



STRENGTHENING OF SHEAR CAPACITY OF BRIDGE STEEL GIRDER BY USING ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE: TECHNICAL SOLUTION AND NUMERICAL ANALYSIS

Ngoc Long Nguyen*, Tuan Dung Pham, Van Minh Ngo, Vinh Ha Ho

University of Transport and Communications, No. 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 10/05/2023

Revised: 15/05/2023

Accepted: 01/06/2023

Published online: 15/06/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.1>

* *Corresponding author*

Email: nguyengoclong@utc.edu.vn; Tel: +84912345678

Abstract. Damage occurring at the ends of steel beams in bridge structures is a prevalent issue that has received significant research attention, focusing on understanding its causes and proposing appropriate repair and strengthening solutions. In recent times, the use of ultra-high-performance concrete (UHPC) has become popular and widely applied, prompting studies on utilizing UHPC to enhance the shear capacity of steel beam ends. However, there is a scarcity of comprehensive quantitative analyses that evaluate the effectiveness of this strengthening approach. In this study, the authors present a technical solution that utilizes UHPC for the repair and strengthening of the shear capacity at the steel beam ends in bridge structures. Furthermore, the effectiveness of this solution is assessed through the application of a non-linear analysis method. By investigating the potential of UHPC in addressing this issue, this research contributes to the existing body of knowledge in the field of bridge engineering and provides valuable insights for future design and rehabilitation endeavors.

Keywords: ultra high performance concrete (UHPC), steel girder, strengthening steel bridge



TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG KHÁNG CẮT CỦA DÀM CẦU THÉP SỬ DỤNG BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG: ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP VÀ KẾT QUẢ PHÂN TÍCH SỐ

Nguyễn Ngọc Long*, Phạm Tuấn Dũng, Ngô Văn Minh, Hồ Vĩnh Hạ

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 10/05/2023

Ngày nhận bài sửa: 15/05/2023

Ngày chấp nhận đăng: 01/06/2023

Ngày xuất bản Online: 15/06/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.5.1>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyenngoclong@utc.edu.vn; Tel: +84912345678

Tóm tắt. Hư hỏng tại đầu dầm chịu cắt trong cầu dầm thép là hư hỏng rất phổ biến và đã thu hút rất nhiều nghiên cứu về nguyên nhân xuất hiện và đề xuất các giải pháp sửa chữa, tăng cường phù hợp. Trong thời gian gần đây, cùng với việc xuất hiện và áp dụng phổ biến của vật liệu bê tông siêu tính năng (UHPC), các nghiên cứu sử dụng UHPC để tăng cường đầu dầm thép chịu cắt đã được quan tâm, tuy nhiên chưa có nhiều các nghiên cứu phân tích một cách định lượng hiệu quả của giải pháp tăng cường. Trong bài báo này, nhóm tác giả đề xuất giải pháp kỹ thuật sử dụng UHPC để sửa chữa, tăng cường khả năng kháng cắt tại đầu dầm thép của công trình cầu. Đồng thời, phân tích làm rõ hiệu quả của giải pháp bằng phương pháp phân tích phi tuyến bằng số.

Từ khóa: bê tông siêu tính năng (UHPC), dầm cầu thép, sửa chữa tăng cường khả năng chịu cắt.

© 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. TỔNG QUAN VỀ CÁC HƯ HỎNG VÀ GIẢI PHÁP TRUYỀN THÔNG SỬA CHỮA, TĂNG CƯỜNG VÙNG CHỊU CẮT TRONG DÀM CẦU THÉP

Trong kết cấu nhịp cầu dầm thép hoặc dầm thép liên hợp, vị trí sườn dầm ở đầu nhịp (với nhịp giản đơn) và vị trí sườn dầm trên các gối trung gian là các vị trí phải chịu lực cắt lớn và tiềm ẩn khả năng bị phá hoại do một trong hai dạng phá hoại chính là phá hoại vật liệu do chịu lực cắt hoặc do mất ổn định sườn chịu lực cắt. Phá hoại do cắt đạt được khi lực cắt lên

sườn dầm vượt quá lực cắt giới hạn tính theo công thức:

$$V_{cr} = \varphi C [0,58 F_y D t_w] \quad (1)$$

Với F_y là giới hạn chảy của thép làm sườn dầm, D là chiều cao sườn dầm, t_w là bề dày của sườn dầm và C là tỉ số giữa lực cắt gây mất ổn định và lực cắt gây chảy vật liệu thép sườn. Theo tiêu chuẩn thiết kế cầu TCVN 11823-2017 (xem [1]), hệ số C được xác định như sau:

$$C = 1,0 \text{ khi } \frac{D}{t_w} \leq 1,12 \sqrt{\frac{Ek}{F_y}} \quad (2a)$$

$$C = \frac{1,12}{\frac{D}{t_w}} \sqrt{\frac{Ek}{F_y}} \text{ khi } 1,12 \sqrt{\frac{Ek}{F_y}} \leq \frac{D}{t_w} \leq 1,40 \sqrt{\frac{Ek}{F_y}} \quad (2b)$$

$$C = \frac{1,57}{\left(\frac{D}{t_w}\right)^2} \frac{Ek}{F_y} \text{ khi } \frac{D}{t_w} > 1,40 \sqrt{\frac{Ek}{F_y}} \quad (2c)$$

Với E là mô-đun đàn hồi của thép sườn dầm, $k = 5 + 5/(d_0/D)^2$ với d_0 là bước (khoảng cách) giữa hai sườn tăng cường đứng. Công thức (1) và (2) thể hiện cơ chế phá hoại của sườn dầm khi chịu lực cắt chịu ảnh hưởng của tải trọng. Đồng thời cho thấy ảnh hưởng của độ mảnh, thể hiện thông qua tỉ số D/t_w đến lực cắt phá hoại của sườn.

Thực tế khi thiết kế, kích thước và chất lượng vật liệu thép (thể hiện thông qua giới hạn chảy và mô-đun đàn hồi) đã được lựa chọn để sườn dầm đảm bảo khả năng chịu lực cắt dưới tác dụng của tải trọng. Tuy nhiên, vấn đề xảy ra là theo thời gian khai thác, do tác dụng của xâm thực, kích thước dầm bị suy giảm dẫn đến tiềm ẩn nguy cơ bị phá hoại do lực cắt. Các hư hỏng này được mô tả ở hình 1.



Hình 1. Hư hỏng cục bộ tại đầu dầm trên các gối trong dầm cầu thép (NCHRP Report 333 [2]).

Để sửa chữa và tăng cường đầu dầm thép, giải pháp sử dụng phổ biến là tẩy sạch gỉ, hàn hoặc tấp thêm bản thép bằng đinh tán hoặc bu-lông cường độ cao để khôi phục lại kết cấu (xem hình 2).



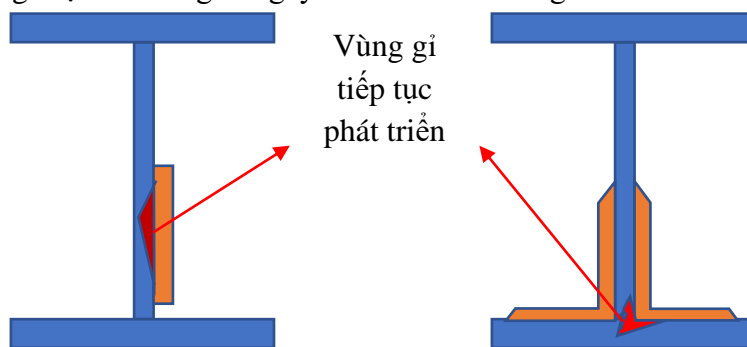
Hình 2. Tăng cường bằng thép góc hoặc tấm thép.

Giải pháp sửa chữa, tăng cường này đã được sử dụng rất phổ biến, tuy nhiên không áp dụng được cho trường hợp bề dày còn lại của bản thép mỏng, không đủ đảm bảo chất lượng đường hàn hay liên kết bằng bu-lông. Ngoài ra, giải pháp hàn, dán thêm bản thép tăng cường được khả năng chịu cắt của kết cấu, nhưng không tăng cường được đáng kể độ cứng – và thông qua đó là ổn định của sườn dầm (xem hình 3).



Hình 3. Phá hoại do mất ổn định sườn dầm thép khi chịu cắt.

Giải pháp sửa chữa này cũng yêu cầu phải có biện pháp kê, chống tạm thời cho dầm trong quá trình thi công, đặc biệt khi cần phải cắt phần sườn dầm đã bị gỉ để hàn tấp. Thực tế cho thấy việc sửa chữa theo giải pháp truyền thống thường là tạm thời do khu vực đầu dầm rất dễ bị gỉ trở lại dưới tác động của xâm thực. Bên cạnh đó, phần thép cơ bản khi không được xử lý gỉ một cách dứt điểm sẽ tiếp tục phát triển gỉ (xem hình 4), gây suy giảm khả năng chịu lực của sườn dầm vùng chịu cắt trong khi gây khó khăn cho công tác bảo trì.

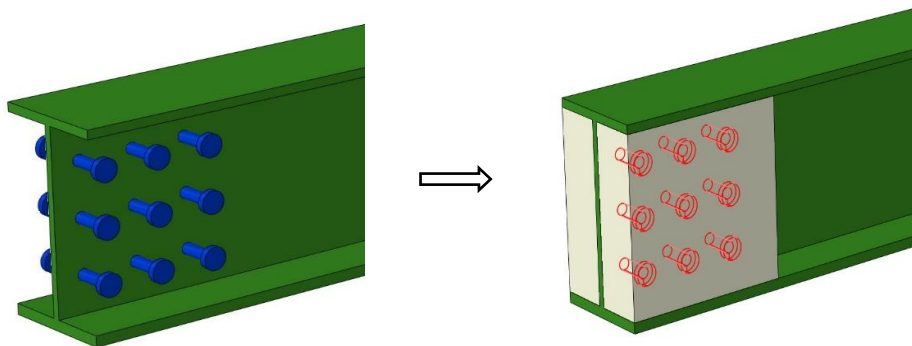


Hình 4. Gỉ tiếp tục phát triển bên trong vị trí dầm đã được tăng cường bằng bản thép.

Trong những năm gần đây, cùng với sự phát triển của vật liệu bê tông siêu tính năng, bên cạnh giải pháp truyền thống là tấp bản thép, nhiều nhóm nghiên cứu đã phát triển các giải pháp sử dụng bê tông siêu tính năng để tăng cường khả năng chịu cắt của dầm cả về cường độ và ổn định (xem [10]). Tuy nhiên chưa có nhiều các phân tích đánh giá bằng số hiệu quả của giải pháp tăng cường này, trong bài báo này, nhóm tác giả tiến hành phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn để kiểm chứng mức độ tăng cường của dầm thép bằng giải pháp bổ sung bê tông siêu tính năng tại đầu dầm, đồng thời với một số phân tích làm rõ hiệu quả của giải pháp.

2. MÔ TẢ GIẢI PHÁP TĂNG CƯỜNG DẦM THÉP CHỊU CẮT BẰNG BÊ TÔNG SIÊU TÍNH NĂNG

Kế thừa triết lý tăng cường về sức kháng và ổn định được chỉ ra ở các công thức (1) và (2), có thể thấy rằng: để tăng cường sức kháng cắt cho dầm cần phải tăng bề dày của sườn dầm (t_w) hoặc giảm khoảng cách bước của sườn tăng cường (d_0). Các giải pháp này đều hướng đến 2 mục tiêu là tăng cường giá trị cho V_{cr} (lực cắt cực hạn) hoặc tăng hệ số ổn định C (trong công thức 2). Để đạt được mục tiêu này, ngoài việc bổ sung sườn tăng cường đứng và tăng bề dày thép thông qua bản tấp, có thể sử dụng vật liệu gia cường bằng bê tông liên hợp với sườn thép. Giải pháp như vậy được thể hiện ở hình 5.



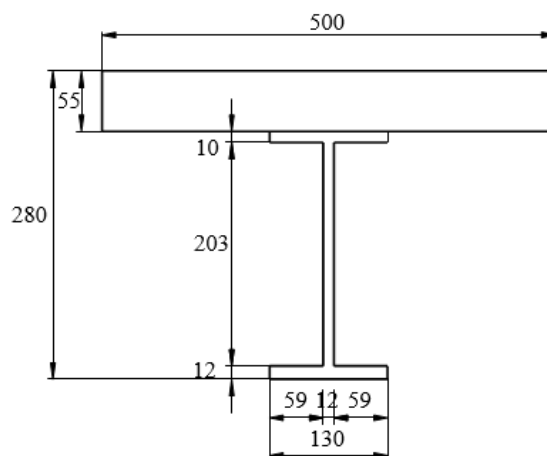
Hình 5. Giải pháp sửa chữa, tăng cường bằng bê tông siêu tính năng.

Theo đó, vùng sườn dầm chịu lực cắt cục bộ (khoảng chiều dài bằng D từ gối) được tăng cường bằng bê tông siêu tính năng có liên hợp với sườn dầm thông qua neo chống cắt. Do phạm vi hẹp của khu vực này, nên việc bố trí thêm các cốt thép cấu tạo là không thực sự khả thi, đồng thời nhu cầu tại khu vực này là vật liệu gia cường phải có khả năng chịu kéo tốt, bên cạnh khả năng chịu nén cục bộ nên giải pháp phù hợp nhất là sử dụng bê tông siêu tính năng (bê tông cốt liệu nhỏ có gia cường thêm sợi thép). Cấp phối và tính chất cơ học của bê tông này đã được nghiên cứu rất rộng rãi (xem [3], [4], [5], [6], [7], [8]). Khi đó giải pháp gia cường có thể được tóm tắt qua các bước như sau:

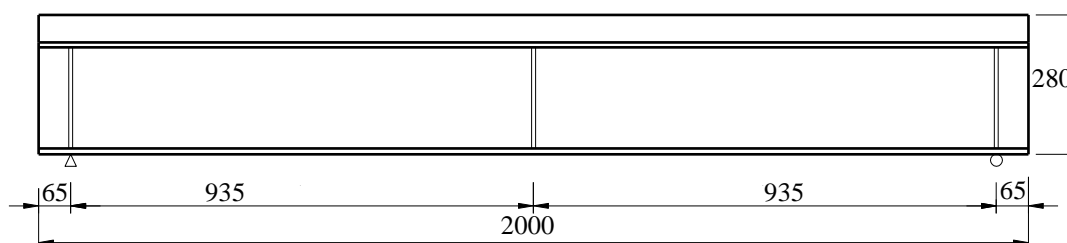
- chuẩn bị bề mặt: phun cát làm sạch bề mặt đến chỉ số Sa2.5;
- hàn đặt neo vị trí hàn định được đánh dấu, khoảng cách giữa các neo 150 mm, cách mép dầm tối thiểu là 75 mm, neo chống cắt được hàn bằng công nghệ plasma;
- lắp đặt ván khuôn đổ bê tông siêu tính năng đến phạm vi từ 1,0 đến 1,25 D từ đầu dầm theo phương ngang, hết chiều cao sườn dầm theo phương đứng.

Để kiểm chứng hiệu quả của giải pháp tăng cường dầm thép liên hợp bằng bê tông siêu tính năng đề xuất ở trên, tiến hành phân tích sức kháng cắt của dầm liên hợp có kích thước

như ở hình 6 và hình 7. Các kích thước cụ thể như sau: dầm có chiều dài 2m, chiều cao phần dầm thép là 225mm (trong đó sườn dầm cao 203mm, bản đáy dưới dày 12mm, bản cánh trên dày 10mm), liên hợp với bản BTCT dày 55mm, tại vị trí gối có sườn tăng cường dày 8mm cao hết chiều cao của sườn.

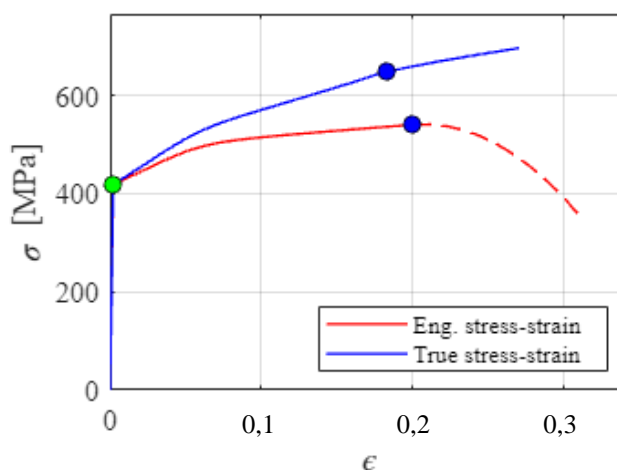


Hình 6. Mặt cắt ngang dầm thép liên hợp



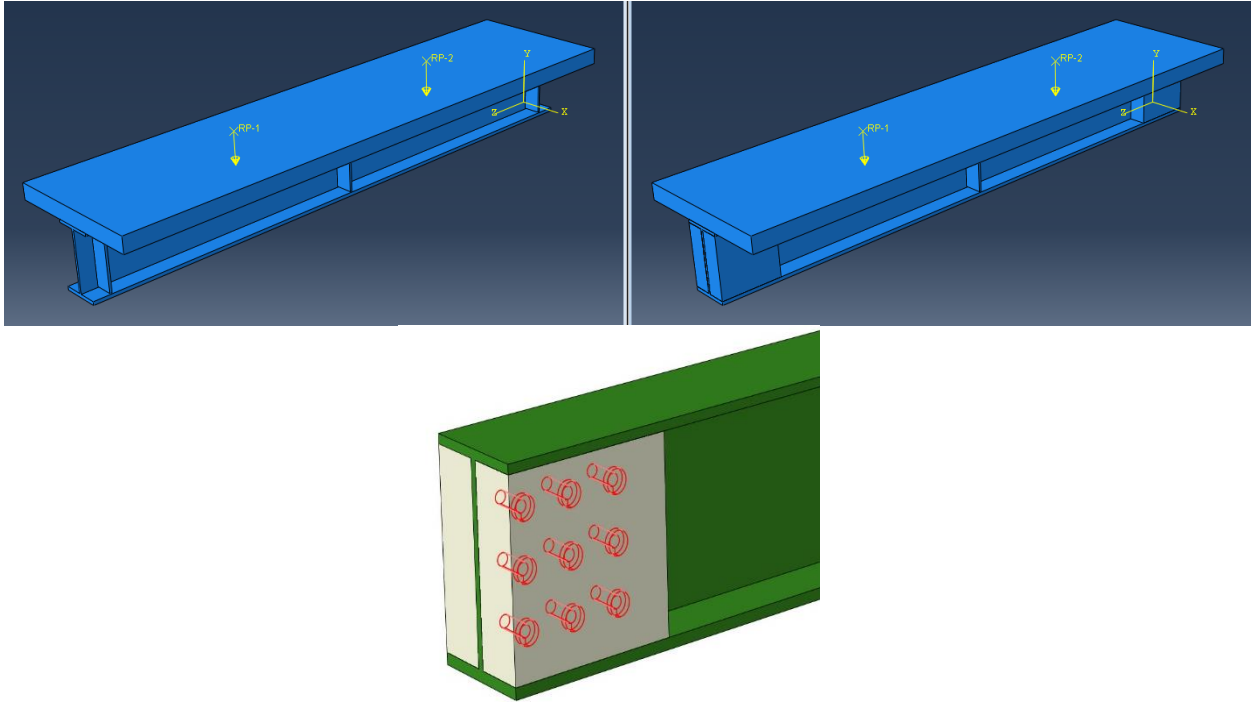
Hình 7. Chiều dài dầm thép liên hợp theo phương dọc.

Thép sử dụng là loại thép cường độ cao, có cường độ chảy $F_y = 418MPa$, cường độ kéo đứt $F_u = 540MPa$, biến dạng kéo đứt $\epsilon_u = 0.2$, biến dạng chảy $\epsilon_y = 0.02$ như hình 8. Bê tông bản mặt cầu sử dụng bê tông C40, có cường độ chịu nén $F'_c = 40MPa$, cường độ chịu kéo 3,16MPa.



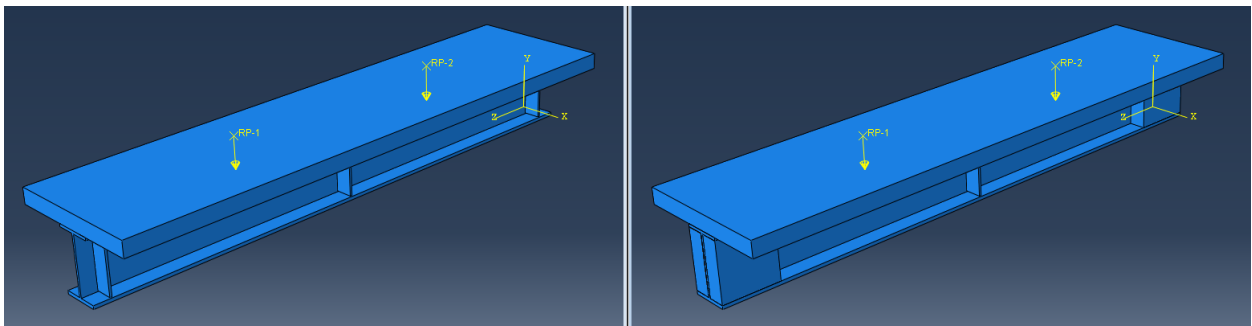
Hình 8. Quan hệ ứng suất biến dạng của vật liệu thép dầm.

Để tăng cường khả năng chịu cắt của dầm, tiến hành gia cường bằng bê tông siêu tính năng liên hợp với sườn dầm thông qua 9 neo liên hợp (3×3) trong phạm vi hết chiều cao sườn, chiều rộng theo phương dọc dầm bằng chiều cao sườn dầm (203mm). Bê tông siêu tính năng sử dụng loại có cường độ $f'_{cu} = 150MPa$, cường độ chịu kéo $f_k = 7MPa$.



Hình 9. Mô hình hóa kết cấu trước và sau khi tăng cường bằng UHPC.

Để xác định lực cắt tới hạn của dầm, tiến hành đặt chuyển vị cưỡng bức tại các vị trí trên đỉnh bản BTCT liên hợp, cách đầu dầm mỗi bên 600mm (hình 10) để tạo ra lực cắt cục bộ tại sườn dầm tại vị trí gối cầu. Giá trị chuyển vị cưỡng bức tăng dần đến khi dầm bị phá hoại, tốc độ tăng chuyển vị theo thời gian rất nhỏ để không gây ra hiệu ứng động trên dầm.



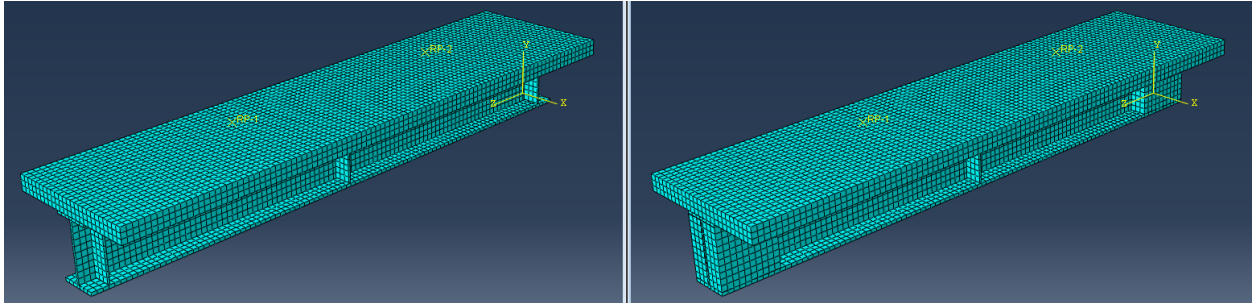
Hình 10. Mô hình hóa kết cấu trước (a) và sau (b) khi tăng cường bằng UHPC.

Dầm thép, bản bê tông cốt thép và phần bê tông siêu tính năng được mô hình bằng phần tử khối tám nút (brick)[11] như hình 11. Liên kết giữa bản bê tông mặt cầu với dầm thép, liên kết giữa bê tông siêu tính năng và dầm thép được giả thiết là dính bám tuyệt đối. Đối với vật liệu bê tông, bê tông siêu tính năng và thép, mô hình vật liệu là mô hình phi tuyến.

Ứng suất tương đương được sử dụng để phân tích phi tuyến cho vật liệu thép là ứng suất vô hướng Von Mises, theo công thức như sau:

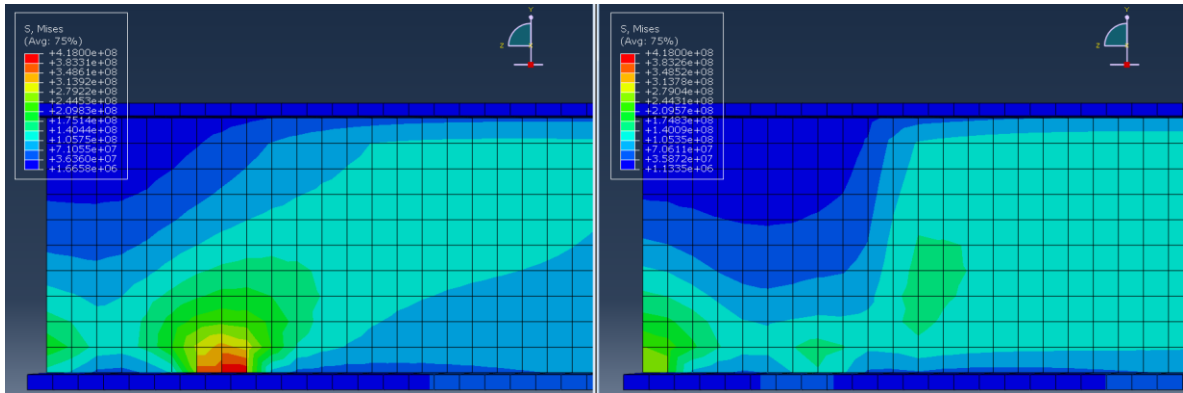
$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (3)$$

Theo đó, vật liệu thép bắt đầu chảy dẻo khi $\sigma_{VM} \geq F_y = 418MPa$

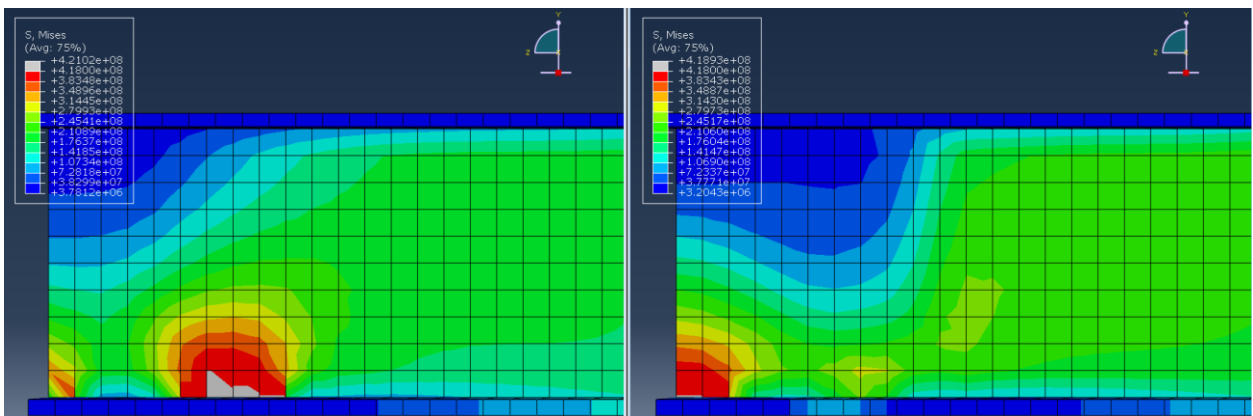


Hình 11. Chia phần tử được sử dụng trong mô hình số.

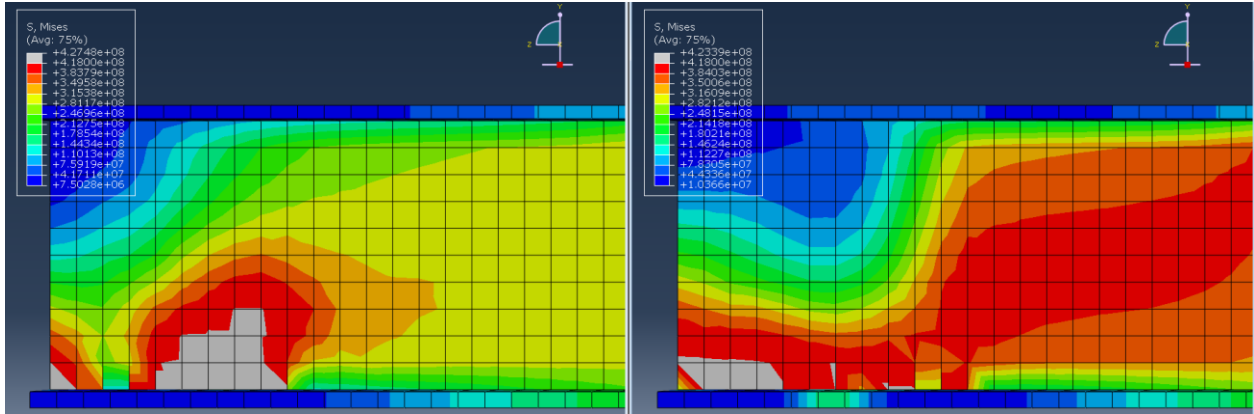
Kết quả phân bố ứng suất trong dầm thép bằng phần tử hữu hạn đối trong trường hợp có và không có tăng cường tại các chuyển vị cứng bức bằng 1mm, 2mm, 4mm, 6mm và 8mm được thể hiện ở các hình vẽ từ 12 đến 18. Trong đó màu xám trắng thể hiện những khu vực vật liệu thép bị chảy dẻo.



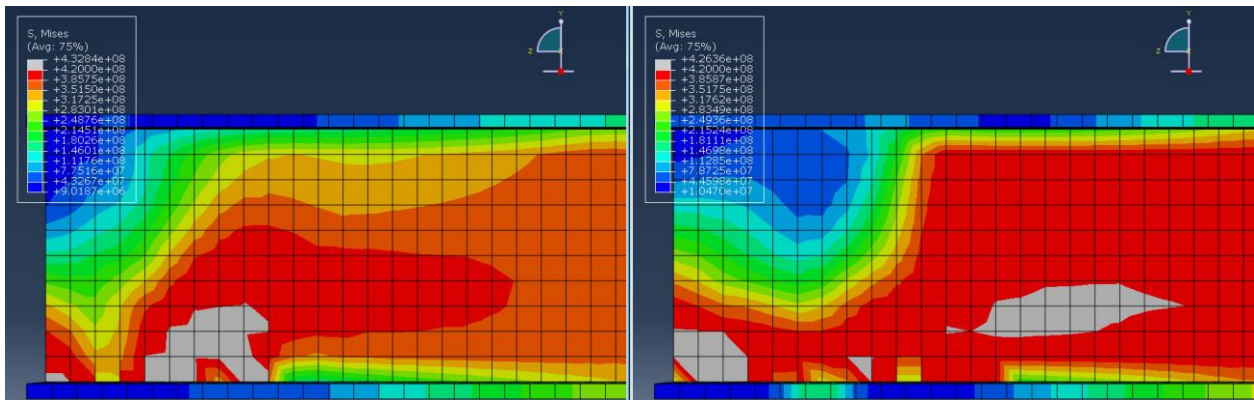
Hình 12: Phân bố ứng suất tại đầu dầm thép trước và sau tăng cường (chuyển vị cứng bức bằng 1mm).



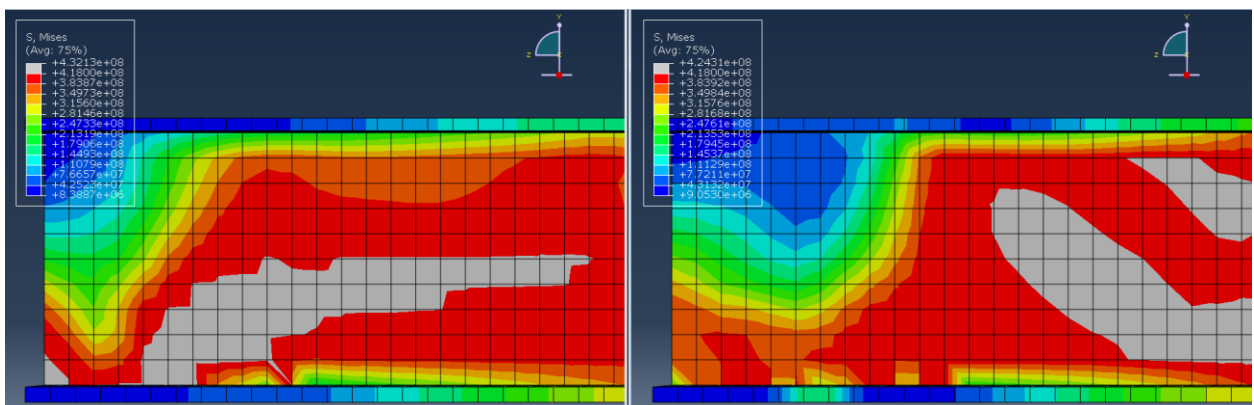
Hình 13. Phân bố ứng suất tại đầu dầm thép trước và sau tăng cường (chuyển vị cứng bức bằng 2mm).



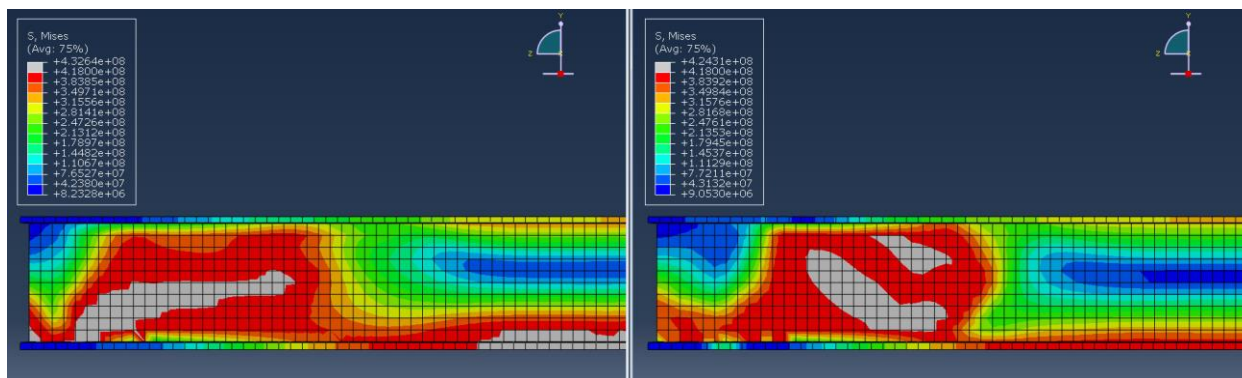
Hình 14. Phân bố ứng suất tại đầu dầm thép trước và sau tăng cường (chuyển vị cường bức bằng 4mm)



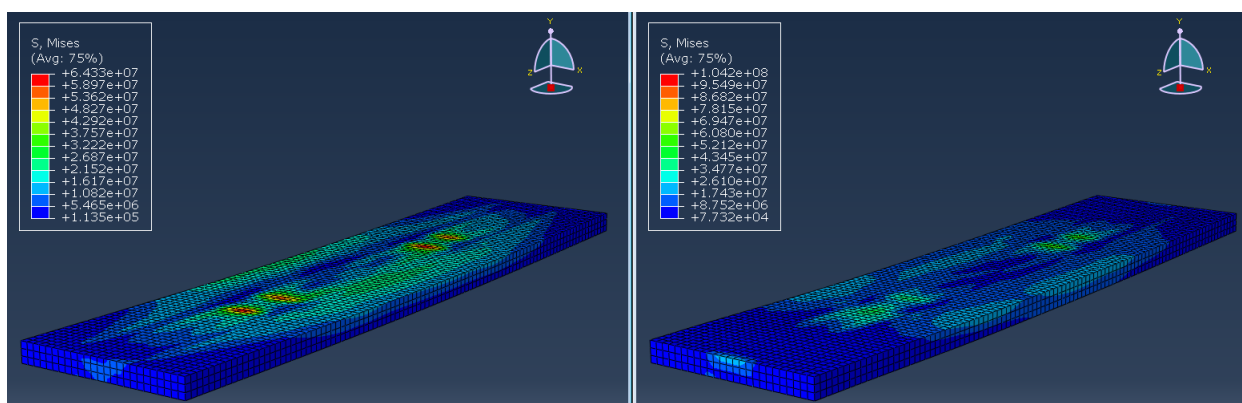
Hình 15. Phân bố ứng suất tại đầu dầm thép trước và sau khi tăng cường (chuyển vị cường bức bằng 6mm)



Hình 16. Phân bố ứng suất tại vị trí gối trước và sau khi tăng cường tại thời điểm phá hoại (chuyển vị cường bức bằng 7,8mm).



Hình 17. Phân bố ứng suất trong dầm thép trước và sau khi tăng cường tại thời điểm phá hoại (chuyển vị cưỡng bức bằng 7,8mm).



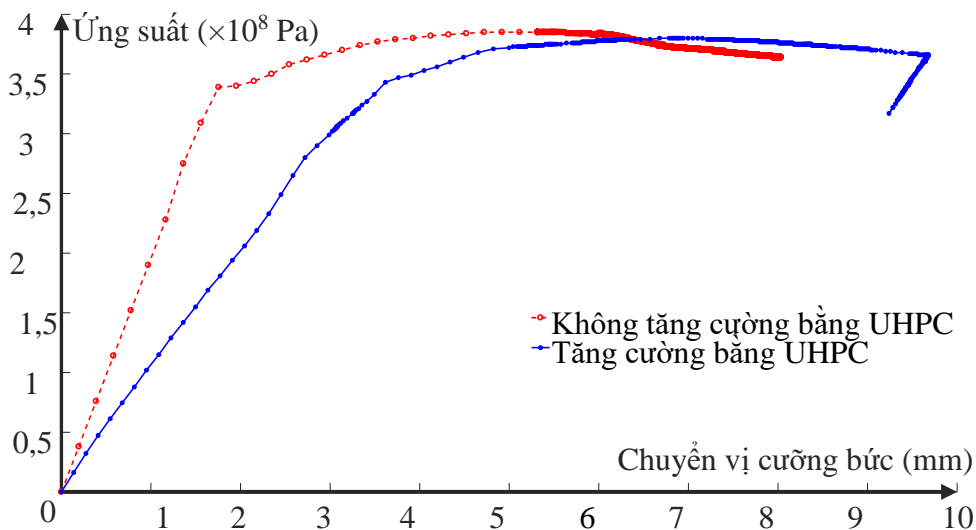
Hình 18: Phân bố ứng suất trong bản mặt cầu BTCT trước và sau khi tăng cường tại thời điểm phá hoại (chuyển vị cưỡng bức bằng 7,8mm).

Kết quả phân tích cho thấy:

- Ở chuyển vị cưỡng bức 1mm: toàn bộ dầm vẫn làm việc trong giai đoạn đàn hồi tuy nhiên tại xung quanh vị trí gối trong trường hợp không tăng cường đã xuất hiện ứng suất cục bộ lớn (xấp xỉ giới hạn chảy), trong khi ứng suất cục bộ không xuất hiện tại vị trí gối khi sườn dầm đã được tăng cường. Giá trị ứng suất đạt khoảng 400MPa trong khi với dầm tawng cường ứng suất lớn nhất chỉ bằng 279MPa.
- Ở chuyển vị cưỡng bức 2mm: bên phải gối cầu trong dầm chưa tăng cường xuất hiện khu vực vật liệu bị chảy dẻo, tuy nhiên mới lại vùng cục bộ. Giá trị ứng suất lớn nhất trên dầm đạt 421 MPa lớn hơn giá trị ứng suất lớn nhất bằng 383 MPa trong trường hợp tăng cường.
- Ở chuyển vị cưỡng bức 4mm: vùng thép chảy dẻo bên phải gối cầu phát triển rộng, giá trị ứng suất chảy dẻo lớn nhất đạt 427 MPa, so với vùng chảy dẻo nhỏ hơn nằm ngay trên gối cầu và giá trị ứng suất lớn nhất bằng 423MPa. Tuy nhiên như sẽ thấy ở hình 19, tuy đều đã xuất hiện vùng chảy dẻo cục bộ, dầm vẫn chưa đạt đến tải trọng cực hạn ở cả 2 trường hợp.
- Ở chuyển vị cưỡng bức 6mm và 8mm: vùng chảy dẻo của 2 trường hợp tăng dần về diện tích. Trong khi với dầm chưa tăng cường, vùng chảy dẻo tiếp tục phát triển rộng

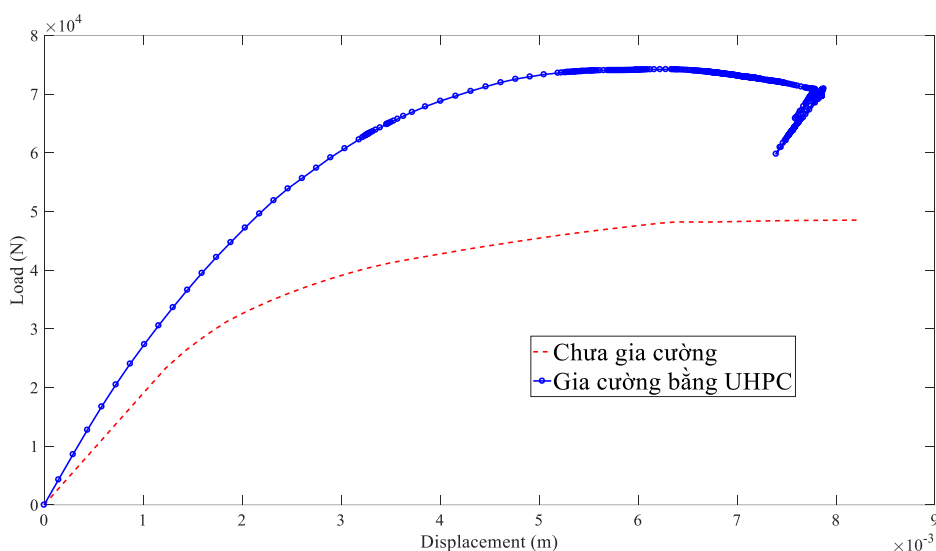
từ vị trí gối và phát triển lên trên thì với dầm thép sau khi đã tăng cường, vùng thép nằm dưới bê tông siêu tính năng tăng cường không chảy dẻo, vùng chảy dẻo xuất hiện ở phần sườn dầm thép không tăng cường sát cạnh phần tăng cường bằng bê tông siêu tính năng. Một điều thú vị là ở trạng thái phá hoại, vùng chảy dẻo tại dầm chưa tăng cường xuất hiện ở cả vùng chịu cắt (đầu dầm) và vùng mô-men uốn lớn (đáy dầm ở mặt cắt giữa), trong khi với dầm đã tăng cường đáy dầm ở vị trí mô-men dương lớn chưa bị chảy dẻo. Ở cả hai trường hợp tăng cường và không tăng cường, bản bê tông cốt thép đều chưa đạt đến giới hạn phá hoại, ngoại trừ 1 số hư hỏng cục bộ tại vị trí sát gần điểm đặt chuyển vị cưỡng bức.

Sự phát triển ứng suất Von-Mises tương đương theo sự tăng dần của chuyển vị cưỡng bức tại vị trí cách mép gối bên phải 200mm theo phương dọc, 200mm theo phương đứng của dầm được thể hiện ở hình 19. Sự phát triển ứng suất này cho thấy do ảnh hưởng của bê tông siêu tính năng tăng cường: ứng suất trong dầm không tăng cường đạt đến giới hạn chảy rất sớm (ở chuyển vị bằng 15mm) so với dầm tăng cường (35mm), đồng thời bị đứt (phá hoại) ở chuyển vị cưỡng bức nhỏ hơn nhiều so với trường hợp dầm tăng cường.



Hình 19. Ứng suất Von-Mises tại phân tử cách gối 200mm theo phương dọc, 200mm theo phương đứng theo chuyển vị cưỡng bức.

Xét trên bình diện sức chịu lực tổng thể, phá hoại dầm tăng cường xảy ra ở tải trọng lớn hơn đáng kể so với dầm không tăng cường (72kN so với 43kN – xem hình 20). Đồng thời ở cùng một tải trọng tác động, chuyển vị thẳng đứng (độ võng) của dầm tăng cường nhỏ hơn nhiều so với dầm không tăng cường, điều này cho thấy việc tăng cường dầm bằng bê tông siêu tính năng tuy chỉ hướng đến tăng cường khả năng chịu cắt nhưng trên thực tế cũng giúp phân phối lại ứng suất, làm tăng cường độ cứng của dầm. Điều này cũng phù hợp với kết quả phân tích ở hình 17, theo đó việc tăng cường bê tông siêu tính năng ở đầu dầm góp phần làm giảm ứng suất kéo ở vùng mô-men dương giữa dầm so với trường hợp không tăng cường.



Hình 20. Quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị trước và sau khi tăng cường chống cắt bằng UHPC.

3. KẾT LUẬN

Kết quả phân tích bằng số cho một ví dụ dầm cầu thép tăng cường bằng vật liệu bê tông siêu tính năng cho thấy hiệu quả rất rõ ràng về mặt tăng cường sức chịu lực của dầm thép khi chịu cắt. Sức chịu tải phá hoại của dầm tăng 67% (72kN so với 43kN), độ cứng chung tổng thể của dầm tăng lên đáng kể, đặc biệt là ở các giá trị chuyển vị lớn. Bên cạnh hiệu quả tăng cường về mặt tải trọng, giải pháp tăng cường bằng vật liệu bê tông siêu tính năng cũng cho thấy hiệu quả lâu dài của giải pháp tăng cường, theo đó bản thân bê tông siêu tính năng là lớp bảo vệ rất tốt cho đầu dầm khỏi các nhân ăn mòn.

Bài báo này cũng đặt ra một số nội dung cần tiếp tục nghiên cứu sâu hơn về giải pháp tổng thể. Về mặt cấu tạo: việc tính toán số lượng đinh neo chịu cắt cần thiết để đảm bảo phá hoại của đinh neo xảy ra sau khi bê tông siêu tính năng hoặc dầm thép bị phá hoại về mặt vật liệu cần có những phân tích sâu hơn về nguyên lý, thêm vào đó là phạm vi tăng cường bê tông siêu tính năng theo chiều dài của dầm đến đâu là hợp lý về mặt chịu lực. Ngoài ra, việc xây dựng một công thức lý thuyết tính toán mức độ tăng cường của dầm thép về chịu cắt cũng là cần thiết để có thể áp dụng giải pháp này trong thực tế. Đây cũng là các nội dung sẽ được nhóm tác giả đề cập trong các công bố tiếp sau.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài trọng điểm cấp Trường mã số T2022-CT-010TĐ. Phạm Tuấn Dũng được tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.2022.ThS.015.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. TCVN 11823 : 06 – 2017. Tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ. Phần 6: Kết cấu thép. NXB GTVT. 2018.

- [2]. J. M. Kulicki, Z. Prucz, D. F. Sorgenfrei, D. R. Mertz, W. T. Young, Guidelines for evaluating corrosion effects in existing steel bridges, National Cooperative Highway Research Program Report 333, December 1990.
- [3]. V.H. Ho, E. Choi, S.J. Park, Investigating stress distribution of crimped SMA fibers during pullout behavior using experimental testing and a finite element model, *Composite Structures*, 272 (2021) 114254. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114254>
- [4]. V.H. Ho, E. Choi, J.W. Kang, Analytical bond behavior of cold drawn SMA crimped fibers considering embedded length and fiber wave depth, *Reviews on Advanced Materials Science*, 60 (2021) 862-883. <https://doi.org/10.1515/rams-2021-0066>
- [5]. E. Choi, V.H. Ho, J.S. Jeon, Active reinforcing fiber of cementitious materials using crimped NiTi SMA fiber for crack-bridging and pullout resistance, *Materials*, 13 (2020) 3845. <https://doi.org/10.3390/ma13173845>
- [6]. V.H. Ho, E. Choi, D. Kim, J. Kang, Straining behavior of mortar reinforced by cold drawn crimped and dog-bone-shaped fibers under monotonic and cyclic compressions, *Materials*, 14 (2021) 1522. <https://doi.org/10.3390/ma14061522>
- [7]. E. Choi, V.H. Ho, J. Seo, Dynamic Behaviors of Mortar Reinforced with NiTi SMA Fibers under Impact Compressive Loading, *Materials*, 14 (2021) 4933. <https://doi.org/10.3390/ma14174933>
- [8]. N.L. Nguyen, T.T. Bui, X.T. Nguyen, V.M. Ngo, Refinement of an inverse analysis procedure for estimating tensile constitutive law of UHPC, *Journal of materials and engineering structures*, 9 (2022) 579–587.
- [9]. Bùi Thanh Tùng, Ngô Văn Minh, Lê Hà Linh, Nguyễn Xuân Lam, Đánh giá khả năng ứng dụng bê tông cốt sợi thép cho bản mặt cầu bê tông cốt thép của cầu dầm thép liên hợp liên tục nhiều nhịp, *Tạp chí Cầu Đường Việt Nam*, 9 (2020) 13-17.
- [10]. Commonwealth of Pennsylvania, Department of Transportation, Corrosion Repair Strategies for Steel Girder Ends Using High Performance and Traditional Materials, Report, August 2022.
- [11]. Dassault Systèmes, Simulia Corp, ABAQUS version 2016 documentation, Providence: Dassault Systèmes, Simulia Corp., 2016.