxation of Fiber-reinforced Polymer Composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 29, pp. 2705-2718, 09/03 2010.
- [54]. P. Zou, "Long-Term Properties and Transfer Length of Fiber-Reinforced Polymers," *Journal of Composites for Construction - J COMPOS CONSTR*, vol. 7, 02/01 2003.
- [55]. T. Lou, Y. Wu, and S. M. R. Lopes, "Long-term behavior of prestressed concrete members with FRP/steel tendons," in *Prestressed Members with External Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Tendons*, T. Lou, Y. Wu, and S. M. R. Lopes, Eds.: Woodhead Publishing, 2025, pp. 305-328.
- [56]. C. Papanicolaou and I. Papantoniou, "Mechanical Behavior of Textile Reinforced Concrete (TRC) / Concrete Composite Elements," *Journal of Advanced Concrete Technology - J ADV CONCR TECHNOL*, vol. 8, pp. 35-47, 02/01 2010.
- [57]. Z. Hashim Abbas, M. Hassan, and I. Gorgis, "Stay in Place Formwork, Encased Reinforced Concrete Column: A Review," *Engineering and Technology Journal*, pp. 1-24, 10/06 2023.
- [58]. I. C. Papantoniou and C. Papanicolaou, "Flexural behavior of one-way Textile Reinforced Concrete (TRC) / Reinforced Concrete (RC) composite slabs," *ECCM 2012 - Composites at Venice, Proceedings of the 15th European Conference on Composite Materials*, 01/01 2012.
- [59]. C. G. Papanicolaou and I. C. Papantoniou, "Optimum design of textile-reinforced concrete as integrated formwork in slabs," in *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*, T. Triantafyllou, Ed.: Woodhead Publishing, 2016, pp. 245-274.
- [60]. I. C. Papantoniou and C. G. Papanicolaou, "Textile Reinforced Concrete (TRC) for precast Stay-in-Place formwork elements," in *Tailor Made Concrete Structures*, Walraven and Stoelhorst, Eds. London, UK: Taylor & Francis Group, 2008.
- [61]. M. K. J. H. S. V. T. G. M. B. H.-W. R. Wolfgang Brameshuber and K. Markus, "Textile Reinforced Concrete (TRC) For Integrated Formworks," *ACI Symposium Publication*, vol. 224, 12/1/2004 2004.
- [62]. S. U. N. Shu, C. Peng, and W. Hong, "Study on the Mechanical of TRC permanent formwork's cement-based materials," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 189, p. 032038, 11/06 2018.
- [63]. M. Martins, G. Alencar, and R. Lameiras, *Permanent formwork of textile reinforced concrete (TRC) for composite concrete slabs*. 2023.