

Mô hình hiệu chỉnh điều kiện tải trọng bánh xe trong mô phỏng số của bản sàn cầu thép gia cường bởi lớp phủ UHPFRC

Modified model of wheel load condition in numerical simulation of steel bridge deck reinforced by UHPFRC overlay

> **MÃ CHÍ HIẾU**^{1,2*}

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

²Đại học Quốc gia TP.HCM

*Corresponding author's; Email: chihieuma@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bài báo, một mô hình số dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn được xây dựng để mô phỏng sàn cầu thép gia cường bởi lớp phủ UHPFRC chịu tác dụng của tĩnh tải từ bánh xe cao su. Trong nghiên cứu hiện tại, mô hình phân bố áp lực thẳng đứng không đồng đều (xem xét đến sự phân bố tập trung áp lực của bánh xe tại trung tâm của vùng tiếp xúc) được đề xuất. Phân tích số hiện tại đã chỉ ra rằng mô hình tải trọng không đồng đều do bánh xe cao su gây ra giúp cải thiện những dự đoán số về ứng xử kết cấu của sàn cầu liên hợp (như chuyển vị và biến dạng ngang của tấm sàn thép), tốt hơn so với mô hình tải trọng phân bố đều trước đây. Do đó, mô hình đề xuất trong nghiên cứu này có thể được áp dụng khi mô phỏng các vấn đề liên quan đến tải trọng bánh xe tác dụng lên sàn cầu hoặc nền đường, ...

Từ khóa: Sàn cầu thép; UHPFRC; tải trọng bánh xe; mô hình phần tử hữu hạn.

ABSTRACT

In this paper, a numerical model based on the finite element method is developed to simulate the steel bridge deck reinforced by UHPFRC overlay subjected to static rubber-wheel load. In the present study, a non-uniform vertical pressure distribution model (considering the concentrated distribution of wheel pressure at the center of the contact area) is proposed. The current numerical analysis has shown that the non-uniform load model caused by rubber wheels improves the numerical predictions of the structural behavior of the composite bridge deck (e.g., displacement and lateral deformation of the steel deck plate), which is better than the previous uniform load model. Therefore, the proposed model in this study can be applied when simulating problems related to truck wheel loads acting on the bridge deck or road pavement, etc.

Keywords: Steel bridge deck; UHPFRC; wheel load; finite element model.

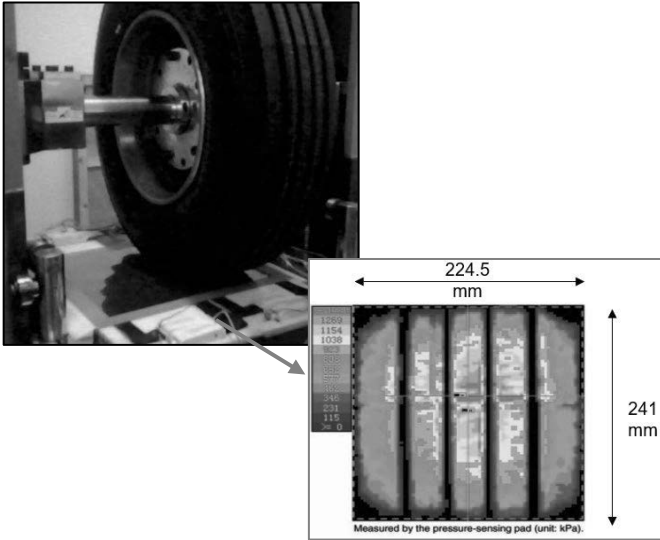
1. GIỚI THIỆU

Sàn cầu thép trực hướng (OSD) đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều năm nay do các ưu điểm nổi trội của nó như trọng lượng bản thân nhẹ, chịu tải trọng tốt và dễ dàng thi công lắp dựng. Tuy nhiên, dưới tác dụng của tải trọng môi do xe cộ gây ra trong nhiều năm, nhiều vết nứt đã được quan sát thấy ở kết cấu dạng này, đặc biệt ở các chi tiết mối hàn. Điều này đã gây ra sự suy giảm nghiêm trọng về mặt hiệu suất của kết cấu [1]. Trong những năm gần đây, với sự phát triển của công nghệ vật liệu đã cho ra đời nhiều sản phẩm tiên tiến có thể dùng để kéo dài tuổi thọ của các sàn cầu thép bị xuống cấp do nứt. Điển hình trong số đó là người ta có thể dùng bê tông cốt sợi cường độ siêu cao (UHPFRC) để làm lớp phủ gia cường cho tấm sàn thép. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng ứng suất môi trong các cấu kiện thép trong sàn cầu thép trực hướng đã giảm một cách đáng kể sau khi áp dụng phương pháp nêu trên [2-4].

Trong số các nghiên cứu liên quan đến sàn cầu trực hướng chịu tác dụng của tải trọng bánh xe, có nhiều nghiên cứu đi theo hướng mô phỏng số để dự đoán ứng xử của sàn cầu sau khi được gia cường bởi lớp phủ UHPFRC [5, 6]. Đây là một phương pháp ít tốn kém so với thực nghiệm, và cũng phù hợp với bất kỳ thông số hình học nào của sàn cầu. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu số trước đây, vấn đề về sự phân bố không đồng đều của áp lực do bánh xe cao su gây ra trên vùng tiếp xúc với sàn cầu thường bị bỏ qua. Nhiều nghiên cứu về ứng suất tiếp xúc giữa bánh xe tải và nền đường đã chỉ ra rằng ứng suất tiếp xúc này phân bố không đồng đều theo cả hai phương ngang và phương xe chạy (dọc) [7, 8], như được thể hiện ở Hình 1. Tuy nhiên, để đơn giản hóa mô hình, tải trọng do bánh xe cao su gây ra thường được lý tưởng hóa (tức là xem như tải phân bố đều) trong các nghiên cứu trước đây. Điều này có thể dẫn đến việc dự đoán thiếu chính xác ứng xử của kết cấu sàn cầu, đặc biệt tại các vị trí nguy

hiếm trên tấm sàn thép.

Trong nghiên cứu hiện tại, phân tích phi tuyến được thực hiện bằng cách sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn MSC/Marc Mentat để mô phỏng sàn cầu thép gia cường bởi lớp phủ UHPFRC chịu tác dụng của tĩnh tải từ bánh xe cao su. Các ứng xử của kết cấu sàn thép như chuyển vị theo phương đứng của tấm sàn cũng như biến dạng tại các vị trí chịu ứng suất tập trung lớn được xem xét và kiểm chứng với các kết quả từ thí nghiệm [9]. Từ thí nghiệm và mô phỏng số hiện tại đã chỉ ra rằng mô hình xem xét đến sự không đồng đều của ứng suất tiếp xúc giữa bánh xe và sàn cầu giúp cho những dự đoán về ứng xử kết cấu tốt hơn so với mô hình tải trọng phân bố đều thông thường.



Hình 1. Thí nghiệm bánh xe cao su chịu lực tĩnh trên tấm cảm biến áp lực và kết quả ứng suất tiếp xúc giữa bánh xe và tấm cảm biến. [7]

2. PHÂN TÍCH SỐ BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

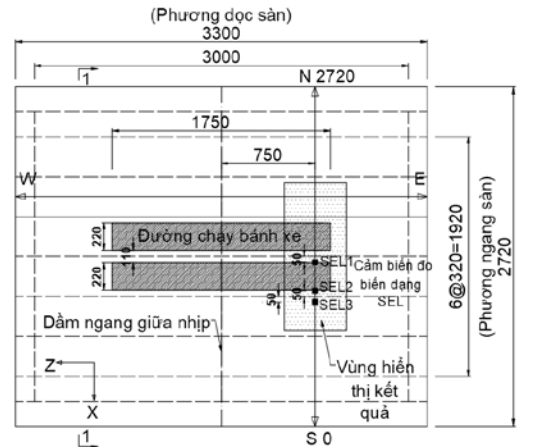
2.1 Mô tả thông số hình học của sàn cầu liên hợp trong thí nghiệm

Hình 2 thể hiện các kích thước chính của sàn cầu liên hợp giữa thép và UHPFRC trong hệ trục tọa độ XYZ. Sàn cầu bao gồm tấm sàn thép dày 12 mm được phủ một lớp UHPFRC dày 25 mm; dầm chính, dầm ngang và các thanh sườn dọc. Kích thước theo phương dọc và phương ngang của tấm sàn thép lần lượt là 3300 mm và 2720 mm. Hai dầm chính có độ cao 690 mm với chiều dày bản bụng là 14 mm. Bên dưới tấm sàn thép được gia cường bởi 7 thanh sườn dọc trực (cách nhau 320 mm) có kích thước là 230 mm × 11 mm × 30 mm; và 3 dầm ngang (cách nhau 1500 mm) có chiều dày bản bụng là 9 mm.

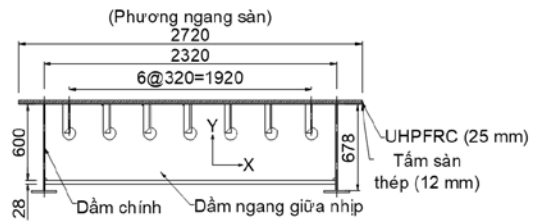
2.2 Mô hình phần tử hữu hạn

Trong nghiên cứu này, phần mềm phần tử hữu hạn MSC/Marc Mentat được dùng để mô phỏng sàn cầu thép được gia cường bởi lớp phủ UHPFRC. Mô hình sàn cầu với các điều kiện tải trọng của sàn cầu liên hợp được thể hiện trong Hình 3. Tấm sàn thép và lớp phủ gia cường UHPFRC được mô phỏng bằng các phần tử khối 8 nút SOLID type 7, với kích thước trung bình của mỗi phần tử là 125×110 mm (dọc × ngang). Các bản bụng và bản cánh của dầm chính, dầm ngang; và các thanh sườn dọc được mô phỏng bằng các phần tử vỏ 4 nút SHELL type 75. Liên kết giữa tấm sàn thép và lớp phủ UHPFRC được giả định là liên kết hoàn hảo (perfect bond) trong mô hình hiện tại.

Các điều kiện biên của trong mô hình số cũng được thể hiện trong Hình 2. Các gối cố định với chiều dài nhịp là 3000 mm được gán bên dưới bốn cạnh bên dưới của dầm chính.

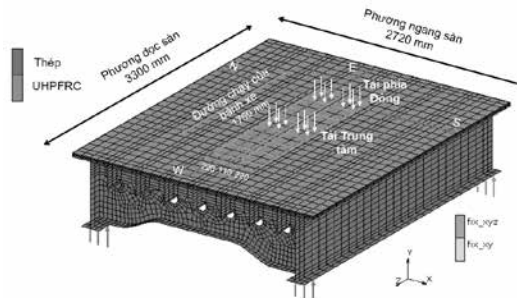


(a) Mặt bằng sàn cầu thép

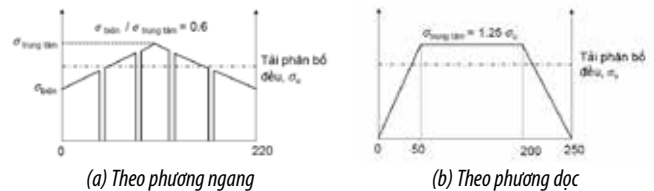


(b) Mặt cắt 1-1

Hình 2. Mô tả hình học sàn cầu thép liên hợp (đơn vị: mm)



Hình 3. Mô hình phần tử hữu hạn của sàn cầu thép



Hình 4. Mô hình tải trọng phân bố không đều trên vùng tiếp xúc giữa bánh xe và tấm sàn thép

Tải trọng gây ra bởi bánh xe cao su được gán dựa theo thiết kế của thí nghiệm. Đường chạy của bánh xe cao su được mô phỏng là 2 đường chạy (tương ứng 2 lớp cao su trong thí nghiệm) theo theo phương dọc sàn với phạm vi là ± 875 mm tính từ dầm ngang giữa nhịp. Khoảng cách theo phương ngang giữa 2 đường chạy của tải trọng trong mô hình là 110 mm. Trong phân tích tĩnh của sàn cầu hiện tại, hai vùng tiếp xúc phía Đông và Trung Tâm của tải trọng bánh xe như trong Hình 2 được tập trung phân tích. Vùng tiếp xúc của lớp cao su và tấm sàn thép là 2×220×250 mm. Tĩnh tải do bánh xe được gán trong mô hình có độ lớn là 100 kN dựa theo điều kiện thí nghiệm.

Trong nghiên cứu hiện tại, mô hình phân bố áp lực thẳng đứng không đồng đều (xem xét đến sự phân bố tập trung áp lực của bánh

xe tại trung tâm của vùng tiếp xúc) được áp dụng, dựa theo các quan sát từ thí nghiệm của Wang và các cộng sự (2013). Theo thí nghiệm trên, dọc theo phương ngang của bánh xe, áp lực thẳng đứng quan sát được tại đường biên của vùng bánh xe tiếp xúc bằng khoảng 60% so với áp lực tại đường trung tâm, như được minh họa trong Hình 4(a). Trong mô hình hiện tại, bốn đường rãnh theo phương ngang của bánh xe cao su cũng được mô phỏng với khoảng cách trung bình là 7.7 mm (dựa theo vết bánh xe quan sát được từ thí nghiệm sàn cầu liên hợp). Trong khi đó, theo phương dọc (phương xe chạy), sự phân bố áp lực có dạng hình thang cân, trong đó đáy trên của hình thang được quan sát bằng khoảng 0,6 chiều dài của vùng bánh xe tiếp xúc theo phương dọc (xem Hình 4(b)). Áp lực thẳng đứng tại cạnh trên hình thang bằng 1.25 lần khi so với áp lực do phân bố đều (σ_u) tải trọng bánh xe trên vùng tiếp xúc.

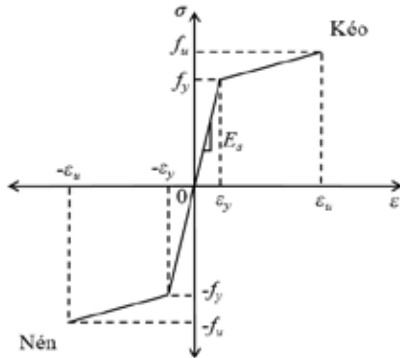
2.3 Mô hình vật liệu

2.3.1 Thép

Mô hình vật liệu của thép được sử dụng trong nghiên cứu này là mô hình đàn dẻo lý tưởng bao gồm hai giai đoạn như trong Hình 5. Cường độ chảy f_y và cường độ tới hạn f_u của vật liệu thép lần lượt là 365 MPa và 490 MPa, với biến dạng tới hạn là 20%. Tiêu chuẩn chảy dẻo của thép tuân theo tiêu chuẩn Von Mises. Trong nghiên cứu này, hệ số Poisson và mô-đun đàn hồi của thép 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:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E_s \varepsilon & (\varepsilon \leq \varepsilon_y) \\ f_y + (f_u - f_y) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_y} \right) & (\varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_u) \end{cases} \quad (1)$$



Hình 5. Biểu đồ ứng suất-biến dạng của thép

2.3.2 UHPFRC

Mối quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu UHPFRC khi chịu kéo và chịu nén được thể hiện trong Hình 6; và được trình bày trong các công thức như sau:

• Khi chịu kéo:

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

• Khi chịu nén:

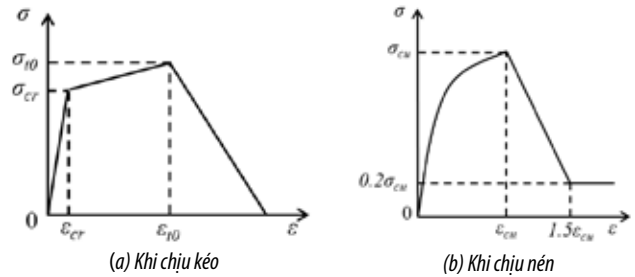
$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} \sigma_{cu} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu}} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu}} \right) & (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}) \\ \sigma_{cu} + 1.6 \sigma_{cu} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu}} \right) & (\varepsilon_{cu}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

Hình 6 (a) thể hiện ứng xử của UHPFRC khi chịu kéo gồm 3 giai

đoạn. Trong giai đoạn đàn hồi (trước khi nứt), 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 vật liệu chính khác của UHPFRC được liệt kê trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số vật liệu của UHPFRC

Vùng	Thông số vật liệu	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Kéo	Giới hạn nứt	σ_{cr}	6	MPa
		ε_{cr}	0.00019	
	Giới hạn bền	σ_{t0}	9	MPa
		ε_{t0}	0.00175	
	Biến dạng tới hạn	ε_{tu}	0.01200	
Nén	Giới hạn bền	σ_{cu}	133	MPa
		ε_{cu}	0.00850	



Hình 6. Mô hình vật liệu của UHPFRC

3. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH VÀ THẢO LUẬN

Trong phần này, để thuận tiện theo dõi, hai mô hình số chính trong nghiên cứu hiện tại sẽ được ký hiệu như sau:

- Mô hình sàn cầu thép có gia cường bằng UHPFRC: *mô hình SU*.
- Mô hình sàn cầu thép không có gia cường với UHPFRC: *mô hình S*.

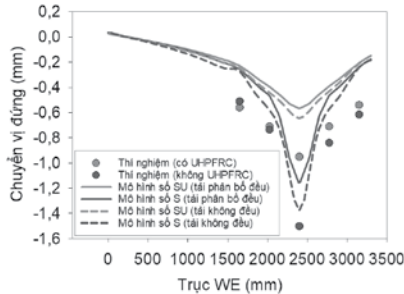
3.1 Kết quả chuyển vị trên tấm sàn thép

Kết quả chuyển vị từ thí nghiệm được đo bằng các cảm biến chuyển vị (LVDT) đặt bên dưới tấm sàn thép dọc theo trục WE. Theo quan sát từ thí nghiệm, dưới tác dụng của Tải phía Đông, giá trị chuyển vị trên tấm sàn thép là lớn nhất, do đó kết quả chuyển vị trên tấm sàn thép sẽ được tập trung thảo luận cho trường hợp tải này.

Kết quả chuyển vị đứng của tấm sàn thép dọc theo trục WE thu được từ mô hình phần tử hữu hạn được thể hiện ở Hình 7, ứng với trường hợp Tải phía Đông. Trong đó, các ký hiệu chấm tròn (dot) thể hiện các kết quả thí nghiệm, và các ký hiệu đường (line) thể hiện các kết quả từ mô hình số. Trong Hình 5, ta có thể thấy một cách rõ ràng rằng có những sai khác khá lớn giữa kết quả thí nghiệm so với kết quả từ mô hình số trong điều kiện tải phân bố đều. Tuy nhiên, sau khi áp dụng mô hình tải phân bố không đều cho cả phương ngang và dọc của vùng tiếp xúc (như được trình bày trong mục 2.2 bên trên), thì độ chính xác của mô hình số đã được cải thiện một cách đáng kể, đặc biệt là đối với mô hình S (không có UHPFRC).

Đầu tiên, ta sẽ phân tích mô hình số SU trước. Trong mô hình này, giá trị chuyển vị lớn nhất tại vùng tác dụng của Tải phía Đông đã tăng từ 0.56 mm lên 0.65 mm sau khi áp dụng điều kiện tải phân bố không đều. Qua đó đã cải thiện độ chính xác tăng lên 10% khi so sánh với kết quả từ thí nghiệm. Tiếp theo đó, trong mô hình số S với tải bánh xe không đều, chuyển vị cực đại trong tấm sàn thép cũng tăng từ 1.15 mm lên 1.38 mm, gần tiệm cận với giá trị thí nghiệm là 1.50 mm. Độ chính xác của mô hình từ đó cũng đã được cải thiện một cách rõ ràng, với sai số giảm từ 23.3% xuống chỉ còn 8%. Sự tăng giá trị chuyển vị đúng trong tấm sàn thép trong hai mô hình S và SU là dễ hiểu khi có sự tập trung ứng suất tại trung tâm của vùng tiếp xúc giữa bánh lốp và tấm sàn khi áp dụng mô hình tải trọng không đồng đều (xem Hình 4).

Qua kết quả từ các mô hình bên trên, có thể thấy rằng việc áp dụng mô hình tải trọng không đồng đều đã giúp cho việc mô phỏng số trong nghiên cứu hiện tại tiến gần hơn tới điều kiện thực tế trong thí nghiệm dưới tải trọng của tải bánh lốp.

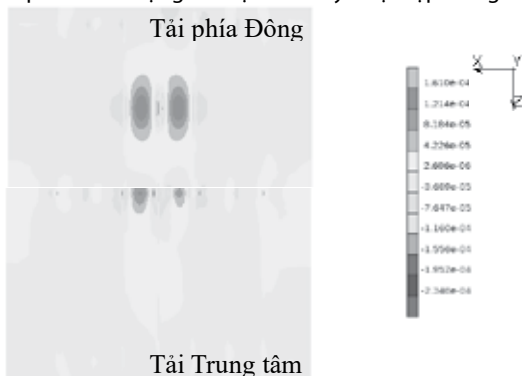


Hình 7. Chuyển vị theo phương đứng của tấm sàn thép dọc theo trục WE dưới tác dụng của Tải phía Đông

Trong Hình 7, khi so sánh hai mô hình số S và SU với điều kiện tải không đồng đều tại vị trí Tải phía Đông, ta có thể thấy rằng giá trị chuyển vị lớn nhất của tấm sàn thép đã giảm đến 53% sau khi gia cường bằng lớp phủ UHPFRC. Điều này chứng tỏ độ cứng tổng thể của sàn cầu thép đã được tăng lên đáng kể với sự có mặt của lớp phủ này.

3.2 Kết quả biến dạng dưới tấm sàn thép

Trong thí nghiệm, kết quả biến dạng tại mặt bên dưới tấm sàn thép được đo bằng các cảm biến đo biến dạng được đặt dọc theo trục SN (xem Hình 2(a)). Cũng giống như các quan sát từ kết quả chuyển vị, các kết quả biến dạng lớn nhất bên dưới tấm sàn thép cũng đều quan sát được dưới tác dụng của Tải phía Đông, như được thể hiện trong Hình 8. Do vậy, các kết quả biến dạng của tấm sàn thép dưới tác động của vị trí tải này được tập trung thảo luận.

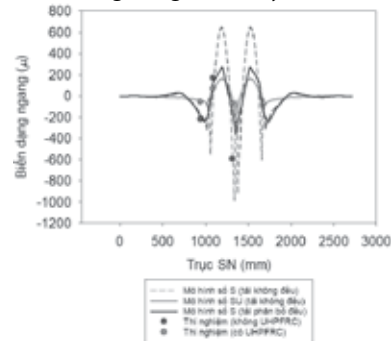


Hình 8. Phân bố biến dạng ngang trong nửa tấm sàn chịu Tải phía Đông và Tải Trung tâm

Hình 9 trình bày các đường phân bố biến dạng dọc theo trục SN thu được từ hai mô hình số S và SU. Các kết quả thí nghiệm được thể hiện bằng ký hiệu chấm tròn (dot).

Xem xét mô hình số S cho hai trường hợp tải trọng phân bố đều và không đều, rõ ràng mô hình số trong trường hợp tải không đều cho độ chính xác tốt hơn khi so sánh với dữ liệu thí nghiệm, đặc biệt tại vị trí nguy hiểm nằm ở gần giữa nhịp. Tại vị trí này (giữa trục SN), giá trị biến dạng ngang lớn nhất trong mô hình S với tải trọng phân bố đều là khá nhỏ, và không thể mô phỏng được ứng xử cục bộ tại vị trí nguy hiểm này. Trong khi đó, với sự tập trung ứng suất tại giữa vùng tiếp xúc của sàn và bánh lốp, điều kiện tải không đồng đều trong mô hình S đã làm gia tăng đáng kể giá trị biến dạng ngang cũng như chuyển vị cục bộ tại khu vực bánh lốp tiếp xúc mặt sàn, cũng như khu vực giữa trục SN (nơi có 1 sườn dọc gia cường ngay bên dưới). Điều này dẫn đến việc các kết quả biến dạng ngang dưới tấm sàn thép trong mô hình số cũng được cải thiện một cách rõ rệt. Tóm lại, mô hình tải trọng được đề xuất trong nghiên cứu này là phù

hợp với điều kiện thực tế và hiệu quả để áp dụng thay thế cho mô hình lý tưởng hóa thường dùng trước đây.



Hình 9. Đường phân bố biến dạng theo phương X dọc theo trục SN

Cũng từ Hình 9, ta có thể dễ dàng nhận thấy rằng giá trị biến dạng dọc theo trục SN của tấm sàn thép trong mô hình S luôn luôn lớn hơn trong mô hình SU. Đối với vị trí nguy hiểm nhất bên dưới tấm sàn thép, giá trị biến dạng đã giảm lên đến 82.53% (-921.4μ trong mô hình S và -160.9μ trong mô hình SU) do tác dụng gia cường của lớp phủ UHPFRC. Qua đó cũng chứng minh được hiệu quả gia cường của phương pháp sử dụng lớp phủ này.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, phân tích phần tử hữu hạn được tiến hành để mô phỏng sàn cầu thép gia cường bởi lớp phủ UHPFRC chịu tác dụng của tĩnh tải từ bánh xe cao su. Từ mô hình số hiện tại đã chỉ ra rằng mô hình tải trọng không đồng đều do bánh xe cao su gây ra giúp cải thiện những dự đoán số về ứng xử kết cấu của sàn cầu liên hợp tốt hơn so với mô hình tải trọng phân bố đều trước đây. Do đó, mô hình đề xuất trong nghiên cứu này được khuyến khích sử dụng khi mô phỏng các vấn đề liên quan đến tải trọng bánh xe tải tác dụng lên sàn cầu hoặc nền đường,...

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả 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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Zhang, S., Shao, X., Cao, J., Cui, J., Hu, J. & Deng L. 2016. Fatigue performance of a lightweight composite bridge deck with open ribs. *J Bridge Eng (ASCE)*; 21(7):04016039.
- [7] Wang, W., Yan, S. & Zhao, S. 2013. Experimental verification and finite element modeling of radial truck tire under static loading. *J Reinf Plast Compos*; 32(7): 490-498.
- [8] De Beer, M. & Fisher C. 2013. Stress-In-Motion (SIM) system for capturing tri-axial tyre-road interaction in the contact patch. *Measurement*; 46:2155-2173.
- [9] 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.