

Nghiên cứu ứng xử dầm liên hợp thép-bê tông bằng thí nghiệm và phương pháp mô phỏng số

Study the behavior of steel-concrete composite beam by experiment and numerical simulation

Ngày nhận bài: 15/6/2017

Ngày sửa bài: 21/6/2017

Ngày chấp nhận đăng: 08/7/2017

Nguyễn Trần Hiếu, Vũ Anh Tuấn

TÓM TẮT

Ngày nay, kết cấu liên hợp thép-bê tông được sử dụng rất phổ biến trong các công trình xây dựng, đặc biệt là nhà cao tầng và cầu thép. Việc ứng dụng loại kết cấu này tại Việt Nam còn nhiều khó khăn, một trong những lý do là chưa ban hành tiêu chuẩn thiết kế. Do vậy, việc nghiên cứu ứng xử của kết cấu liên hợp thép-bê tông là rất quan trọng để từ đó đưa ra phương pháp thiết kế. Bài báo trình bày một nghiên cứu về ứng xử của dầm liên hợp thép-bê tông khi chịu mômen uốn. Nghiên cứu phát triển một mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) để mô phỏng sự làm việc của dầm LHT-BT. Mô hình số sẽ được hiệu chỉnh và kiểm tra tính chính xác thông qua số liệu thí nghiệm.

Từ khóa: kết cấu liên hợp, dầm liên hợp, thí nghiệm, mô phỏng số, phương pháp PTHH, ABAQUS

ABSTRACT

The steel-concrete composite structures have worldwide application in construction. In Vietnam, steel-concrete composite structures have applied in some buildings such as Hanoi Museum, Vietinbank Tower. The use of composite structure in Vietnam is still difficult because of the lack of design norm. Therefore, the understanding of their behavior is very important and design methods will be developed from experimental and numerical researches. This paper presents an investigation into the behavior of steel-concrete composite beam when subjected to bending moment. To evaluate the behavior of steel-concrete composite beam, a finite element model has been prepared. Experimental laboratory testing is carried out in order to calibrate and verify the accuracy of the FEA result

Keywords: composite structures, composite beam, experiment, numerical simulation, FEM, ABAQUS

Nguyễn Trần Hiếu, Vũ Anh Tuấn - Khoa Xây dựng Dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng

1 GIỚI THIỆU

Kết cấu liên hợp thép-bê tông (LHT-BT) được sử dụng đầu tiên làm cầu dầm vòm ở thành phố Rock Rapids (Iowa, Hoa Kỳ) vào năm 1894. Cho đến nay loại hình kết cấu này đã và đang được áp dụng rộng rãi trong nhiều công trình xây dựng. Dầm LHT-BT truyền thống gồm bản sàn bê tông được liên kết với dầm thép thông qua các chốt chịu cắt để tận dụng được ưu điểm chịu nén của bản sàn bê tông và chịu kéo của dầm thép. Kết cấu LHT-BT có rất nhiều ưu điểm nhưng vẫn chưa được áp dụng nhiều tại Việt Nam do chưa có TCVN, chính vì vậy việc nghiên cứu ứng xử của dầm LHT-BT là rất quan trọng để từ đó có thể hiểu được sự làm việc và từ đó có thể đưa ra được tiêu chuẩn thiết kế. Bài báo giới thiệu nghiên cứu về ứng xử của dầm LHT-BT và được trình bày gồm hai phần. Phần thí nghiệm dầm LHT-BT 4 điểm uốn được tiến hành nhằm nghiên cứu ứng xử, quan hệ giữa lực và biến dạng, phân bố ứng suất, vết nứt và sự phá hoại của dầm LHT-BT, thí nghiệm này là một phần của dự án nghiên cứu với Tập đoàn Thép JFE của Nhật Bản. Sau đó, mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) được xây dựng để mô phỏng sự làm việc và kiểm chứng với kết quả thí nghiệm.

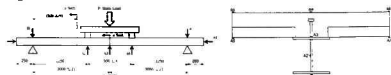
2 THÍ NGHIỆM DẦM LIÊN HỢP THÉP-BÊ TÔNG

2.1 Mẫu thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm dầm LHT-BT bao gồm một dầm thép tổ hợp hàn chữ H (204x6x180x12) dài 6500mm, sàn LHT-BT dày 140mm phía trên có bề rộng hiệu quả 1160mm, chiều dày bê tông phía trên sống tôn là 65mm; dầm và sàn được liên kết với nhau thông qua 36 chốt có mũ chịu cắt. Vật liệu bê tông cấp độ bền C20/25 theo tiêu chuẩn Châu Âu EN 1992-1-1, thép dầm mức S5400 theo tiêu chuẩn JIS của Nhật Bản.

2.2 Sơ đồ thí nghiệm

Sơ đồ thí nghiệm được thể hiện trong Hình 1, khoảng cách giữa hai gối đỡ dầm đơn giản 6000mm.



Hình 1. Sơ đồ bố trí dầm thí nghiệm và vị trí bố trí các cảm biến và đầu đo (A1 đến A8 tại mặt cắt a và b)

Trong quá trình thí nghiệm, dầm LHT-BT được gia tải tại hai điểm đối xứng với giá trị bằng nhau thông qua giá phân tải. Khoảng cách giữa hai điểm gia tải là 1500mm. Việc gia tải được thực hiện bằng máy ép thủy lực 500kN. Các bước gia tải được điều khiển thủ công, lực gia tải được đo bằng cảm biến lực và tự động ghi lại. Hình ảnh tổng thể của thí nghiệm và các dụng cụ sử dụng trong thí nghiệm được thể hiện trong Hình 2.

Chuyên vị của dầm LHT-BT được đo tại hai vị trí gia tải, vị trí giữa dầm bởi ba cảm biến đo chuyển vị δ_1 , δ_2 và δ_3 ; bốn cảm biến chuyển vị δ_4 , δ_5 , δ_6 và δ_7 được sử dụng để đo chuyển vị tương đối giữa bản sàn bê tông và dầm thép. Việc bố trí các cảm



Hình 2. Hình ảnh thực tế của thí nghiệm dầm LHT-BT

biến chuyển vị thể hiện trong Hình 1. Cảm biến điện trở tại mặt cắt α và β được sử dụng để đo biến dạng trên dầm thép và bản sàn bê tông.

2.3 Quá trình thí nghiệm

Tải trọng tác dụng vào mẫu thí nghiệm theo từng bước tải. Khi tải trọng tác dụng đạt 100% giá trị thiết kế, tiến hành dỡ tải về giá trị 0, sau đó lại gia tải đến 150% giá trị thiết kế. Mẫu thí nghiệm được dỡ tải về giá trị 0 một lần nữa và cuối cùng sẽ gia tải đến khi xảy ra phá hoại. Ở mỗi bước tải, giá trị chuyển vị và biến dạng đều được tự động ghi lại. Trong quá trình thí nghiệm, bề mặt và hai bên cạnh bản sàn bê tông được quan sát cẩn thận để phát hiện sự xuất hiện của vết nứt. Thí nghiệm kết thúc khi xảy ra sự phá hoại tại bản sàn bê tông hoặc biến dạng của dầm quá lớn.

3 Mô phỏng số bằng phương pháp PTHH

Phần mềm phân tích kết cấu ABAQUS được sử dụng để xây dựng mô hình số nhằm nghiên cứu ứng xử của dầm LHT-BT. Các đặc trưng cơ học của vật liệu, kiểu phần tử, chia lưới phần tử, điều kiện biên cũng như loại tiếp xúc giữa bản sàn bê tông và dầm thép cần được xét tới để mô phỏng sự làm việc của dầm LHT-BT.

3.1 Mô hình vật liệu

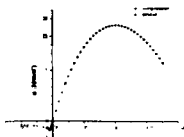
3.1.1 Bê tông

Trong ABAQUS cung cấp một số mô hình vật liệu bê tông như mô hình bê tông phá hoại dẻo (concrete damage plasticity), mô hình vết nứt rời rạc (concrete smeared cracking) và mô hình vết nứt giòn (concrete brittle cracking). Trong nghiên cứu sử dụng mô hình bê tông phá hoại dẻo (mô hình CDP) để mô phỏng vật liệu bê tông bởi khả năng mô tả ứng xử phi tuyến cũng như đặc tính phá hủy của bê tông trong cả hai vùng kéo và nén. Trong mô hình CDP, quan hệ kéo nén một trục của bê tông được mô tả bằng đường cong ứng suất dẻo-biến dạng và các hệ số phá hủy. Xác định đường cong ứng suất dẻo-biến dạng của bê tông bằng thực nghiệm. Trong điều kiện thực tế không có đầy đủ số liệu nên các giá trị khác thường được xác định từ cường độ chịu nén trung bình f_{cm} .

Tiêu chuẩn EN 1992-1-1 đưa ra mô hình bê tông chịu nén gồm hai giai đoạn như trong Hình 3. Giai đoạn đàn hồi ứng suất từ 0 đến $0.4 f_{cm}$, đường cong ứng suất-biến dạng có dạng đường thẳng, góc nghiêng $\tan \alpha = E_{cm}$. Giai đoạn đàn dẻo, quan hệ ứng suất-biến dạng được xác định theo công thức:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^3}{1 + (k - 2)\eta}; k = 1.05 - E_{cm} \frac{E_{ci}}{f_{cm}}; \eta = \frac{\sigma_c}{E_{ci}}; E_{ci} = 0.7(f_{cm})^{0.31}; E_{cm} = 0.0035 \quad (1)$$

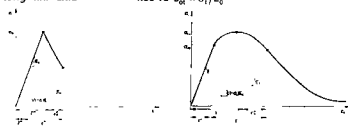
Đối với bê tông khi chịu kéo, nghiên cứu sử dụng mô hình của các tác giả Wang và Hsu cũng bao gồm hai giai đoạn: trước khi xuất hiện vết nứt, bê tông làm việc đàn hồi $\sigma_t = E_{cm} \epsilon_t$, sau khi xuất hiện vết nứt, quan hệ ứng suất-biến dạng $\sigma_t = E_{cr}(\epsilon_{cr}/\epsilon_t)^{0.4}$ trong đó E_{cr} là biến dạng tại thời điểm bê tông bị nứt. Ứng suất tại thời điểm xuất hiện vết nứt bằng 0.1 cường độ chịu nén của bê tông.



Hình 3. Đường cong ứng suất-biến dạng của bê tông C20/25

Ứng suất và biến dạng thực của bê tông cần được chuyển đổi sang ứng suất và biến dạng phi tuyến thực khi đưa vào phần mềm ABAQUS. Có thể phá hoại của bê tông: phá hoại nứt trong miền chịu kéo và phá hoại ép vỡ trong miền chịu nén. Quan hệ ứng suất-biến dạng của bê tông khi chịu

kéo như trong Hình 4.a. Để mô phỏng vật liệu bê tông khi chịu kéo cần có những thông số như mô đun đàn hồi E_{cr} , ứng suất kéo σ_{cr} , biến dạng nứt ϵ_{cr} , hệ số phá hủy khi chịu kéo d . Biến dạng nứt ϵ_{cr} có thể xác định bằng công thức $\epsilon_{cr} = \epsilon_1 - \epsilon_{cr}^0$ trong đó ϵ_1 là tổng biến dạng của bê tông khi chịu



(a) Quan hệ ứng suất-biến dạng của bê tông khi chịu kéo (b) Quan hệ ứng suất-biến dạng của bê tông khi chịu nén

Hình 4. Quan hệ ứng suất-biến dạng của bê tông

Đường cong quan hệ ứng suất-biến dạng của bê tông khi chịu nén thể hiện trong Hình 4.b. Các thông số cần thiết như ứng suất nén σ_c , biến dạng phi tuyến ϵ_c , hệ số phá hủy khi chịu nén d . Biến dạng phi tuyến ϵ_c có thể xác định qua công thức $\epsilon_c = \epsilon_1 - \epsilon_{cr}^0$ trong đó ϵ_1 là tổng biến dạng của bê tông khi chịu nén $\epsilon_c = \sigma_c / E_{cr}$.

Ngoài ra, mô hình CDP sử dụng 5 thông số để mô tả quá trình hình thành và dạng phá hoại dẻo. Giá trị cụ thể của từng thông số được trình bày ở Bảng 1.

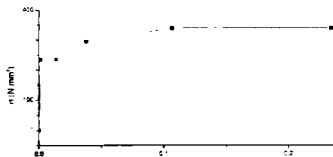
Bảng 1 Thông số mô hình CDP

Tỷ số cường độ chịu kéo ngoài mức phẳng làm việc so với cường độ chịu nén trong một phương làm việc	Hệ số lệch tâm vật liệu	Tỷ số giữa cường độ chịu nén trục dọc và cường độ chịu nén trục ngang	Góc phá hủy	Độ phá hủy
$\frac{\sigma_c}{f_{cm}}$	$\frac{E_{cr}}{E_{cm}}$	$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_c}$	ψ	μ
2/3	0.1	1/6	45	0

3.1.2 Thép kết cấu

Thiết kế cấu được mô phỏng trong phần mềm ABAQUS theo mô hình vật liệu kim loại đàn dẻo. Quan hệ ứng suất-biến dạng tiêu chuẩn của thép S5400 trình bày trong Hình 5. Để nhập số liệu vào phần mềm, ứng suất, biến dạng tiêu chuẩn của vật liệu cần chuyển đổi sang ứng suất thực và biến dạng dẻo theo công thức:

$$\sigma_{su} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}); \epsilon_{su} = \ln(1 + \epsilon_{nom}); \epsilon_{pl} = \epsilon_{su} - \sigma_{su}/E \quad (2)$$



Hình 5. Quan hệ ứng suất - biến dạng tiêu chuẩn của thép S5400

3.2 Mô hình dầm LHT-BT

Mô hình dầm thép, bản sàn và chốt chịu cắt bằng loại phần tử 03 chiều 08 nút liên tục (C3D8R). Kích thước phần tử tối đa 25mm. Chốt chịu cắt được hàn chặt vào dầm thép, trong mô hình chốt chịu cắt được liên kết với mặt trên của dầm thép bằng ràng buộc *TIE dạng bề mặt-bề mặt. Tiếp xúc giữa mặt dưới của bản sàn bê tông và mặt trên của dầm thép được mô phỏng bằng tiếp xúc bề mặt-bề mặt trong ABAQUS. Tiếp xúc theo phương pháp tuyến được gán thuộc tính *HARD CONTACT trong khi đó theo phương tiếp tuyến được gán thuộc tính *PENALTY với hệ số ma sát

bằng 0. Liên kết boc *EMBED được dùng để mô phỏng liên kết giữa bản sàn và chốt chịu cắt. Với dạng liên kết này, các nút trên chốt chịu cắt sẽ luôn liên kết chặt với các nút của bản sàn bê tông.

3.3 Tải trọng và điều kiện biên

Trong mẫu thí nghiệm, một đầu dầm liên kết khớp và đầu còn lại liên kết dạng khớp trượt. Khi mô phỏng, một đầu dầm thép sẽ được gán cố định theo cả 3 phương X, Y, Z. Đầu còn lại được gán cố định theo hai phương Y và Z. Lực tác dụng được gán bằng tính lực tập trung tại hai điểm trùng với vị trí giá tải trong thí nghiệm.

4 KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ

4.1 Lực tối hạn

Dựa trên kết quả tính toán lý thuyết, thí nghiệm và mô phỏng số, giá trị tải trọng phá hoại P_{ult} và mômen uốn dẻo $M_{pl,Rd}$ được trình bày ở Bảng 2.

Bảng 2. Giá trị tải trọng tối hạn và mômen uốn dẻo tương ứng

Phương pháp	Tải trọng phá hoại P_{ult} (kN)	Mômen uốn dẻo $M_{pl,Rd}$ (kNm)	(%)
Thí nghiệm	257.90	290.14	
Mô phỏng số	247.20	278.10	-4.15
Lý thuyết	-	266.27	-8.23

4.2 Phân bố ứng suất pháp trong dầm thép

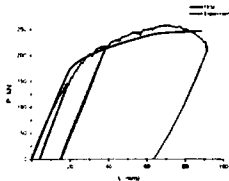
Từ dữ liệu biến dạng đo được có thể xác định được ứng suất trong kết cấu tại thời điểm cực hạn, biến dạng và ứng suất tại mặt cắt α của dầm thép như Bảng 3.

Bảng 3. Ứng suất pháp trong dầm thép

Thí nghiệm			PTHH	
Đầu đo	Biến dạng ϵ	Ứng suất pháp σ_m (N/mm ²)	Ứng suất pháp σ_m (N/mm ²)	%
A1	0.00427	235.0	230.9	2.05
A2	0.00286	235.0	233.7	0.55
A3	0.00076	159.6	136.5	14.47

4.3 Quan hệ tải trọng - chuyển vị

Dựa trên số liệu thí nghiệm và mô phỏng số, quan hệ giữa tải trọng - chuyển vị được thể hiện trong Hình 6.



Hình 6. Quan hệ tải trọng và chuyển vị theo số liệu thí nghiệm và mô phỏng số

4.4 Sự xuất hiện vết nứt trong bê tông

Kết quả thí nghiệm cho thấy tại thời điểm cực hạn, vết nứt xuất hiện tại vị trí trục trung hòa dẻo của tiết diện, vị trí gần với điểm giá tải. Để đánh giá sự xuất hiện vết nứt trong mô hình số, có thể sử dụng giá trị hệ số phá hủy khi kéo dãn. Trong Hình 7, những vị trí ứng với phổ màu đỏ là những vị trí bê tông bị nứt do kéo.



Hình 7. Phá vỡ nứt tại thời điểm phá hoại

5 KẾT LUẬN

Bài báo trình bày thí nghiệm dầm LHT-BT chịu uốn và xây dựng mô hình số để phân tích ứng xử của dầm tương ứng. Kết quả của thí nghiệm được sử dụng để kiểm chứng kết quả phân tích số. Giá trị mômen uốn dẻo theo kết quả thí nghiệm lớn hơn theo tính toán lý thuyết và mô phỏng với sai số tương ứng là 8.2% và 4.1%; sai số ứng suất pháp tại mặt cắt α giữa thí nghiệm và mô phỏng lớn nhất là 14.5% và nhỏ nhất 0.6%, như vậy có thể đánh giá kết quả mô phỏng bằng phương pháp PTHH đảm bảo độ tin cậy. Để phản ánh đúng sự làm việc của kết cấu cần phải thực hiện nhiều mẫu thí nghiệm, tuy nhiên việc thực hiện này sẽ gây tốn kém về chi phí. Do vậy có thể thí nghiệm ít mẫu hơn kết hợp với phương pháp mô phỏng số là một công cụ hữu hiệu để phân tích ứng xử của kết cấu LHT-BT.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. ABAQUS (2012). ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.13.1, Dassault Systemes Corp., Providence, RI, USA.
2. E. H. Lohdy và D. Lam (2003). Finite element analysis of steel-concrete composite girders. *Advances in Structural Engineering*, 6(4), trang 267-281.
3. EN 1994-1-1 (2004) EUROCODE 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization.
4. F. Tahmasebnia, G. Ranz, và A. Zona (2012). Beam Tests of Composite Steel-Concrete Members: A Three-dimensional Finite Element Model. *International Journal of Steel Structures*, 12(1), trang 37-45.
5. P. Kmieciak và M. Kaminski (2011). Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. *Archives of civil and mechanical engineering* Vol XI (3), trang 623-636.