

NGHIÊN CỨU CƯỜNG ĐỘ CHỊU UỐN CỦA BẢN LIÊN TỤC NHIỆT BÊ TÔNG CỐT SỢI THÉP BẰNG PHẦN TỬ HỮU HẠN

FINITE-ELEMENT ANALYSIS OF FLEXURAL STRENGTH OF STEEL FIBER-REINFORCED CONCRETE LINK SLABS

Mai Lữ

Khoa Công trình giao thông

Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Một trong những yếu tố ảnh hưởng đến khả năng khai thác của kết cấu công trình cầu dầm nhịp giản đơn đó là các khe co giãn. Trong thực tế khai thác, các khe co giãn thường bị hư hỏng do lực xung kích lớn từ xe cộ lưu thông qua các vị trí này và từ đó nước rò rỉ gây hư hỏng các kết cấu bên dưới, ngăn cản biến dạng của kết cấu nhịp. Để khắc phục những vấn đề này thì việc sử dụng bản liên tục nhiệt bằng bê tông cốt sợi thép (SFRC) là một giải pháp hợp lý. Nghiên cứu này sẽ đánh giá khả năng chịu uốn của bản liên tục nhiệt với vật liệu SFRC bằng mô hình phần tử hữu hạn và so sánh với kết quả thực nghiệm. Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng chịu uốn của bản liên tục nhiệt được xác định từ mô hình số đề xuất khá chính xác với mô hình thực nghiệm.

Từ khóa: Bản liên tục nhiệt, bê tông cốt sợi thép, phần tử hữu hạn, cường độ chịu uốn.

Chỉ số phân loại: 2.4

Abstract: One of the main factors affecting the serviceability of multi-span simply supported bridges are expansion joints at pier locations. In the service stage, expansion joints are usually damaged due to the dynamic impact induced by heavy vehicles crossing them. It can lead to water leaking through the joints causing the deterioration of bridge girder supporting structure and restraint of deck expansion by debris accumulation. Therefore, elimination of expansion joints by using deboned link slabs of steel fiber-reinforced concrete (SFRC) is a potential solution to reduce the cost of maintenance and improve the serviceability of bridges. In this study, a numerical analysis model was established based on a finite element method to investigate the flexural strength performance of the SFRC link slab on a scale test model. It was found that the predicted ultimate flexural strength using finite element analysis agreed reasonably-well with the experimental result.

Keywords: Link slab, steel fiber-reinforced concrete, finite element method, flexural strength.

Classification number: 2.4

1. Giới thiệu

Kết cấu cầu dầm giản đơn nhiều nhịp với bản mặt cầu bê tông cốt thép là kết cấu có rất nhiều ưu điểm như đảm bảo chất lượng bê tông các cấu kiện lắp ghép, sản xuất hàng loạt theo mô đun để giảm giá thành và đặc biệt là thi công nhanh nên thường được lựa chọn trong hầu hết các thiết kế công trình cầu. Tuy nhiên, giữa các nhịp dầm thường phải được nối tiếp với nhau bằng các khe co giãn cao su hoặc bằng thanh ray, răng lược, ... Việc sử dụng các loại khe co giãn này sau một thời gian thường hay bị bong bật và phải sửa chữa nhiều lần hoặc vấn đề kẹt khe co giãn cũng thường xuyên xảy ra. Một điều đáng quan tâm khác là việc sử dụng các khe co giãn gần như không đảm bảo tính êm thuận và an toàn cho vận hành xe cộ. Đây là một trong những vấn đề quan trọng cần phải xem xét trong thiết kế cầu hiện đại. Do đó, sử

dụng bản liên tục nhiệt để giảm tối đa số lượng các khe co giãn là giải pháp hiệu quả và khắc phục gần như hoàn toàn các nhược điểm ở trên. Tuy nhiên, từ tính toán lý thuyết đến thực tế sử dụng cho thấy bản liên tục nhiệt chịu lực kéo uốn rất lớn do nhiều tác nhân gây ra như xoay đầu dầm do hoạt tải trên kết cấu nhịp, thay đổi nhiệt độ, các ảnh hưởng thứ cấp do co ngót, từ biến... tạo nên một hệ kết cấu làm việc khá phức tạp và khó kiểm soát. Vì vậy, rất nhiều công trình sau khi đưa vào sử dụng vẫn xuất hiện nhiều vết nứt tại bản liên tục nhiệt mặc dù đã sử dụng một lượng cốt thép gia cường gần như gấp đôi so với cốt thép thông thường của bản mặt cầu. Nguyên nhân chính là do ứng suất kéo xuất hiện trong bản nổi vượt quá khả năng chịu lực của bê tông thông thường. Do đó, việc nghiên cứu ứng dụng bê tông cốt sợi trong bản liên tục nhiệt là một giải pháp rất

tiềm năng bởi vì chúng có khả năng làm tăng tính dẻo dai của bê tông thường, làm chậm quá trình phát triển vết nứt và giảm đáng kể quá trình co ngót ảnh hưởng đến sự hình thành vết nứt... Những ưu điểm này đã được khẳng định trong nhiều nghiên cứu trong và ngoài nước.

Việc sử dụng bê tông cốt sợi cường độ cao để tăng tính dẻo dai trong bản liên tục nhiệt đã được nghiên cứu ứng dụng thực tế rất phổ biến trên thế giới, phổ biến nhất là tại Mỹ và Nhật. Loại bê tông cốt sợi thường được sử dụng với tên phổ biến là ECC (Engineered Cementitious Composite) với cốt sợi thường dùng loại PVA (Polyvinyl Alcohol Fiber). Theo nghiên cứu gần đây của Lepech [1], Yun [2] cho thấy rằng bề rộng vết nứt trên bản liên tục nhiệt giảm đáng kể khi sử dụng vật liệu ECC do khả năng biến dạng của nó có thể lên đến 4%, nghĩa là tăng 400 lần so với bê tông thông thường. Tuy nhiên, cốt sợi PVA do Việt Nam chưa sản xuất được nên giá thành còn cao, chưa phù hợp với điều kiện Việt Nam. Theo báo cáo của Behbahani [3] cho thấy bê tông cốt sợi thép (SFRC), loại vật liệu được ứng dụng rộng rãi hiện nay, cũng có thể hạn chế vết nứt một cách hiệu quả, tăng khả năng chịu kéo uốn khá lớn và giảm độ cứng của kết cấu bản liên tục nhiệt. Vì vậy đây là vật liệu có tiềm năng rất lớn để ứng dụng trên một số cấu kiện đặc biệt trong công trình cầu tại nước ta.

Bên cạnh đó, việc đánh giá khả năng chịu lực của bản liên tục nhiệt sử dụng vật liệu bê tông cốt sợi thép là rất quan trọng trong thiết kế thực tế. Tuy nhiên, cho đến nay việc nghiên cứu kết cấu này vẫn rất hạn chế, kể cả trong và ngoài nước để đánh giá khả năng chịu lực, đặc biệt là khả năng chịu uốn của bản liên tục nhiệt sử dụng bê tông cốt sợi thép. Việc phân tích cơ cấu truyền lực từ kết cấu dầm sang bản liên tục nhiệt rất phức tạp do sự lệch tâm giữa bản liên tục nhiệt và kết cấu dầm, sự tương tác tiếp xúc giữa đầu dầm và bản liên tục nhiệt, nhiều dạng tải trọng kết hợp làm phát sinh hệ nội lực trong bản liên tục nhiệt khó kiểm soát ... Ngoài ra, đối với vật liệu bê tông cốt sợi thép thì ứng xử khi chịu uốn cũng khác với bê tông thông thường do xuất hiện một cách ngẫu nhiên các sợi cốt

thép làm tăng khả năng chịu kéo khi uốn một cách rõ rệt, kể cả khi thiết diện bị nứt. Vì vậy, bài báo trình bày một mô hình thí nghiệm để đánh giá khả năng chịu uốn của bản liên tục nhiệt làm bằng bê tông cốt sợi thép. Sau đó, một mô hình phần tử hữu hạn để mô phỏng mô hình thí nghiệm. Trong mô hình số, nghiên cứu đã xét tính chất phi tuyến của vật liệu bê tông cốt sợi thép, các tương tác phức tạp nơi tiếp xúc giữa đầu dầm và bản liên tục nhiệt để mô phỏng chính xác nhất có thể mô hình thí nghiệm bản liên tục nhiệt. Việc xây dựng mô hình số để đánh giá khả năng chịu lực của bản liên tục nhiệt trong nghiên cứu này có ý nghĩa quan trọng đối với thiết kế thực tế, bởi vì dựa trên mô hình số để xuất, việc mô phỏng những kết cấu thực tế phức tạp hơn hoàn toàn có thể thực hiện được mà vượt quá khả năng làm các thí nghiệm kiểm chứng. Đây cũng là tiền đề để phát triển các nghiên cứu liên quan trong tương lai, giúp việc xây dựng cơ sở lý thuyết thiết kế bản liên tục nhiệt bằng bê tông cốt sợi thép một cách chính xác nhất có thể và tiến đến ứng dụng trong công trình thực tế.

2. Mô hình thí nghiệm đánh giá khả năng chịu uốn của bản liên tục nhiệt bằng vật liệu bê tông cốt sợi thép

2.1. Cấp phối vật liệu

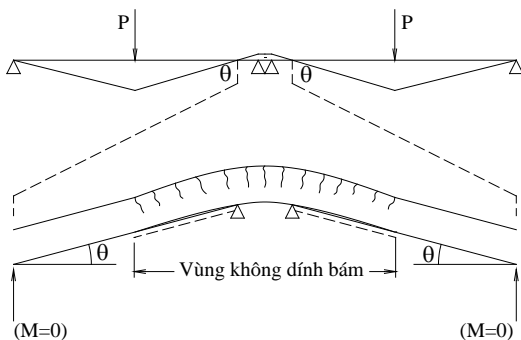
Bê tông cốt sợi thép sử dụng trong nghiên cứu này có cốt liệu lớn là đá mi DID được lấy tại mỏ Hóa An – Bình Dương, cốt sợi thép là sợi thép Dramix của hãng BEKAERT có chiều dài sợi 35 mm và đường kính sợi 0,55 mm. Cường độ mục tiêu của SFRC khoảng từ C45 đến C55 theo mẫu lăng trụ với độ tin cậy tối thiểu 0,95. Từ các kết quả thí nghiệm của các mẫu nén ứng với nhiều trường hợp cấp phối khác nhau và dựa theo lý thuyết quy hoạch thực nghiệm thì cấp phối được sử dụng trong nghiên cứu này được xác định và trình bày tại bảng 1.

Bảng 1. Cấp phối SFRC cho kết cấu bản liên tục nhiệt bằng bê tông cốt sợi thép.

N/X	XM	N	Cát	Đá	Siêu dẻo	Sợi thép
	kg	lít	kg	kg	lít/100 kg XM	kg
0,34	523	177,4	650	110 2	0,66	62,5

2.2. Mô hình thí nghiệm bản liên tục nhiệt

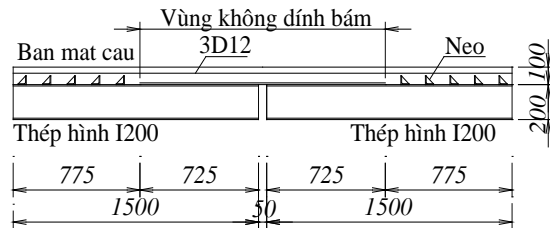
Mô men uốn xuất hiện trong bản liên tục nhiệt chủ yếu là do biến dạng của hai dầm lân cận tạo ra. Do đó kết cấu thí nghiệm bao gồm một bản liên tục nhiệt bằng vật SFRC nối hai đoạn dầm thép ở hai bên thông qua bản mặt cầu bằng bê tông cốt thép thường được liên hợp với dầm thép. Theo nghiên cứu của GS. Victor C. Li tại phòng thí nghiệm của Đại học Michigan [2], biến dạng uốn trong bản liên tục nhiệt chủ yếu là do ba yếu tố chính: Tương tác tiếp xúc phần đầu dầm không dính bám với bản liên tục nhiệt (debonded area), chuyển vị thẳng theo phương đứng và chuyển vị xoay cưỡng bức từ kết cấu dầm truyền vào bản liên tục nhiệt. Do đó, để đơn giản hơn trong thí nghiệm nhưng vẫn đảm bảo ba yếu tố tương tác ở trên, phạm vi dầm làm thí nghiệm sẽ được rút ngắn lại như hình 1 và đây còn gọi là mô hình dầm lật ngược.



Hình 1. Mô hình bản liên tục nhiệt liên kết hai dầm [2].

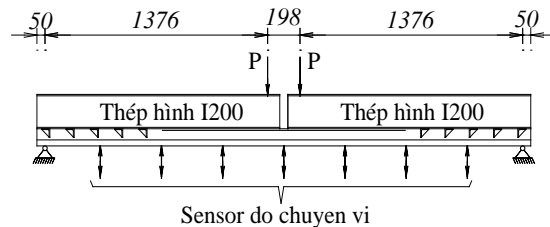
Trong nghiên cứu này sẽ sử dụng ý tưởng mô hình dầm lật ngược đã phân tích ở trên và mô hình nghiên cứu được thể hiện hình 2. Các thông số cơ bản của mô hình bao gồm: Hai dầm thép hình loại I200-Posco dài 1500 mm và được đặt với khoảng cách 2 đầu dầm là 50 mm; phía trên là tấm bê tông cốt thép thường có $f_c = 42\text{MPa}$, chiều dày 100 mm và bề rộng 300 mm, chiều dài 775 mm

được liên kết với dầm qua hệ neo; chiều dài bản liên tục nhiệt là $725 + 50 + 725 = 1500$ mm đặt trên vùng không dính bám với đầu dầm và bằng vật liệu SFRC có cường độ $f_c = 52\text{MPa}$. Bố trí ba thanh thép đường kính $\phi 12$ cách mặt trên bản mặt cầu 35 mm và chạy suốt trên chiều dài các dầm.



Hình 2. Cấu tạo kết cấu dầm thí nghiệm (đơn vị mm).

Sau khi đúc dầm và bảo dưỡng đạt cường độ, tiến hành lật ngược dầm, lắp đặt các thiết bị để gia tải và đo các chuyển vị cần thiết như hình 3 và hình 4.



Hình 3. Sơ đồ gia tải và bố trí sensor đo chuyển vị.



Hình 4. Mô hình thực hiện trong phòng thí nghiệm.

Tiến hành gia tải và dùng các sensor để độ lớn của tải trọng và chuyển vị theo thời gian gia tải. Kết quả thí nghiệm sẽ được trình bày và đánh giá trong các phần tiếp theo.

3. Mô hình phần tử hữu hạn

Trong phần này sẽ tập trung nghiên cứu mô phỏng ứng xử phi tuyến của mô hình thí nghiệm bằng phần mềm Abaqus. Đối với việc mô phỏng kết cấu trên thì vấn đề mô tả số về tiếp xúc giữa phần bản liên tục nhiệt với đầu dầm và sự làm việc phi tuyến vật liệu bê tông cốt sợi thép rất quan trọng.

Các mô phỏng tiếp xúc trong Abaqus có thể dựa trên bề mặt tiếp xúc hoặc phần tử tiếp xúc. Mô phỏng tiếp xúc dựa trên bề mặt được sử dụng phổ biến hơn. Tiếp điểm dựa trên bề mặt có thể sử dụng thuật toán “tiếp xúc chung” (General Contact) hoặc thuật toán “tiếp xúc ghép đôi” (Contact Pair). Thuật toán “tiếp xúc chung” (General Contact) cho phép kết nối tự động hóa cao. Ngược lại, thuật toán “tiếp xúc ghép đôi” yêu cầu người dùng kết nối một cách rõ ràng các bề mặt có khả năng tiếp xúc với nhau. Cả hai thuật toán đều yêu cầu xác định các đặc tính tiếp xúc giữa các bề mặt như hệ số ma sát, mặt chính - mặt phụ, phương pháp rời rạc mặt tiếp xúc. Trong nghiên cứu này sẽ sử dụng phương pháp bề mặt tiếp xúc.

Đối với mô hình bê tông phi tuyến, Abaqus sử dụng mô hình CDP (Concrete Damage Plasticity), đây là một mô hình được nhiều nghiên cứu đánh giá cao bởi độ chính xác của nó so với nhiều kết quả thí nghiệm. Mô hình cho phép định nghĩa ứng xử phi tuyến của bê tông chịu kéo và nén, kể cả các đặc điểm phá hoại vùng kéo và vùng nén.

• **Quan hệ giữa ứng suất nén và biến dạng tương ứng của bê tông cốt sợi thép**

Để tiếp cận được mô hình phá hủy CDP trong Abaqus, mối quan hệ giữa ứng suất nén và biến dạng, cũng như ứng suất kéo và biến dạng phải được phân tích. Trong nghiên cứu này, đường cong $\sigma_c - \varepsilon_c$ cho bê tông cốt sợi thép được sử dụng theo nghiên cứu của Barros [4] và mô tả như phương trình (1).

$$\sigma_c = \sigma_{cu} \frac{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}{(1-p-q) + q \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right) + p \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^{(1-q)/p}} \quad (1)$$

Trong đó:

σ_{cu} là cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông cốt sợi thép theo mẫu lăng trụ đường kính 150 mm và cao 300 mm;

$$q = 1 - p - \frac{E_{c1}}{E_{ci}}; p + q \in]0, 1[; \frac{1-q}{p} > 0;$$

Biến dạng ε_{c1} tương ứng với ứng suất σ_{cu} cũng như các tham số cơ học của vật liệu phụ

thuộc vào hàm lượng theo thể tích của cốt sợi thép W_f được sử dụng trong bê tông.

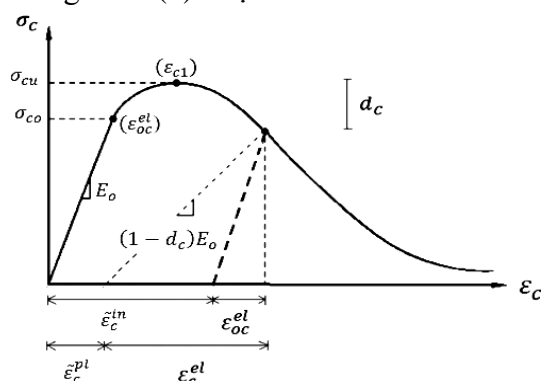
Tham số p có giá trị từ 0 đến 1 và được xác định bằng cực tiểu đại lượng bình phương sai số như sau:

$$e^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{ci}^r - \sigma_{ci}^c}{\sigma_{cu}} \right)^2 \quad (2)$$

Trong đó: $\sigma_{ci}^r, \sigma_{ci}^c$ là các ứng suất thu được trong thí nghiệm nén mẫu và được tính toán theo phương trình (1); n là số mẫu khảo sát. Đối với loại cốt sợi thép ZP30/0.5 mà được sử dụng trong nghiên cứu này, Barros đã đề nghị tính toán biến dạng ε_{c1} theo hàm lượng cốt sợi như sau:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c1} &= \varepsilon_{c0} + 0,0002W_f \\ p &= 1,0 - 0,919 \exp(-0,394W_f) \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó: Biến dạng $\varepsilon_{c0} = 2,2 \cdot 10^{-3}$ được lấy theo CEB-FIB Model code 1990. Khi đó, phương trình (1) được biểu diễn như hình 5.



Hình 5. Mô hình bê tông CDP dưới ứng suất nén.

Biến dạng không đàn hồi (Inelastic strain) ε_c^{in} tương ứng với ứng suất nén σ_c đã được sử dụng trong mô hình CDP. Để có được các giá trị này, người ta phải thay thế tổng biến dạng từ biến dạng đàn hồi ε_{oc}^{el} , tương ứng với vật liệu không bị phá hủy như sau:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c^{in} &= \varepsilon_c - \varepsilon_{oc}^{el} \\ \varepsilon_{oc}^{el} &= \frac{\sigma_{c0}}{E_o} \end{aligned} \quad (4)$$

Ngoài ra, tham số độ bền nén d_c cần được xác định ở mỗi mức biến dạng không đàn hồi. Giá trị của d_c dao động từ 0 (đối với vật liệu chưa bị phá hủy) đến 1 (khi vật liệu đó hoàn toàn mất khả năng chịu tải). Giá trị

d_c chỉ thu được cho nhánh giảm dần của đường cong ứng suất - biến dạng của bê tông chịu nén:

$$d_c = 0 \quad \text{khi } \varepsilon_c < \varepsilon_{c1}$$

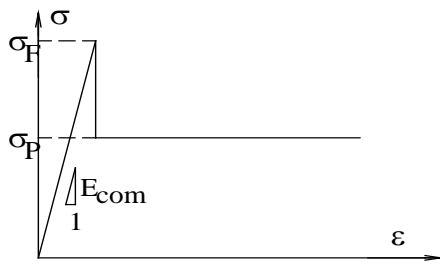
$$d_c = \frac{\sigma_{cu} - \sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad \text{khi } \varepsilon_c \geq \varepsilon_{c1}$$

Biến dạng dẻo tính toán trong phương trình trên phải luôn luôn dương:

$$\bar{\varepsilon}_c^{pl} = \bar{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_{c0}}{E_0} \quad (5)$$

• **Quan hệ giữa ứng suất kéo và biến dạng tương ứng của bê tông cốt sợi thép**

Để mô tả ứng suất kéo và biến dạng của vật liệu SFRC, Sujivorakul [5] đã làm rất nhiều thí nghiệm ứng với các loại cường độ bê tông, hàm lượng cốt sợi thép khác nhau và đã đề xuất mối quan hệ ứng suất kéo và biến dạng như hình 6, thể hiện mối quan hệ này phương trình (6), (7). Nghiên cứu của Sujivorakul cũng được RILEM2012 công bố.



Hình 6. Mô hình bê tông CDP dưới ứng suất kéo.

Ứng suất kéo lớn nhất (σ_F) và ứng suất kéo sau khi hình thành vết nứt (σ_P) trong bê tông cốt sợi thép được xác định như sau:

$$\sigma_F = k_1 \sqrt{f_c}; k_1 = 0,3481 + 0,1329W_f$$

$$\sigma_P = k_2 \sqrt{f_c} \quad (6)$$

$$k_2 = (-0,001W_f^2 + 0,0038W_f) \frac{L_f}{D_f} L_f^{0,2}$$

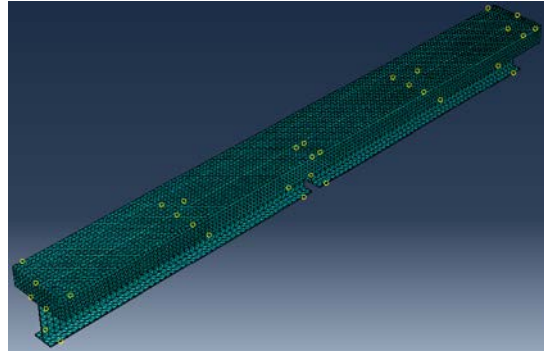
Và mô đun đàn hồi:

$$E_{com} = E_c(1 - W_f) + E_f W_f \quad (7)$$

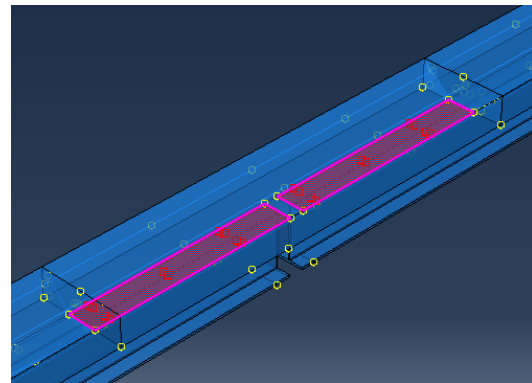
Trong đó: E_c và E_f là mô đun đàn hồi của bê tông và cốt sợi thép; L_f và D_f lần lượt là chiều dài và đường kính của cốt sợi thép.

Một số tham số khác trong mô hình CDP được chọn như sau (Kmieciak và Kaminski 2011): Góc giãn nở (dilation angle) = 36° , độ lệch tâm thế năng dòng chảy (flow potential

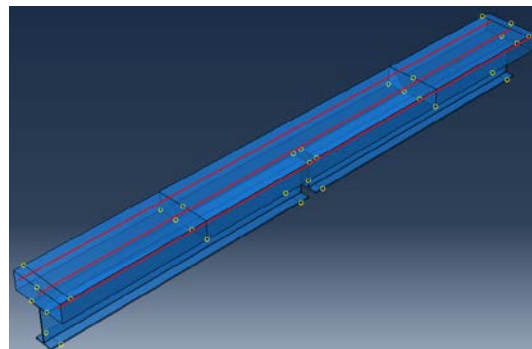
eccentricity) = 0,1 và tham số độ nhớt (viscosity parameter) = 0; tỷ số của cường độ trong trạng thái hai trục và cường độ trong trạng thái đơn trục, $\sigma_{n0}/\sigma_{c0} = 1,16$; và tỷ lệ bất biến ứng suất thứ hai trên kinh tuyến kéo, $k_c = 0,666$. Tiến hành mô phỏng kết cấu dầm lật ngược trong phần thí nghiệm bên trên, kết quả mô phỏng trong Abaqus được thể hiện như hình 7 đến hình 9.



Hình 7. Mô hình kết cấu dầm và bản liên tục nhiệt trong Abaqus.



Hình 8. Mô hình tiếp xúc giữa đầu dầm và bản liên tục nhiệt.

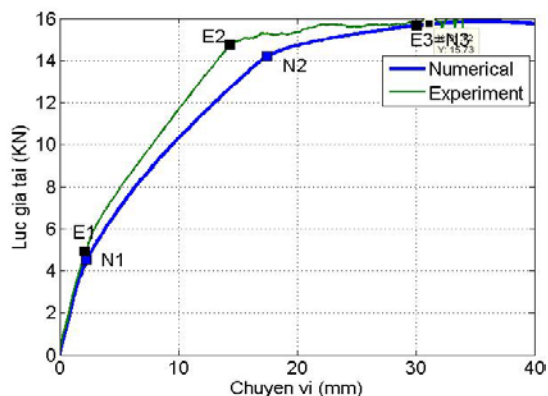


Hình 9. Mô hình cốt thép thanh trong bản mặt cầu.

• **Đánh giá kết quả**

Tiến hành gia tải kết cấu dầm liên hợp với bản mặt cầu theo mô hình dầm lật ngược. Sử dụng Loadcell và các sensor để thu thập tải trọng và chuyển vị một cách tương ứng. Đối với mô hình phần tử hữu hạn trong

Abaqus cũng tiến hành phân tích với bước thời gian phân tích khá nhỏ 0,001 để đảm bảo lời giải hội tụ. Kết quả lực gia tải và chuyển vị tại điểm giữa bản liên tục nhiệt được biểu diễn như hình 9.



Hình 9. Biểu đồ lực và chuyển vị theo thí nghiệm (Experiment) và mô phỏng bằng phần tử hữu hạn (Numerical).

Kết quả so sánh từ hình 9 cho thấy rằng: Các biểu đồ từ thí nghiệm thực tế và từ mô phỏng số đều thể hiện rõ ba giai đoạn làm việc: Giai đoạn thiết diện làm việc trong giai đoạn đàn hồi không có vết nứt (OE1 và ON1), giai đoạn thiết diện hình thành vết nứt ở bê tông vùng kéo (E1E2 và N1N2) và giai đoạn phi tuyến (E2E3 và N2N3). Dầm phá hủy tại điểm E3 và N3. Tải trọng giới hạn trong giai đoạn đàn hồi từ mô hình thí nghiệm (E1) là 4,95 KN ứng với chuyển vị là 2,202 mm; dự đoán kết quả từ mô hình số (N1) là 4,647 KN và chuyển vị là 2,403 mm. Kết cấu bắt đầu phá hủy đối với thí nghiệm tại điểm E2 có tải trọng là 14,37 KN và chuyển vị là 14,79 mm; đối với mô hình số là 14,17KN và 17,43mm tương ứng. Đối với tải trọng khi kết cấu đạt giới hạn cực hạn thì cả hai mô hình gần như trùng khớp với nhau ở giá trị khoảng 15,43 KN và 15,71 KN. Qua các giá trị trên có thể thấy rằng mô hình số đánh giá các giá trị tải trọng theo các giai đoạn rất sát với mô hình thực nghiệm. Riêng chuyển vị dầm ở điểm bắt đầu giai đoạn ba (E2 và N2) chênh lệch nhau khoảng 3 mm và giá trị tải trọng chênh lệch không đáng kể. Đặc biệt, điểm bắt đầu xuất hiện vết nứt thì giữa hai mô hình gần như rất giống nhau. Các kết quả này rất có ý nghĩa trong việc đánh giá kết cấu công trình thực tế khi cần phải dự báo khả năng chịu lực ở trạng thái

giới hạn sử dụng và trạng thái giới hạn cường độ trong thiết kế loại kết cấu phức tạp này.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã trình bày về việc đánh giá khả năng chịu uốn của bản liên tục nhiệt bằng bê tông cốt sợi thép theo mô hình thí nghiệm và mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến. Kết quả cho thấy mô hình phần tử hữu hạn đã đánh giá tương đối chính xác các giai đoạn làm việc của kết cấu so với kết quả từ thực nghiệm, đặc biệt là các giá trị tải trọng giới hạn theo từng giai đoạn, mặc dù vẫn còn khác biệt một chút về chuyển vị ở điểm bắt đầu của giai đoạn ba. Điều này là do trong mô hình số vẫn còn sử dụng các tham số như góc giãn nở, độ lệch tâm thế năng dòng chảy... của mô hình bê tông không có cốt sợi thép. Với kết quả thu được từ mô hình số, nghiên cứu đã cho thấy việc lựa chọn mô hình ứng suất biến dạng của Barros và Sujivorakul trong mô hình CDP của Abaqus khá phù hợp trong việc dự đoán các tải trọng tới hạn theo các giai đoạn làm việc khác nhau của kết cấu. Đây là một tiền đề rất quan trọng để hỗ trợ việc xây dựng phương pháp thiết kế bản liên tục nhiệt bằng bê tông cốt sợi thép ở hai vấn đề: Nguyên tắc truyền lực và ứng xử chịu uốn của vật liệu SFRC trong kết cấu thực tế.

Tài liệu tham khảo

- [1] M. D. Lepech (2009), *Application of ECC for bridge deck link slabs*. Journal of Materials and Structures, 42:1185-1195.
- [2] Y. Y. Kim, G. Fischer, V. C. Li (2004), *Performance of Bridge Deck link slabs designed with ductile engineered cementitious*, ACI Structural Journal, V101, No. 6, 792:801.
- [3] B. Nematollahi (2011). *Steel Fiber Reinforced Concrete: A Review*, ICSECM2011.
- [4] Barros, J., & Figueiras, J. (1999). *Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete: testing and modelling*. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 11, 331-339.
- [5] Sujivorakul, C. (2012). *Model of Hooked Steel Fibers Reinforced Concrete under Tension*. In G. P. Montesinos, H. Reinhardt, & A. Naaman, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6 (pp. 19-26).

Ngày nhận bài: 22/1/2020

Ngày chuyển phản biện: 30/1/2020

Ngày hoàn thành sửa bài: 19/2/2020

Ngày chấp nhận đăng: 26/2/2020