Phân tích hiệu quả gia cường của lớp phủ UHPFRC trên bản sàn cầu thép trực hướng bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Analysis of strengthening effectiveness of the UHPFRC overlay on the orthotropic steel bridge deck by finite element method

> MÃ CHÍ HIẾU^{1,2}, LÂM VĂN PHONG^{1,2}, LÊ TUẤN ANH^{1,2}, NGUYỄN DANH THẢO^{1,2}, NGUYỄN CẢNH TUẤN^{1,2}

¹Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM

²Đại học Quốc gia TP.HCM; Corresponding author's; Email: chihieuma@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Trong sàn cầu thép trực hướng (Orthotropic Steel Bridge Deck - OSD), sư phân bố theo phương ngang của bánh xe tao ra ứng suất cục bô lớn trong cấu kiện tấm sàn thép với chiều dày nhỏ. Để giảm ứng suất gây ra và từ đó kéo dài tuổi tho của công trình, lớp phủ UHPFRC (Ultra High-Performance Fiber Reinforced Concrete - Bê tông cốt sơi hiệu suất siêu cao) thường được sử dụng trong các nghiên cứu trước đây. Trong nghiên cứu hiện tại, phân tích phần tử hữu hạn ba chiều với mô hình vật liêu phi tuyến của UHPFRC được tiến hành để tính toán các giá tri chuyển vi và biến dang của mặt cầu thép trước và sau khi gia cường bằng lớp phủ UHPFRC. Trong nghiên cứu hiện tại, các kết quả phân tích số của bản sàn cầu được gia cường bằng UHPFRC sẽ được kiểm chứng với các kết quả thực nghiêm. Sự giảm rõ rêt trong các giá tri chuyển vi và đô biến dang đã được quan sát thấy từ dữ liêu thu thập được trong mô hình số cũng như trong thực nghiệm, cho thấy sự hiệu quả của việc sử dụng lớp phủ gia cường UHPFRC. Ảnh hưởng của đô dày lớp phủ UHPFRC cũng được xem xét trong nghiên cứu này.

Từ khóa: UHPFRC; sàn cầu thép trực hướng (OSD); tải trọng bánh xe; phương pháp phần tử hữu hạn.

ABSTRACT

In orthotropic steel bridge decks (OSD), high local stresses in the small thickness of steel members are generated by the wheel transverse distribution. In order to reduce the stress level and thereby extend the fatique life, a strengthening technique with overlaid UHPFRC (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete) was commonly used in previous studies. In the current study, three-dimensional finite element analysis with the nonlinear constitutive material model of UHPFRC is performed to investigate the displacements and deformations of steel bridge decks with and without the overlaid UHPFRC. The numerical results are verified by the experimental data. The apparently decreases in displacement and strain levels are observed in both FEM model and experiment, that indicate the beneficial effect of the use of UHPFRC overlay. The influence of the overlaid UHPFRC thickness is also examined in the paper.

Keywords: UHPFR; orthotropic steel deck (OSD); wheel load; finite elment method.

1. GIỚI THIỆU

Với những ưu điểm như trọng lượng bản thân nhẹ, khả năng chịu lực cao và dễ dàng trong việc thi công lắp dựng, sàn thép trực hướng (OSD) đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều công trình cầu nhịp lớn trong nhiều năm qua. Mặc dù đạt yêu cầu về hiệu suất tĩnh trong các thiết kế lúc ban đầu, tuy nhiên kết cấu này thường bị hư hỏng sớm do tải trọng động gây ra bởi xe cộ di chuyển. Các vết nứt mỏi thường được tìm thấy ở các chi tiết mối hàn của mặt cầu thép và gây ra sự suy giảm nghiêm trọng về mặt hiệu suất của kết cấu (Connor & Fisher 2006, De Jong 2004). Do đó, việc cấp thiết hiện nay là phải phát triển các phương pháp gia cường hiệu quả để kéo dài tuổi thọ mỏi của các sàn cầu thép trực hướng đã bị xuống cấp do nứt. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc sử dụng bê tông cốt sợi như một lớp phủ gia cường đã thể hiện sự hiệu quả rõ rệt trong việc làm giảm giá trị ứng suất mỏi trong các cấu kiện thép của sàn cầu trực hướng (Kodama và các cộng sự 2010, Dieng và các cộng sự 2013, Makino và các cộng sự 2021). Trong vòng một thập kỷ qua, bê tông cốt sợi cường độ siêu cao (UHPFRC) đã nổi lên là một trong những vật liệu hứa hẹn nhất để cải thiện độ bền mỏi của sàn cầu thép. UHPFRC với các đặc tính vượt trội như cường độ chịu kéo và chịu nén cao, và độ cứng lớn, đã thể hiện hiệu quả vượt trội trong việc gia cường kết cấu sàn cầu thép bị nứt.

Ở Nhật Bản trong những năm gần đây, vật liệu bê tông cốt sợi cường đô siêu cao có tên thượng mai là J-THIFCOM đã được phát triển và ứng dụng cho nhiều kết cấu cầu thép và bê tông bị xuống cấp (Manabe và các cộng sự, 2018). Với khả năng cải thiện hiệu suất và đô bền của kết cấu cầu bi hư hỏng, J-THIFCOM được coi là vật liệu khá tiềm năng trong các dự án bảo trì và sửa chữa công trình ở Nhât Bản.

Trong nghiên cứu này, phân tích phi tuyến được thực hiện bằng cách sử dụng phần mềm thương mại MSC/Marc để mô phỏng sàn cầu thép trực hướng chịu tác dụng của tĩnh tải từ bánh xe cao su, trước và sau khi sử dung lớp phủ gia cường UHPFRC (hay cũng có thể gọi là J-THIFCOM). Chuyển vị theo phương đứng của tấm sàn thép và biến dạng tại các vị trí chịu ứng suất tập trung lớn được xem xét và so sánh với các kết quả từ thí nghiệm do Viện Nghiên cứu Công trình Xây dựng (CERI) cho Vùng Lạnh (Nhóm nghiên cứu J-THIFCOM 2019) thực hiên. Từ thí nghiêm và mô phỏng số đã chỉ ra rằng hiệu suất kết cấu của sàn cầu thép trực hướng đã được cải thiên đáng kể sau khi áp dung lớp phủ UHPFRC. Cũng trong bài báo này, nghiên cứu tham số cho thấy rằng đô bền và độ cứng của sàn cầu tăng lên theo độ dày của lớp phủ UHPFRC.

2. MÔ HÌNH SỐ

2.1 Mô tả hình học

Kích thước của sàn cầu liên hợp giữa thép và UHPFRC với các hê truc toa đô XYZ được minh hoa trong Hình 1. Sàn cầu thép trực hướng bao gồm lớp phủ UHPFRC, tấm sàn thép, dầm chính, dầm ngang và các thanh sườn dọc. Hai dầm chính có đô cao 690 mm và dày 14 mm. Bản mặt cầu thép được gia cường bởi 7 thanh sườn doc truc có kích thước là 230 mm × 11 mm

× 30 mm và 3 dầm ngang có đô dày bản bung là 9 mm. Khoảng cách giữa các dầm ngang là 1500 mm. Khoảng cách giữa hai thanh sườn doc là 320 mm. Chi tiết thanh sườn doc được thể hiện trên hình 1(c).

Kích thước theo phương dọc và phương ngang của tấm sàn thép lần lượt là 3300 mm và 2720 mm. Tấm sàn thép có đô dày 12 mm được phủ bởi một lớp UHPFRC dày 25 mm.

2.2 Mô hình phần tử hữu han trong MSC/Marc

Phần mềm phần tử hữu hạn MSC/Marc được sử dụng để mô phỏng ứng xử tĩnh của sàn cầu thép trực hướng được gia cường bởi lớp phủ UHPFRC. Mô hình MSC/Marc với các điều kiện tải trọng của sàn cầu liên hợp được thể hiện trong Hình 4. Các phần tử khối tám nút (SOLID type 7) được dùng để mô phỏng tấm sàn thép và lớp phủ UHPFRC. Chiều dày lớp phủ UHPFRC được chia thành 3 lớp, và kích thước trung bình của mỗi phần tử là 110×125 mm (ngang × dọc). Phần tử vỏ 4 nút (SHELL type 75) được sử dụng để mô phỏng các bản bụng và bản cánh của dầm chính, dầm ngang và các thanh sườn dọc thay vì các phần tử khối 3D để giảm thời gian tính toán.

Các điều kiện biên của dầm được thể hiện chi tiết trong Hình 4(a). Bốn cạnh dưới các bản cánh của dầm chính được gán là gối cố định với chiều dài nhịp là 3000 mm. Tải trong gây ra bởi bánh xe cao su được gán dựa theo điều kiện thí nghiệm. Làn chạy của bánh xe được mô phỏng là 2 đường chạy theo theo phương dọc (Tây sang Đông) với phạm vi là \pm 875 mm tính từ dầm ngang giữa nhịp. Khoảng cách giữa hai đường chạy của tải trọng là 100 mm, đây chính là khoảng cách giữa hai lốp cao su trong thí nghiệm. Đối với phân tích tĩnh, hai tải trọng phân bố đều (tức là tải phía Đông và tải Trung Tâm trong Hình 4) được xem xét trong mô hình. Mỗi tải phân bố đều này chính là vùng tiếp xúc của lốp cao su và tấm sàn thép. Vùng tiếp xúc này có kích thước là 2×220×250 mm. Độ lớn của tĩnh tải do bánh xe do được gán trong mô hình là là 100 kN theo thiết kế của thí nghiêm.

Liên kết giữa tấm sàn thép và lớp phủ UHPFRC được giả định là liên kết hoàn hảo (perfectly bond) trong mô hình phần tử hữu han bằng cách sử dung tùy chon GLUE trong phần mềm MSC/Marc. Trong tùy chọn này, lớp dưới cùng của UHPFRC và bề mặt trên cùng của tấm sàn được gán là các vật thể có thể biến dạng (deformable body) trong mô hình liên kết.

2.3 Mô hình vât liêu 2.3.1 Thép

Mô hình đàn dẻo lý tưởng bao gồm hai giai đoạn được áp dụng cho mô hình vật liệu của thép trong nghiên cứu hiện tại, như được thể hiện trong Hình 2. Những thông số vật liệu của từng loại cấu kiện thép được tóm tắt trong Bảng 1. Tiêu chuẩn chảy dẻo của thép tuân theo tiêu chuẩn Von Mises. Hê số Poisson và mô-đun đàn hồi của thép trong nghiên cứu này lần lượt là 0.3 và 200 GPa. Mối quan hệ ứng suất-biến dạng của vật liệu thép được thể hiện trong công thức sau đây:



Hình 1. Mô tả hình học sàn cầu thép trực hướng (Tất cả các kích thước có đơn vị là mm)

2.3.2 Bê tông cốt sợi cường độ siêu cao UHPFRC

Mối quan hệ ứng suất-biến dạng của vật liệu UHPFRC khi chịu kéo và chịu nén được chọn dựa trên *Khuyến nghị cho thiết kế và thi* công vật liệu composite xi măng cốt sợi tính năng cao có nhiều vết nứt mịn của Hiệp hội kỹ sư xây dựng Nhật Bản (JSCE) năm 2008, như được thể hiện trong Hình 3.

Khi chịu kéo, ứng xử của UHPFRC được thể hiện qua ba giai đoạn (Hình 3(a)). Trong giai đoạn đàn hồi, hệ số Poisson và mô-đun đàn hồi của UHPFRC trong nghiên cứu này lần lượt là 0,22 và 31,3 GPa. Các thông số khác của vật liệu UHPFRC theo số liệu đưa ra từ nhà sản xuất được liệt kê trong Bảng 2.

Bảng 1. Thông số vật liệu của các cấu kiện thép

Cấu kiện	Cường độ chảy, f _y (MPa)	Cường độ tới hạn <i>, f_u</i> (MPa)	Biến dạng tới hạn (%)
Tấm sàn thép	365	490	20
Thanh sườn dọc	365	490	20
Dầm chính, dầm ngang	245	400	20

Mối quan hệ ứng suất-biến dạng của vật liệu UHPFRC được trình bày trong các công thức sau đây:

• Khi chịu kéo:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E_u \varepsilon & (\varepsilon \le \varepsilon_{cr}) \\ \sigma_{t0} + (\sigma_{t0} - \sigma_{cr}) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{t0} - \varepsilon_{cr}} \right) & (\varepsilon_{cr} < \varepsilon \le \varepsilon_{t0}) \\ \sigma_{t0} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{tu}}{\varepsilon_{t0} - \varepsilon_{tu}} \right) & (\varepsilon_{t0} < \varepsilon \le \varepsilon_{tu}) \end{cases}$$
(2)

• Khi chiu nén:

(

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases}
\sigma_{cu} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu}} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu}} \right) & (0 \ge \varepsilon \ge \varepsilon_{cu}) \\
\sigma_{cu} + 1.6\sigma_{cu} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu}} \right) & (\varepsilon_{cu} \ge \varepsilon \ge 1.5\varepsilon_{cu}) \\
0.2\sigma_{cu} & (\varepsilon < 1.5\varepsilon_{cu})
\end{cases}$$
(3)



Hình 2. Biểu đồ ứng suất-biến dạng của t	thép
Bảng 2. Thông số vật liệu của	UHPFRC

Thông số vật liệu	Ký hiệu	Giá trị (đơn vị)
Giới hạn nứt khi chịu kéo	σ _{cr}	6 (MPa)
	ε _{cr}	0.00019
Ciới hạp bầp khi chiu káo	σ_{t0}	9 (MPa)
Giornán ben kní chíu keo	E _{t0}	0.00175
Biến dạng tới hạn khi chịu kéo	ε _{tu}	0.01200
Ciới họp bồp khi chịu nóp	σ _{cu}	133 (MPa)
Giới hạn bên khi chịu hên	E cu	0.00850



Hình 3. Mô hình vật liêu của UHPFRC

3. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH VÀ THẢO LUẬN

Trong phần này, các kết quả và thảo luận sẽ tập trung vào hai mô hình số như sau:

 Mô hình S: sàn cầu thép trực hướng không có lớp phủ gia cường UHPFRC.

 Mô hình SU: sàn cầu thép trực hướng có sử dụng lớp phủ gia cường UHPFRC.

Các kết quả từ mô hình số sẽ được so sánh với kết quả thí nghiệm do Viện Nghiên cứu Công trình Xây dựng (CERI) cho Vùng Lạnh thực hiện.



Hình 4. Mô hình sàn cầu thép trong MSC/Marc

3.1 Kết quả chuyển vị

Để đo chuyển vị bên dưới đáy của tấm sàn thép trong thí nghiệm, các cảm biến chuyển vị (LVDT- Linear Variable Differential Transformer) được sử dụng và được đặt dọc theo trục WE và SN (xem hình 4(a)). Từ kết quả thí nghiệm cho thấy kết quả chuyển vị của sàn cầu thép đạt được giá trị lớn nhất khi chịu tác dụng của Tải phía Đông. Vì vậy, các kết quả chuyển vị của sàn cầu trong phần này sẽ tập trung phân tích và thảo luận các kết quả đạt được dưới tác dụng của Tải phía Đông.

Kết quả chuyển vị đứng dưới đáy của tấm sàn thép dưới tác dụng của Tải phía Đông thu được từ phân tích phần tử hữu hạn được thể hiện lần lượt ở Hình 5 và Hình 6 cho cả hai phương dọc (trục WE) và ngang (trục SN) của sàn cầu thép. Từ Hình 5, ta có thể nhận thấy rằng đang có những sai khác tương đối lớn giữa kết quả chuyển vị thu được từ thí nghiệm so với kết quả từ mô hình số. Điều này bắt nguồn từ việc trong thí nghiệm có sử dụng một hệ dầm thép phụ để đỡ hai dầm chính của sàn cầu, trong khi đó các máy đo chuyển vị lại được đặt trên một dầm thép riêng biệt khác bên dưới tấm sàn. Dưới tải trọng của bánh xe, các dầm đỡ bên dưới hai dầm chính bị biến dạng theo phương thẳng đứng. Trong khi dầm đỡ bên dưới các máy đo chuyển vị thì lại không bị ảnh hưởng bởi tải trọng bánh xe. Điều này dẫn đến các giá trị chuyển vị từ thí nghiệm sẽ lớn hơn trong mô hình số. Vì thế, trong mô hình phần tử hữu hạn hiện tại, các kết quả chuyển vị từ phân tích số được kiểm chứng dựa trên xu hướng thay đổi của đường phân bố chuyển vị với các điểm dữ liệu thực nghiệm. Từ Hình 5 và Hình 6, có thể thấy rằng các đường cong chuyển vị từ hai mô hình số S và SU của bản mặt cầu thép thể hiện xu hướng tương tự với các kết quả từ thí nghiệm cho cả phương dọc (trục WE) và phương ngang (trục SN).

So sánh hai mô hình số S và SU, hiệu suất kết cấu của sàn thép rõ ràng được cải thiện sau khi sử dụng lớp phủ gia cường UHPFRC, đặc biệt là ở khu vực đường chạy của bánh xe. Độ cứng tổng thể của kết cấu sàn cầu liên hợp SU đã được gia tăng nhờ đặc tính cường độ cao của UHPFRC. Dưới tác dụng của Tải phía Đông, giá trị chuyển vị lớn nhất dưới đáy bản mặt cầu thép giảm từ -1,156 mm xuống -0,565 mm. So với sàn cầu thép ban đầu (S), giá trị chuyển vị đứng lớn nhất của tấm sàn thép khi được phủ lớp UHPFRC (sàn SU) giảm khoảng 51 %.



Hình 5. Chuyển vị theo phương đứng của tấm sàn thép dọc theo trục WE dưới tác dụng của Tải phía Đông



Hình 6. Chuyển vị theo phương đứng của tấm sàn thép dọc theo trục SN dưới tác dụng của Tải phía Đông

3.2 Kết quả biến dạng

Trong thí nghiệm, kết quả biến dạng tại các vị trí nguy hiểm trong kết cấu sàn cầu thép như mặt đáy tấm sàn, điểm giao giữa tấm sàn và dầm ngang hoặc lỗ khoét tròn trên dầm ngang, được đo bằng các cảm biến đo biến dạng (strain gauge). Dựa theo các quan sát từ thí nghiệm, các kết quả biến dạng trong mô hình số tại các vị trí nêu trên sẽ được tập trung khảo sát, cụ thể như sau:

- Trục U: thể hiện các kết quả biến dạng tại mối hàn giữa tấm

sàn và dầm ngang giữa nhịp, dưới tác dụng của Tải Trung tâm.

- Trục L: thể hiện các kết quả biến dạng tại phần khoét tròn trên dầm ngang giữa nhịp, dưới tác dụng của Tải Trung tâm.

 - Trục SN: thể hiện các kết quả biến dạng của mặt bên dưới tấm sàn, dưới tác dung của Tải phía Đông.

(Ghi chú: vị trí của tải trọng các trục xem Hình 4)

Hình 5-7 trình bày các đường phân bố biến dạng dọc theo ba trục U, L và SN kể trên thu được từ hai mô hình số S và SU. Các số liệu thí nghiệm tại các cảm biến đo biến dạng được thể hiện bằng ký hiệu chấm tròn. Từ các hình này, có thể thấy rằng có sự phù hợp một cách tương đối giữa kết quả thí nghiệm và mô hình số.

Xem xét dầm ngang giữa nhịp, các giá trị biến dạng theo phương đứng Y (Hình 7) là lớn hơn và nguy hiểm hơn khi so sánh với biến dạng theo phương ngang X (Hình 8). Điều này là dễ hiểu khi dầm ngang giữa nhịp chịu tác dụng trực tiếp theo phương đứng từ Tải Trung tâm. Trục U và L lần lượt được chia thành 3 và 4 đoạn với chiều dài mỗi đoạn là 270 mm và 220 mm. Có thể thấy là kết quả biến dạng theo phương Y từ thí nghiệm và mô phỏng số đạt được sự đồng thuận khá tốt với nhau. Vì vậy, ta có thể kết luận rằng những vị trí nguy hiểm gây ra bởi sự biến dạng cục bộ dưới tác dụng của tải trọng bánh xe được dự báo khá tốt bằng mô hình số hiện tại.

Xem xét dữ liệu thu được bên dưới tấm sàn thép dọc theo trục SN, các kết quả biến dạng theo phương X là nguy hiểm nhất (Hình 9). Có thể thấy rằng biến dạng tối đa ở giữa trục SN thu được từ mô hình có giá trị nhỏ hơn so với kết quả thu được từ thí nghiệm. Điều này có thể xuất phát từ việc lưới phần tử không được chia đủ mịn để mô phỏng ứng xử cục bộ ở vị trí bên trên sườn dọc ở giữa. Lý do thứ hai có thể do việc mô phỏng tải trọng do bánh xe cao su như vùng tiếp xúc giữa bánh xe và mặt sàn, phân bố lực trên vùng tiếp xúc... trong mô hình số không hoàn toàn chính xác như trong thực tế. Trong mô hình hiện tại, tải trọng bánh xe đang được lý tưởng hóa với giả định đây là lực phân bố đều trên vùng tiếp xúc. Ở đây, cần có những khảo sát sâu hơn xem xét vấn đề này trong những nghiên cứu về sau.

Thông qua các đường phân bố biến dạng trong sàn cầu, có thể nhận thấy một cách rõ ràng là các mức độ biến dạng từ mô hình không có lớp phủ UHPFRC (mô hình S) luôn luôn lớn hơn trong mô hình SU. Từ mô hình phân tích, tỉ lệ giảm biến dạng tại vị trí nguy hiểm trên dầm ngang giữa nhịp tại trục U đạt khoảng 4% (từ -376.22µ xuống -361.63µ) sau khi gia cố sàn cầu bằng lớp phủ UHPFRC. Đối với vị trí nguy hiểm dưới tấm sàn thép ở giữa trục SN, tỉ lệ giảm biến dạng là rõ ràng hơn trong mô hình SU, đạt đến 83% (từ -354.93µ xuống -60.49µ). Về tổng quan, mức độ biến dạng trong sàn cầu trực hướng đã được giảm đáng kể, đặc biệt là đối với cấu kiện tấm sàn thép.



Hình 7. Đường phân bố biến dạng theo phương Y dọc theo trục U



Hình 8. Đường phân bố biến dạng theo phương Y dọc theo trục L





Tỉ lê giảm của những giá trị cực đại của chuyển vi và biến dạng theo cả ba phương X, Y và Z bên dưới tấm sàn thép thụ được từ trục SN được trình bày trong Hình 10. Chiều dày của lớp phủ UHPFRC được chon trong nghiên cứu tham số là 25 mm (như trong thiết kế thí nghiêm), 35 mm và 50 mm. Dễ thấy rằng phần trăm đô giảm của các giá tri chuyển vi và biến dang tăng gần như tuyến tính với chiều dày lớp phủ UHPFRC. Đô giảm biến dạng theo phương X luôn luôn cao hơn các độ giảm theo phương Y và Z. Ở đây, biến dạng theo phương X cũng là biến dang nguy hiểm nhất trong cấu kiên sàn cầu thép gây ra bởi hiệu ứng tăng độ cứng (stiffening effect) của các sườn dọc bên dưới tấm sàn thép. Vì thế hiệu quả gia cường của lớp phủ UHPFRC xem xét tới biến dạng của tấm sàn thép sẽ theo phương X là chủ đạo. Về tổng quan, ta có thể thấy rằng phương pháp gia cường sử dụng lớp phủ UHPFRC đã chứng minh được sự hiệu quả trong việc cải thiện hiệu suất kết cấu của sàn cầu thép trực hướng OSD chịu tác dụng của tải trong bánh xe.



Hình 10. Ảnh hưởng của độ dày lớp phủ UHPFRC lên các giá trị chuyển vị và biến dạng của tấm sàn thép

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, hiệu quả gia cường của lớp phủ UHPFRC đối với sàn cầu thép trực hướng được khảo sát bằng mô hình số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Trong mô hình hiện tại, kết quả chuyển vị tại vị trí nguy hiểm nhất của tấm sàn thép đã giảm đến khoảng 51% khi sử dụng lớp phủ UHPFRC có chiều dày 25mm. Cũng trong mô hình này, biến dạng lớn nhất của tấm sàn thép và dầm ngang giữa nhịp thu được giảm khoảng 83% và 4% so với mô hình không có lớp phủ UHPFRC. Hiệu quả gia cường của lớp phủ UHPFRC trở nên rõ ràng hơn khi chiều dày lớp phủ được tăng lên.

Với việc giảm đảng kể biến dạng và ứng suất gây ra bởi tải trọng bánh xe, tuổi thọ của kết cấu sàn cầu thép trực hướng có thể được cải thiện rõ rệt khi sử dụng lớp phủ gia cường này. Với những tác động có lợi cho hiệu suất kết cấu như trình bày bên trên, việc sử dụng lớp phủ gia cường UHPFRC có thể được áp dụng rộng rãi để nâng cao tuổi thọ của các kết cấu sàn cầu trực hướng chịu tác động của tải trọng lặp do lưu lượng xe cộ ngày càng gia tăng gây ra trong tượng lai.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã tạo điều kiện về thời gian và phương tiện vật chất cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Connor, R.J. & Fisher, J.W. 2006. Identifying effective and ineffective retrofits for distortion fatigue cracking in steel bridges using field instrumentation, *Journal of Bridge Engineering*, 11(6): 745-752.

[2] De Jong, F. B. P. 2004. Overview fatigue phenomenon in orthotropic bridge decks in the Netherlands, *Proceedings of the 2004 Orthotropic Bridge Conference*, Sacramento, California, 489-512.

[3] Dieng, L., Marchand, P., Gomes, F., Tessier, C. & Toutlemonde, F. 2013. Use of UHPFRC overlay to reduce stresses in orthotropic steel decks, *Journal of Constructional Steel Research*, 89: 30-41.

[4] Japan Society of Civil Engineers (JSCE). 2008. Recommendations for Design and Construction of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan.

[5] J-THIFCOM Research Group, 2019. *Report for the wheel load test of the J-THIFCOM/steel composite deck slab*. Civil Engineering Research Institute (CERI) for Cold Region, Hokkaido, Japan.

[6] Kodama, T., Ichinose, Y., Kagata, M., Ohta, K. & Niinobe, Y. 2010. Effect of reducing strains by SFRC pavement on orthotropic steel bridge deck of Ohira Viaduct, *Journal of Structural Engineering*, A, Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 56A: 1249-1258.

[7] Makino, D., Gouda, Y., Mitamura, H. & Matsui, S. 2021. Wheel-load-running fatigue test of an UHPFRC-steel composite bridge deck. In: Proceedings of the 10th International Conference on Bridge Maintenance, safety and Management, Sapporo, Japan, April 11-18, 2021.

[8] Manabe, H., Huang, C.W., Kosaka, Y., Mitamura, H., Matsumoto, T. & Imai, T. 2018. Verification of repair effect of bridge deck using UHPFRC (J-THIFCOM), *The 12th Japanese German Bridge Symposium*, Universität München.