

PHÂN TÍCH THỰC NGHIỆM ỨNG XỬ CẮT CỦA DẦM CAO BÊ TÔNG SỢI THÉP LIÊN TỤC VÀ ĐƠN GIẢN

Nguyễn Thị Quỳnh Như^{a,b,c}, Trần Ngọc Lâm Tuyên^{b,c}, Nguyễn Minh Long^{b,c},
Hoàng Bắc An^a, Phan Tá Lệ^a, Trần Văn Phúc^{a,*}

^aKhoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Thành phố Hồ Chí Minh,
196 Pasteur, Quận 3, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh,
268 đường Lý Thường Kiệt, quận 10, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^cĐại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, phường Linh Trung, TP. Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 25/12/2024, Sửa xong 22/4/2025, Chấp nhận đăng 25/4/2025

Tóm tắt

Trong bối cảnh hầu hết các nghiên cứu về ứng xử cắt của dầm cao bê tông sợi thép đều được thực hiện trên dầm đơn giản, bài báo này phân tích thực nghiệm và làm rõ hiệu quả làm việc của sợi thép trong việc cải thiện các đặc trưng kết cấu của dầm cao bê tông sợi thép liên tục chịu tác dụng bởi lực cắt và so sánh với trường hợp dầm đơn giản. Chương trình thực nghiệm được thực hiện trên 4 dầm cao bê tông sợi thép với hàm lượng sợi thay đổi lần lượt là 0 và 30 kg/m³ bê tông. Các dầm được chia thành hai nhóm; trong đó, nhóm A (các dầm đơn giản) có kích thước hình học 2000×500×150 (mm) và nhóm B (các dầm liên tục hai nhịp) có kích thước 3600×500×150 (mm). Các mẫu dầm được thiết kế theo tỉ lệ mô hình là 1:4 so với dầm cao thực tế. Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng sợi thép giúp cải thiện đáng kể các đặc trưng kết cấu gồm khả năng kiểm soát vết nứt xiên, sức kháng cắt, khả năng biến dạng và hấp thụ năng lượng cũng như tính dẻo dai của cả dầm đơn giản và liên tục. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng hiệu quả gia cường của sợi thép cho dầm liên tục có xu hướng giảm đáng kể so với cho trường hợp dầm đơn giản.

Từ khóa: dầm cao liên tục; bê tông sợi thép; thực nghiệm; khả năng kháng cắt; khả năng hấp thụ năng lượng; độ dẻo dai.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SHEAR BEHAVIOR OF CONTINUOUS AND SIMPLE STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS

Abstract

In the context that most of the studies on the shear behavior of steel fiber reinforced concrete (SFRC) deep beams are carried out on simple beams, this paper experimentally analyzes and clarifies the performance of steel fibers in improving the structural characteristics of continuous SFRC deep beams subjected to shear force and compares it with the case of simple SFRC deep beams. The experimental program was carried out on four SFRC deep beams with fiber content varying from 0 and 30 kg/m³ of concrete, respectively. The beams were divided into two groups; in which, group A (simple beams) had geometric dimensions of 2000×500×150 (mm) and group B (two-span continuous beams) had dimensions of 3600×500×150 (mm). The beams were designed according to a model ratio of 1:4 compared to the actual deep beam. Experimental results show that steel fibers significantly improve the structural characteristic of both simple and continuous beams including diagonal crack control, shear strength, deformation and energy absorption capacity as well as ductility. Experimental results show that the effect level of steel fibers for the continuous beams tends to decrease significantly compared to that for the case of the simple beams.

Keywords: continuous deep beam; steel fiber reinforced concrete; experimental investigation; shear resistance; energy absorption capacity; ductility.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(2V\)-03](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(2V)-03) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: phuc.tranvan@uah.edu.vn (Phúc, T. V.)

1. Đặt vấn đề

Hiện nay, yêu cầu về sự đa dạng của công năng sử dụng và yếu tố kiến trúc trong cùng một công trình dẫn đến sự thay đổi về mặt kết cấu và làm phát sinh các tầng chuyển đổi công năng kiến trúc và đòi hỏi cần phải có hệ kết cấu phù hợp. Nhằm đáp ứng những yêu cầu kể trên, giải pháp dầm chuyển ngày càng được áp dụng rộng rãi tại vị trí các tầng chuyển đổi trong các công trình nhà cao tầng. Do có tỉ số của kích thước chiều cao tiết diện (h) trên nhịp làm việc (L) lớn ($L/h \leq 4$), các dầm chuyển thường được xếp loại là dầm cao. Khác với kiểu phá hoại uốn thuần túy trong các dầm truyền thống (còn gọi là dầm Bernoulli, dầm cao chủ yếu bị phá hoại bởi ứng suất cắt [1, 2]. Kiểu phá hoại cắt này rất nguy hiểm do diễn ra nhanh và đột ngột [3–5]; và có thể càng trở nên đặc biệt nguy hiểm đối với trường hợp dầm chuyển trong nhà nhiều tầng do chúng là gối tựa cho các cột của tầng trên và chịu lực tập trung rất lớn.

Để cải thiện khả năng kháng cắt của dầm cao, bên cạnh một số giải pháp truyền thống (tăng kích thước tiết diện hay tăng hàm lượng cốt ngang), giải pháp sử dụng sợi thép phân tán có thể là giải pháp khả thi như đã được đề cập trong nhiều nghiên cứu trước đây [6–8]. Sợi thép có kích thước nhỏ và khả năng phân tán đều trong cấu kiện nên giúp cải thiện đáng kể khả năng chịu kéo cho bê tông, khả năng chịu lực, độ dẻo dai và khả năng hấp thụ năng lượng cho kết cấu [9–15]. Điều đáng nói là hầu hết các nghiên cứu hiện có về hiệu quả làm việc của sợi thép trong việc cải thiện các đặc trưng kết cấu của dầm cao đều được thực hiện trên các mẫu dầm đơn giản [16, 17]. Thực tế, dầm cao trong kết cấu nhà nhiều tầng thường được thiết kế theo sơ đồ liên tục. Sơ đồ kết cấu hay điều kiện biên có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu lực và chuyển vị của dầm cao [18, 19]. Kiến thức kết cấu căn bản cho biết rằng phản lực tại vị trí gối giữa của dầm liên tục lớn hơn đáng kể so với phản lực gối của dầm đơn giản khi cùng chịu tải trọng như nhau. Điều này khiến cho lực nén trong thanh chống ở vùng gối giữa của dầm cao liên tục lớn hơn so với của dầm đơn giản; vì vậy, với cùng một cấu hình như nhau, dầm cao liên tục có khả năng bị phá hoại sớm hơn so với dầm cao đơn giản. Nói cách khác, khả năng kháng cắt của dầm cao liên tục có xu hướng nhỏ hơn so với của dầm cao đơn giản. Thêm vào đó, không như sơ đồ dầm đơn giản, sơ đồ dầm liên tục cho phép xuất hiện hiện tượng tái phân bố ứng suất trong toàn hệ dầm từ đó có thể dẫn đến ứng suất phân bố trong bê tông và cốt thép (cốt dọc và cốt ngang) của dầm trở nên đều đặn hơn. Các thực tế vừa được đề cập ở trên có thể làm cho hiệu quả làm việc của sợi thép trong dầm cao liên tục không giống như trong trường hợp dầm cao đơn giản. Cho đến hiện nay, số lượng các nghiên cứu liên quan đến ứng xử cắt của dầm cao bê tông sợi thép liên tục vẫn còn nhiều hạn chế [20, 21] và hiệu quả làm việc của sợi thép trong dầm cao liên tục vẫn chưa được làm sáng tỏ theo sự tìm hiểu tốt nhất của các tác giả. Thực tế này cho thấy rất cần có thêm các nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử cắt của dầm cao bê tông sợi thép liên tục nhằm có thể đánh giá được chính xác, đầy đủ và rõ ràng về hiệu quả của sợi thép trong việc cải thiện các đặc trưng kết cấu của dầm cao đặc biệt là trong trường hợp dầm liên tục.

Bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm về hiệu quả làm việc của sợi thép trong việc cải thiện các đặc trưng kết cấu của dầm cao liên tục bê tông sợi thép chịu tác dụng bởi lực cắt và so sánh với trường hợp dầm đơn giản. Chương trình thực nghiệm được thực hiện trên bốn dầm gồm hai dầm không có sợi thép (dầm đối chứng) và hai dầm có sợi thép với hàm lượng là 30 kg/m^3 bê tông. Các dầm được chia thành hai nhóm; trong đó, nhóm A (các dầm đơn giản) có kích thước hình học $2000 \times 500 \times 150$ (mm) và nhóm B (các dầm liên tục hai nhịp) có kích thước $3600 \times 500 \times 150$ (mm). Các mẫu dầm được thiết kế theo tỉ lệ mô hình là 1:4 so với dầm cao thực tế. Mục tiêu chính cụ thể của bài báo là phân tích và làm rõ ảnh hưởng của sợi thép đến các đặc trưng kết cấu của dầm cao (khả năng kháng nứt xiên, khả năng kháng cắt, khả năng biến dạng, khả năng hấp thụ năng lượng và độ dẻo dai) khi sơ đồ kết cấu thay đổi từ đơn giản sang liên tục.

2. Chương trình thực nghiệm

2.1. Vật liệu

Cấp phối bê tông đúc các dầm thí nghiệm như sau: xi măng PC40 (552 kg/m^3); cát sông (0 đến 4 mm, 652 kg/m^3); đá 1×2 (20 đến 25 mm, 1218 kg/m^3); nước (160 l/m^3); và phụ gia hóa dẻo Sikament ($5,5 \text{ l/m}^3$). Cường độ chịu nén trung bình dọc trục $f_{c,cube}$ và cường độ kéo khi ép chế $f_{sp,cube}$ thực tế của bê tông được xác định trên kết quả nén 6 mẫu lập phương $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$, cụ thể $f_{c,cube} = 58,1 \text{ MPa}$ và $f_{sp,cube} = 5,1 \text{ MPa}$. Độ sụt bê tông xấp xỉ $12 \pm 2 \text{ cm}$. Giới hạn chảy f_y và giới hạn bền f_u trung bình của cốt thép dọc chịu kéo và cốt đai được xác định trên ba mẫu theo TCVN 197-1 (2014). Kết quả như sau: cốt dọc d20, $f_y = 516 \text{ MPa}$ và $f_u = 639 \text{ MPa}$; cốt ngang d12, $f_{yh} = 508 \text{ MPa}$ và $f_{uh} = 613 \text{ MPa}$; và cốt đai d6, $f_{yw} = 317 \text{ MPa}$ và $f_{uw} = 471 \text{ MPa}$. Mô đun đàn hồi của cốt thép $E_s = 200 \text{ GPa}$ được lấy theo TCVN 5574 (2018). Sợi thép được sử dụng có tiết diện tròn và uốn móc hai đầu. Sợi thép có chiều dài và đường kính tiết diện lần lượt là 35 mm và 0,55 mm. Giới hạn bền và mô đun đàn hồi của sợi thép được cung cấp bởi nhà sản xuất, lần lượt là $f_f = 1350 \text{ MPa}$ và $E_f = 210 \text{ GPa}$. Các đặc tính cơ học của bê tông và cốt thép được tổng hợp trong Bảng 1.

Bảng 1. Các đặc tính cơ học của bê tông và cốt thép

$f_{c,cube}$ MPa	$f_{sp,cube}$ MPa	f_y MPa	f_u MPa	f_{yh} MPa	f_{uh} MPa	f_{yw} MPa	f_{uw} MPa	E_s GPa
58,1	5,1	516	639	508	613	317	471	200

Ghi chú: $f_{c,cube}$ và $f_{sp,cube}$ lần lượt là cường độ chịu nén dọc trục và kéo khi ép chế của bê tông; f_y và f_u lần lượt là giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt dọc; f_{yh} và f_{uh} lần lượt là giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt ngang; f_{yw} và f_{uw} lần lượt là giới hạn chảy và giới hạn bền của cốt đai; E_s là mô đun đàn hồi của cốt thép.

2.2. Mẫu dầm thí nghiệm

Chương trình thực nghiệm được tiến hành trên các dầm kích thước lớn theo tỉ lệ 1:4 nhằm mô phỏng kết cấu dầm chuyên của một công trình cao 12 tầng trong thực tế. Các dầm được chế tạo tại cùng thời điểm từ cùng một mẻ bê tông. Tất cả các dầm được chế tạo trong phòng thí nghiệm với điều kiện môi trường có nhiệt độ từ 30 đến 33 °C, độ ẩm trung bình xấp xỉ 77% và được thí nghiệm sau 28 ngày. Độ sụt của bê tông của các dầm dao động từ 110 đến 120 mm. Độ chặt của bê tông dầm được đảm bảo bằng các thiết bị đầm tay.

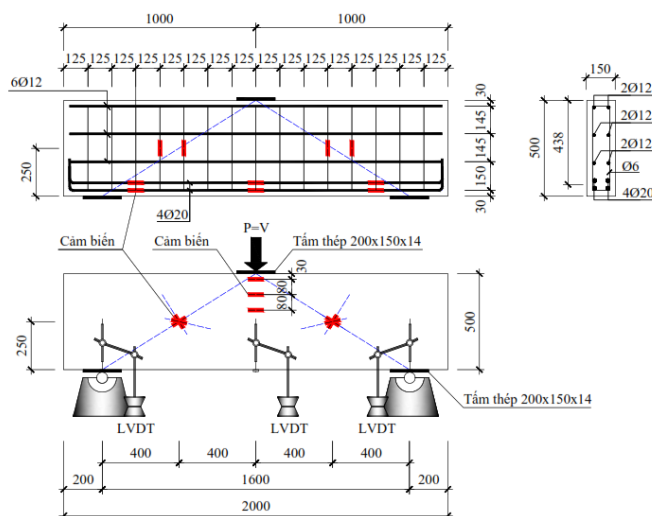
Tổng số mẫu dầm thí nghiệm là bốn mẫu, được chia thành hai nhóm A và B; trong đó, nhóm A gồm hai mẫu dầm đơn giản kích thước $2000 \times 500 \times 150 \text{ (mm)}$ và nhóm B gồm hai dầm liên tục hai nhịp kích thước $3600 \times 500 \times 150 \text{ (mm)}$. Các dầm được gia cường bởi sợi thép với hàm lượng m_f thay đổi lần lượt là 0 và 30 kg/m^3 bê tông, tương ứng với tỉ lệ sợi thép theo thể tích bê tông V_f là 0 và 0,4% (với $V_f = 100 \times m_f / 7850$). Đây là hàm lượng được dùng phổ biến trong các công trình dân dụng. Các dầm nhóm A (dầm đơn giản) được bố trí bốn thanh đường kính 20 mm (4d20) làm cốt thép chịu kéo ở nhịp dầm và hai thanh đường kính 12 mm (2d12) làm cốt thép cấu tạo ở thớ chịu nén của dầm. Tương tự, các dầm nhóm B (dầm liên tục) cũng được bố trí 4d20 làm cốt thép chịu kéo cho cả ở nhịp và gối của dầm. Cả bốn dầm đều có hàm lượng cốt dọc $\rho_s = 1,77\%$, đây là hàm lượng cốt thép chịu kéo được dùng phổ biến trong các dầm cao trong thực tế. Cốt đai trong các dầm có đường kính 6 mm (d6), với hàm lượng cốt đai của các dầm là $\rho_{sw} = 0,15\%$, tương ứng với bước cốt đai là 250 mm. Dọc trên bề mặt các dầm theo chiều cao dầm, cốt thép được thiết kế theo tiêu chuẩn ACI 318 (2019), bố trí các thanh thép d12 với khoảng cách giữa các thanh là 145 mm. Các thông số kỹ thuật của các dầm được tổng hợp trong Bảng 2. Cấu tạo chi tiết của các dầm được thể hiện ở Hình 1.

Bảng 2. Thông số các mẫu đầm thí nghiệm

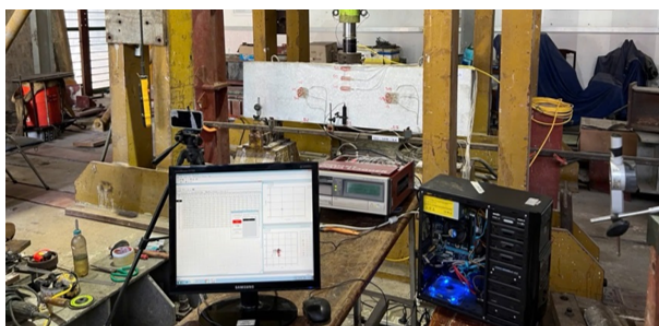
Nhóm	Tên mẫu	Kích thước đầm (mm)	Hàm lượng cốt đai (%)	Hàm lượng sợi thép (kg/m ³)
A	DS-50-00-0,30	2000×500×150	0,30	0
	DS-50-30-0,30			30
B	DC-50-00-0,30	3600×500×150	0,30	0
	DC-50-30-0,30			30

2.3. Sơ đồ thí nghiệm và bố trí thiết bị đo đạc

Các đầm nhóm A được thử tải như Hình 1 theo sơ đồ đầm đơn giản chịu tải tập trung ở giữa nhịp. Tỷ số giữa nhịp cắt và chiều cao làm việc của đầm $a/d = 1,7$. Chuyển vị của đầm được đo tại các vị trí 1/2 nhịp và tại gối bằng ba chuyển vị kế điện từ (LVDT). Biến dạng nén tại giữa đầm được đo bằng ba cảm biến điện trở (SG) bố trí dọc theo chiều cao tiết diện đầm. Tại vị trí 1/4 nhịp, biến dạng chịu nén xiên và kéo xiên của vùng bê tông ở nhịp cắt của đầm được xác định bằng một cặp SG đa hướng.



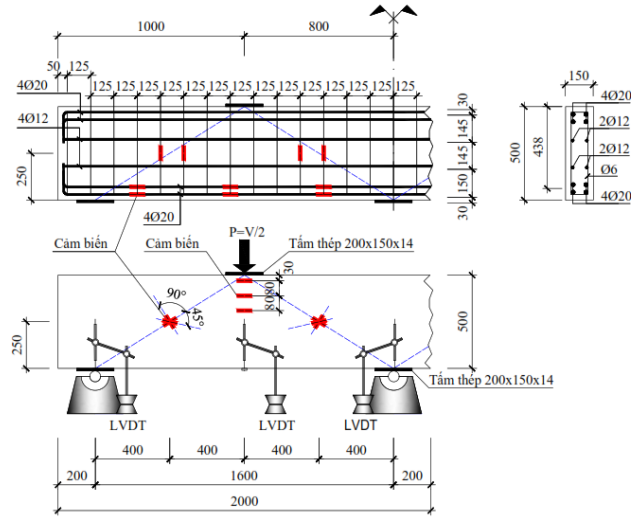
(a) Chi tiết kỹ thuật



(b) Sơ đồ thí nghiệm

Hình 1. Chi tiết kỹ thuật và sơ đồ thí nghiệm của đầm Nhóm A (đầm đơn giản)

Đề đo biến dạng cốt thép dọc, sáu SG, trong đó có hai SG được đặt tại các vị trí giữa nhịp và bốn SG đặt tại vị trí gần các gối tựa. Biến dạng của cốt đai được xác định bằng bốn SG khác.



(a) Chi tiết kỹ thuật



(b) Sơ đồ thí nghiệm

Hình 2. Chi tiết kỹ thuật và sơ đồ thí nghiệm của dầm Nhóm B (dầm liên tục)

Các dầm nhóm B được thử tải theo sơ đồ dầm liên tục hai nhịp chịu hai tải tập trung bằng nhau ở giữa nhịp như Hình 2. Tỷ số giữa nhịp cắt và chiều cao làm việc của dầm $a/d = 1,7$ tương tự như của các dầm nhóm A. Chuyển vị của dầm được đo đối xứng tại các vị trí $1/2$ nhịp, tại gối bằng năm chuyên vị kế điện tử (LVDT). Biến dạng cốt thép dọc được đo bằng mười hai cảm biến điện trở (SG) tại các vị trí giữa nhịp và tại gối. Biến dạng của cốt đai được xác định bằng sáu SG khác. Biến dạng nén tại giữa dầm được đo bằng sáu SG bố trí dọc theo chiều cao tiết diện dầm và đối xứng. Biến dạng chịu nén xiên và kéo xiên của vùng bê tông ở nhịp cắt của dầm (thanh chống xiên) tại vị trí $1/4$ nhịp được xác định bằng bốn SG đa hướng.

Các dầm đơn giản được gia tải bằng kích thủy lực 100 tấn và dầm liên tục hai nhịp gia tải bằng kích thủy lực 400 tấn cho đến khi dầm bị phá hoại hoàn toàn. Ban đầu, dầm được gia tải với cấp tải

10 kN, sau khi xuất hiện vết nứt xiên sẽ nâng lên mỗi cấp tải là 20 kN. Khi ghi nhận quá trình hình thành vết nứt và đo bề rộng khe nứt, tải được giữ với thời gian là không quá hai phút. Chi tiết lắp đặt các thiết bị đo được thể hiện ở Hình 1 và 2.

3. Kết quả thực nghiệm và thảo luận

3.1. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại dầm

Kết quả thực nghiệm của các dầm được tổng hợp trong Bảng 3. Tất cả các dầm đều bị phá hoại cắt (Hình 3). Vết nứt đầu tiên xuất hiện ở giữa nhịp (vết nứt uốn), dạng thẳng đứng, xuất hiện ở cấp tải từ 14 đến 15% tải trọng phá hoại (P_u) đối với dầm đơn giản và ở cấp tải xấp xỉ $13\%P_u$ đối với dầm liên tục hai nhịp. Khi tăng tải trọng, các vết nứt thẳng đứng dần phát triển về bề rộng và chiều dài, đồng thời xuất hiện thêm các vết nứt uốn về hai phía gối tựa. Vết nứt xiên đầu tiên của dầm bắt đầu xuất hiện tại vị trí bụng dầm ở cấp tải $31\%P_u$ (dầm đơn giản) và 31 đến $32\%P_u$ (dầm liên tục) và phát triển theo hai phía, hướng về điểm tác dụng lực và gối tựa khi tiếp tục tăng tải trọng. Các kết quả trên cho thấy sơ đồ thí nghiệm đơn giản hay liên tục ảnh hưởng không đáng kể đến thời điểm xuất hiện vết nứt uốn hoặc vết nứt xiên đầu tiên trong dầm. Các vết nứt uốn ngừng phát triển ở cấp tải 60 đến $70\%P_u$ đối với dầm đơn giản và 75 đến $80\%P_u$ đối với dầm liên tục; trong khi đó các vết nứt xiên phát triển nhanh làm dầm bị phá hoại.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm của các dầm

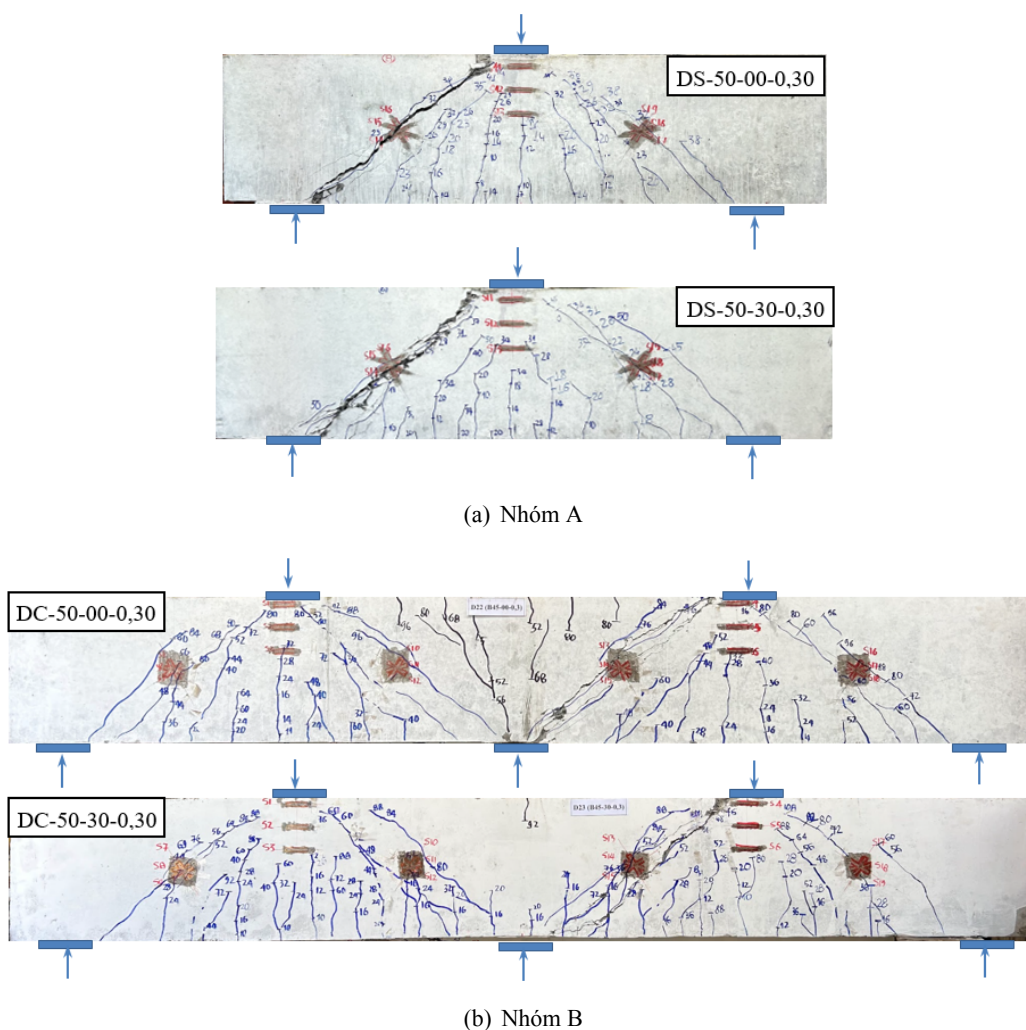
Nhóm	Dầm	$P_{cr,flex}$	$P_{cr,sh}$	$P_{y,stirr}$	P_u	$\delta_{u,mid}$	$\epsilon_{su,longi,mid}$	$\epsilon_{su,longi,sup}$	$\epsilon_{su,stirr}$	$\epsilon_{ccu,mid}$	$\epsilon_{ct,inc}$	w_u
		kN	kN	kN	kN	mm	%	%	%	%	%	mm
A	DS-50-00-0,30	105	220	424	720	5,30	2,45	2,45	23,99	-1,35	2,27	3,98
	DS-50-30-0,30	110	245	465	780	5,75	2,45	2,54	24,94	-1,16	1,29	3,80
B	DC-50-00-0,30	83	200	375	650	3,65	2,21	2,21	24,78	-1,26	0,20	4,06
	DC-50-30-0,30	90	225	380	710	3,76	2,30	2,32	25,68	-1,86	3,92	3,93

Ghi chú: $P_{cr,flex}$ là lực gây vết nứt uốn đầu tiên; $P_{cr,sh}$ là lực gây vết nứt xiên đầu tiên; $P_{y,stirr}$ lực bắt đầu gây chảy dẻo cốt đai; P_u là lực lớn nhất; $\delta_{u,mid}$ là chuyển vị của dầm tại giữa nhịp; $\epsilon_{su,longi,mid}$ là biến dạng lớn nhất của cốt dọc chịu kéo giữa nhịp; $\epsilon_{su,longi,sup}$ là biến dạng lớn nhất của cốt dọc chịu kéo ở vị trí gần gối tựa; $\epsilon_{su,stirr}$ là biến dạng lớn nhất của cốt đai; $\epsilon_{ccu,mid}$ biến dạng nén lớn nhất của bê tông giữa nhịp; $\epsilon_{ct,inc}$ là biến dạng kéo xiên lớn nhất của bê tông; w_u bề rộng vết nứt xiên ứng với lực tác dụng lớn nhất.

Các vết nứt xuất hiện trong dầm có sợi thép phân bố đều hơn với bề rộng vết nứt nhỏ hơn so với dầm không sợi thép, nhỏ hơn 64,8% (dầm đơn giản) và 69,2% (dầm liên tục). Thực tế này có thể được giải thích như sau: sự xuất hiện của vết nứt xiên trong dầm chủ yếu là do bê tông quyết định hơn là cốt thép. Khi ứng suất kéo xiên vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông, vết nứt xiên bắt đầu xuất hiện. Rõ ràng rằng, sợi thép làm cải thiện đáng kể cường độ chịu kéo của bê tông và nhờ vào hiệu ứng bắc cầu giúp cho ứng suất kéo xiên trong dầm phân bố đều hơn. Tất cả điều này dẫn đến các vết nứt trong dầm có sợi thép phân bố đều và có bề rộng nhỏ hơn so với trường hợp dầm không sợi thép như đã quan sát được từ thực nghiệm đã miêu tả ở trên. Có thể thấy rằng việc thay đổi sơ đồ thí nghiệm từ dầm đơn giản sang dầm liên tục không làm ảnh hưởng đáng kể đến hình thái và bề rộng vết nứt của dầm. Bề rộng vết nứt khi dầm bị phá hoại của các dầm đơn giản nhỏ hơn so với của các dầm liên tục. Cụ thể, bề rộng vết nứt lớn nhất của các dầm đơn giản là 3,98 và 3,80 mm lần lượt đối với dầm không có sợi và có sợi; trong khi, của các dầm liên tục tương ứng là 4,06 và 3,93 mm.

3.2. Quan hệ lực - chuyển vị

Quan hệ lực và chuyển vị được trình bày trong Hình 4. Ứng xử của dầm có thể chia thành hai giai đoạn: trước khi xuất hiện vết nứt xiên; và sau khi xuất hiện vết nứt xiên. Ở giai đoạn đầu, chuyển vị



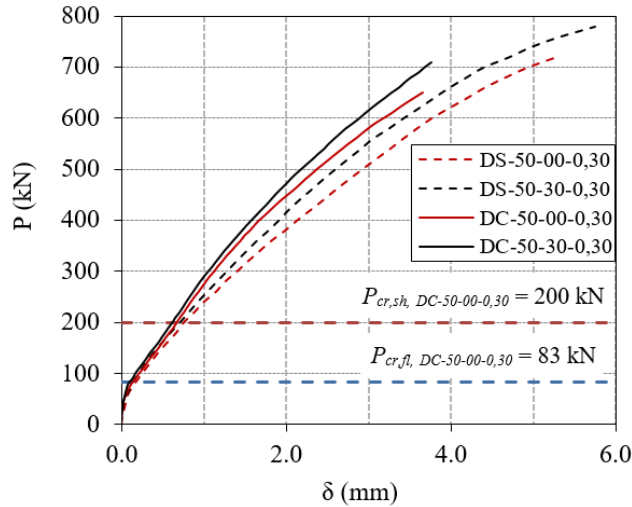
Hình 3. Hình thái vết nứt và kiểu phá hoại của các dầm

của các dầm gần như nhau. Sau khi xuất hiện vết nứt xiên, chuyển vị của dầm sợi thép giảm đáng kể so với của dầm đối chứng ở cùng một cấp tải trọng. Kết quả này có thể là do sợi thép tham gia vào khả năng chịu kéo của bê tông thông qua cơ chế bắc cầu, từ đó chúng hỗ trợ cốt đai chịu một phần ứng suất kéo. Điều này khiến cho sự hình thành vết nứt xiên ở các dầm sợi thép chậm hơn so với của các dầm không sợi thép (Bảng 3) và làm giảm bề rộng vết nứt (xem quan hệ lực - bề rộng vết nứt ở Mục 3.6). Thực tế này giúp trì hoãn quá trình suy giảm độ cứng của dầm và làm giảm chuyển vị của các dầm sợi thép so với của dầm không sợi khi xét cùng một cấp tải.

Cụ thể, chuyển vị của dầm đơn giản (nhóm A) và dầm liên tục (nhóm B) sử dụng sợi thép với hàm lượng 30 kg/m^3 giảm lần lượt 11,1 và 10,6% so với chuyển vị của dầm đối chứng tương ứng xét ở cấp tải phá hoại của dầm đối chứng. Kết quả này cho thấy ảnh hưởng của sợi thép đến mức độ giảm chuyển vị của dầm liên tục rõ nét hơn so với của dầm đơn giản. Ngoài ra, chuyển vị lớn nhất của dầm liên tục nhỏ hơn so với của dầm đơn giản xấp xỉ 1,44 lần (dầm không sợi) và 1,53 (dầm có sợi).

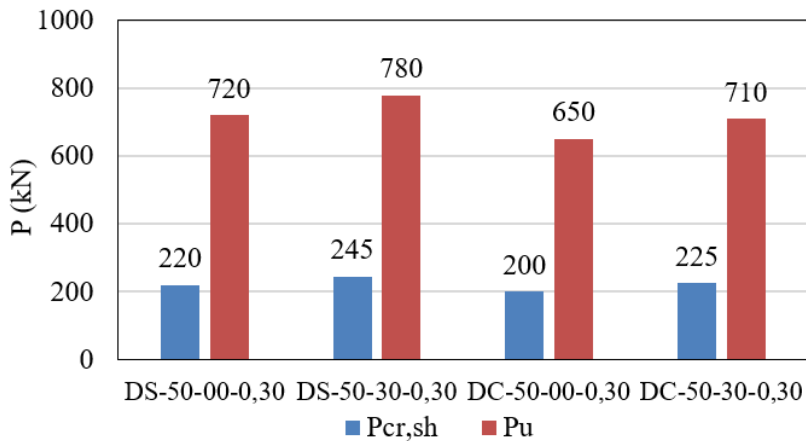
3.3. Khả năng kháng nứt xiên và khả năng kháng cắt

Sợi thép với hàm lượng 30 kg/m^3 làm tăng khả năng kháng nứt xiên ($P_{cr,sh}$) của các dầm đơn giản và của dầm liên tục lần lượt là 11,4 và 12,5% (Bảng 3 và Hình 5). Khả năng kháng nứt xiên của dầm



Hình 4. Quan hệ lực và chuyển vị giữa nhịp của các dầm

liên tục nhỏ hơn so với của dầm đơn giản xấp xỉ 10% (dầm không sợi) và 9% (dầm có sợi).



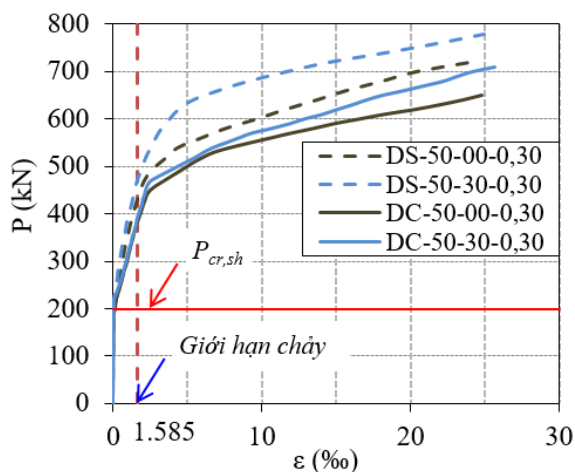
Hình 5. Khả năng kháng nứt xiên và khả năng kháng cắt của các dầm

Sợi thép cũng làm tăng đáng kể khả năng kháng cắt (P_u) của các dầm. Khả năng kháng cắt của dầm đơn giản và của dầm liên tục tăng lần lượt 8,3 và 9,2% khi được gia cường sợi thép với hàm lượng 30 kg/m^3 . Có thể thấy rằng hiệu quả của sợi thép trong việc cải thiện khả năng kháng cắt của dầm liên tục có xu hướng cao hơn so với của dầm đơn giản. Khả năng kháng cắt của dầm liên tục nhỏ hơn so với của dầm đơn giản xấp xỉ 10% đối với cả dầm không và có sợi thép.

Khả năng kháng nứt xiên và kháng cắt của dầm liên tục đều có xu hướng nhỏ hơn so với của dầm đơn giản có thể là do phản lực tại vị trí gối giữa của dầm liên tục lớn hơn đáng kể so với phản lực gối của dầm đơn giản khi cùng chịu tải trọng như nhau theo lý thuyết đàn hồi. Điều này khiến cho lực nén trong thanh chống ở vùng gối giữa của dầm cao liên tục lớn hơn so với của dầm đơn giản; cho nên dầm cao liên tục có xu hướng bị nứt sớm hơn (hay khả năng kháng nứt nhỏ hơn) và bị phá hoại sớm hơn (hay khả năng kháng cắt bé hơn) so với của dầm cao đơn giản như kết quả thực nghiệm đã cho thấy.

3.4. Quan hệ lực - biến dạng của cốt đai

Quan hệ tải trọng và biến dạng của cốt đai được thể hiện như Hình 6. Mỗi quan hệ lực và biến dạng cốt đai có thể được chia thành hai giai đoạn: trước và sau khi xuất hiện vết nứt xiên. Trước khi xuất hiện vết nứt xiên, biến dạng của cốt đai rất nhỏ và biến dạng của cốt đai của các dầm liên tục có xu hướng nhỏ hơn so với của dầm đơn giản. Nhưng sau khi xuất hiện vết nứt xiên, biến dạng của cốt đai tăng nhanh và biến dạng của các dầm liên tục bắt đầu lớn dần và tăng nhanh hơn so với của dầm đơn giản. Cốt đai của tất cả các dầm đều bắt đầu chảy sau khi vết nứt xiên xuất hiện ở cấp tải từ 59 đến 60% P_u với P_u là lực lớn nhất (Nhóm A - dầm đơn giản) và từ 54 đến 58% P_u (Nhóm B - dầm liên tục). Kết quả này cho thấy rằng cả hàm lượng sợi thép và sơ đồ thí nghiệm của dầm đều có ảnh hưởng đến thời điểm chảy của cốt đai; theo đó, cốt đai của các dầm có sợi thép có xu hướng chảy trễ hơn so với của dầm không sợi và cốt đai của dầm liên tục chảy sớm hơn so với của dầm đơn giản. Nguyên nhân là do vết nứt xiên trong dầm liên tục đã xuất hiện sớm hơn so với của dầm đơn giản (Bảng 3). Khi dầm bị phá hoại, cốt đai tại vị trí phá hoại đều bị chảy dẻo ở mức độ lớn.



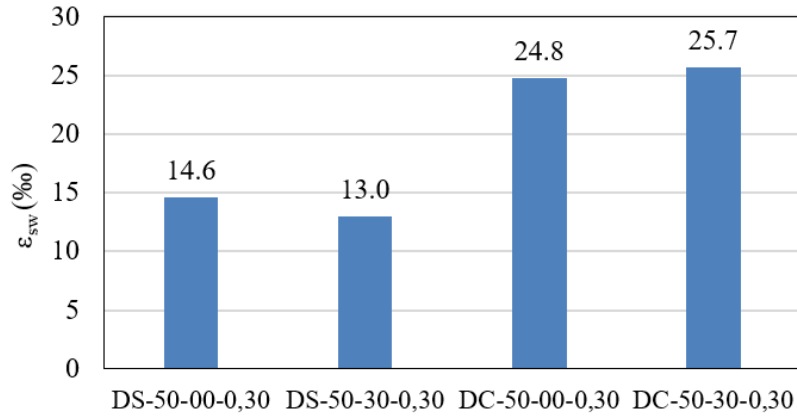
Hình 6. Quan hệ lực và biến dạng cốt đai của dầm

Biến dạng của cốt đai của các dầm có sợi thép giảm đáng kể khi so sánh với của dầm đối chứng không sợi. Cụ thể, đối với nhóm A (nhóm dầm đơn giản), biến dạng của cốt đai của dầm có sợi giảm 39,9% so với của dầm không sợi xét tại cấp tải phá hoại của dầm không sợi. Đối với nhóm B (nhóm dầm liên tục), biến dạng của cốt đai của dầm có sợi giảm 27,0% so với của dầm không sợi xét tại cấp tải phá hoại của dầm không sợi. Xét ở cấp tải phá hoại của dầm liên tục, biến dạng của cốt đai dầm liên tục giảm 1,8 lần (dầm không có sợi thép) và giảm đến 2,7 lần (dầm có sợi thép) so với biến dạng của dầm đơn giản (Hình 7).

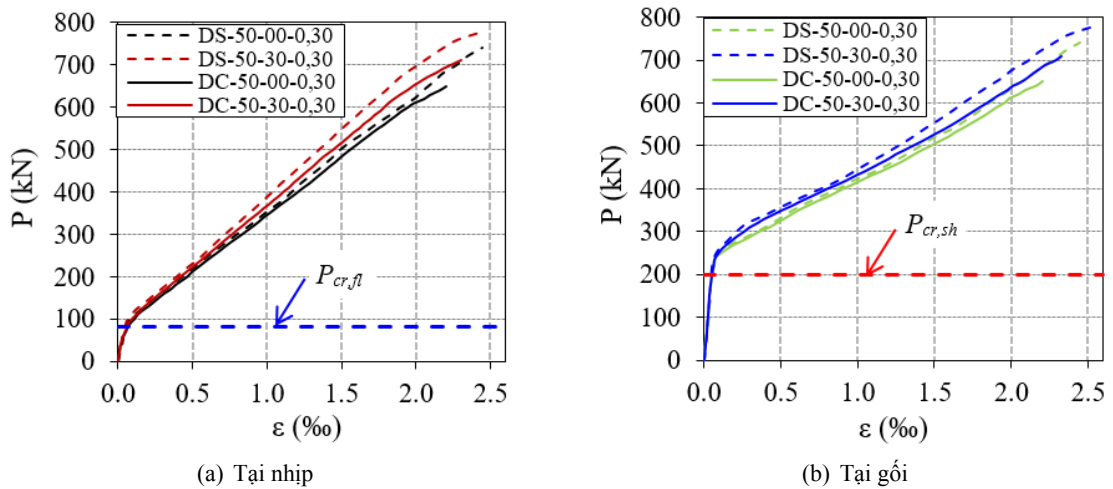
3.5. Quan hệ lực - biến dạng của cốt dọc

Quan hệ lực - biến dạng của cốt dọc tại vị trí giữa nhịp và tại các gối biên được thể hiện ở Hình 8. Ở giai đoạn trước khi vết nứt xiên xuất hiện, biến dạng cốt dọc ở giữa nhịp lớn hơn ở vị trí gần gối tựa. Sau khi xuất hiện vết nứt xiên, biến dạng cốt thép dọc ở vị trí gần gối tựa phát triển nhanh hơn so với biến dạng ở vị trí giữa nhịp và tiệm cận gần với biến dạng của cốt dọc giữa nhịp ở các cấp tải cuối cùng. Nguyên nhân của hiện tượng này là do sự xuất hiện của hiệu ứng vòm trong dầm cao ở các cấp tải cuối gần cấp tải phá hoại của dầm.

Biến dạng của cốt dọc của các dầm sợi thép có xu hướng giảm so với của dầm không sợi. Nguyên nhân có thể là do sợi thép làm tăng khả năng chịu kéo của bê tông cũng như khả năng bám dính của bê tông với cốt dọc [22] nên dẫn đến biến dạng của cốt thép dọc giảm. Biến dạng cuối cùng của cốt



Hình 7. Biến dạng cốt đai của dầm liên tục và của dầm đơn giản tại cấp tải phá hoại của dầm liên tục



Hình 8. Quan hệ lực và biến dạng cốt dọc của dầm

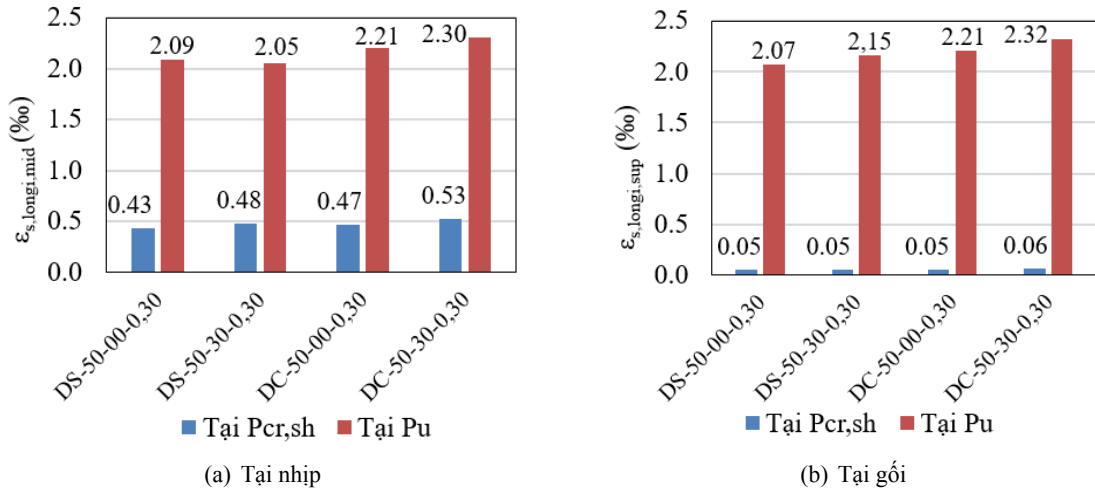
thép dọc của dầm đơn giản dùng sợi thép giảm 10,9% so với của dầm đối chứng ở cấp tải phá hoại của dầm đối chứng; đối với dầm liên tục, mức giảm này là 9,6 % (Bảng 3).

Biến dạng cốt dọc của dầm liên tục có xu hướng lớn hơn nhẹ so với của dầm đơn giản. Tại cấp tải xuất hiện vết nứt xiên của dầm liên tục, biến dạng của dầm liên tục cao hơn so với của dầm đơn giản từ 7,4 đến 10,3% tại gối biên và từ 7,5 đến 16,8% tại vị trí nhịp. Tại cấp tải phá hoại của dầm liên tục, biến dạng của cốt dọc của dầm liên tục cao hơn so với của dầm đơn giản từ 7,2 đến 12,4% tại vị trí gối và cao hơn 6,6 đến 8,3% tại vị trí nhịp.

3.6. Quan hệ lực - bề rộng vết nứt cắt

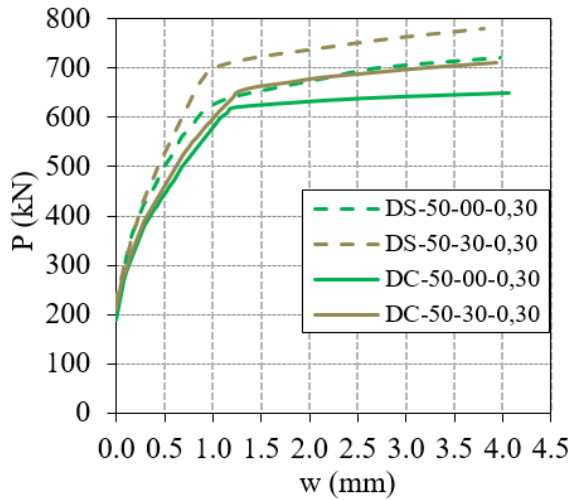
Quan hệ lực và bề rộng vết nứt xiên chủ đạo của dầm được thể hiện ở Hình 10. Sợi thép làm giảm mạnh bề rộng vết nứt của dầm. Xét ở cấp tải P_u của dầm đối chứng, bề rộng vết nứt của các dầm nhóm A (dầm đơn giản) sử dụng sợi thép giảm 64,8% so với của dầm không sợi (dầm đối chứng); tương tự, bề rộng vết nứt của các dầm nhóm B sử dụng sợi thép giảm 69,2% so với của dầm đối chứng.

Bề rộng vết nứt của dầm liên tục có xu hướng lớn hơn so với của dầm đơn giản. Ở cấp tải phá hoại của dầm liên tục, bề rộng vết nứt của dầm liên tục không có sợi thép lớn hơn 2,8 lần so với của dầm đơn giản không có sợi thép. Đối với các dầm sử dụng sợi thép, ở cấp tải phá hoại của dầm liên tục, bề



Hình 9. Biến dạng cốt dọc tại cấp tải gây nứt xiên ($P_{cr,sh}$) và cấp tải phá hoại (P_u)

rộng vết nứt của dầm liên tục sử dụng sợi thép lớn hơn đến 3,3 lần so với của dầm đơn giản sử dụng sợi thép.

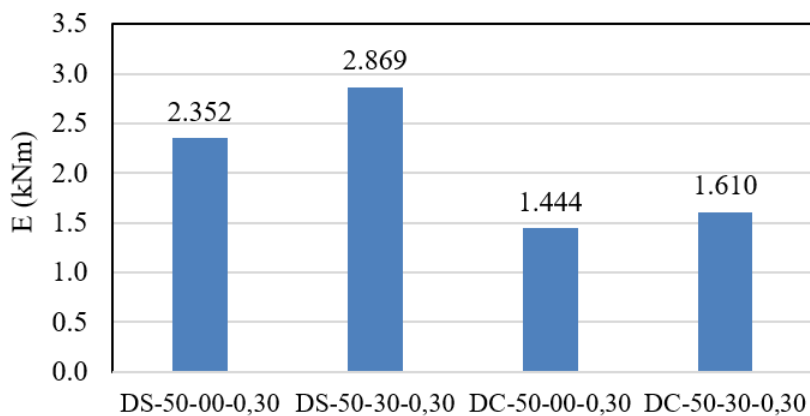


Hình 10. Quan hệ lực và bề rộng vết nứt xiên chủ đạo của dầm

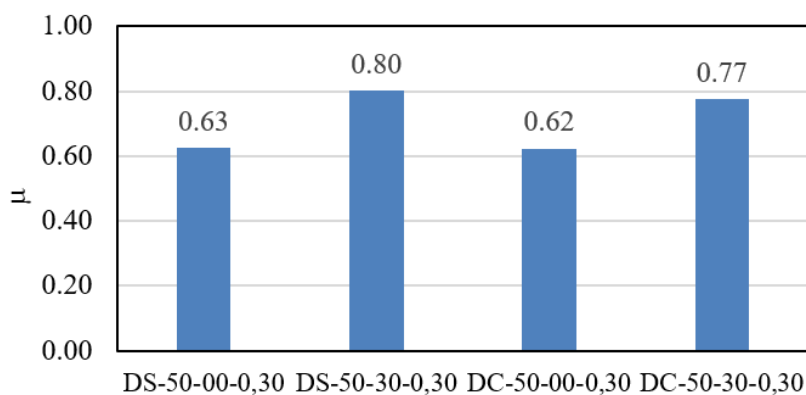
3.7. Khả năng hấp thụ năng lượng và độ dẻo dai

Sợi thép làm tăng khả năng hấp thụ năng lượng của dầm. Năng lượng hấp thụ của dầm được xác định bằng diện tích phía dưới đường cong lực và chuyển vị, được xác định theo [23]. Năng lượng hấp thụ của dầm đơn giản có sợi thép tăng 22,0% so với của dầm đối chứng không sợi. Tương tự, năng lượng hấp thụ của dầm sợi thép liên tục tăng 11,5% so với của dầm đối chứng không sợi. Kết quả này cho thấy năng lượng hấp thụ của dầm tăng đáng kể khi có gia cường sợi thép. Đồng thời, chúng cũng cho thấy mức tăng năng lượng hấp thụ của các dầm liên tục (nhóm B) thấp hơn so với của các dầm đơn giản (nhóm A) (Hình 11).

Sợi thép làm gia tăng độ dẻo dai của kết cấu thể hiện qua chỉ số μ (Hình 12). Chỉ số μ này được tính theo nghiên cứu của [24]. Độ dẻo dai của các dầm đơn giản có sợi thép tăng 28,2% so với của dầm đối chứng. Tương tự, độ dẻo dai của các dầm liên tục dùng sợi thép với hàm lượng 30 kg/m³



Hình 11. Năng lượng hấp thụ của các dầm



Hình 12. Chỉ số dẻo dai của các dầm

tăng 24,3% so với của dầm đối chứng. Có thể thấy hiệu quả của sợi thép trong việc cải thiện độ dẻo dai của dầm liên tục thấp hơn so với của dầm đơn giản.

4. Kết luận

Bài báo nghiên cứu thực nghiệm hiệu quả làm việc của sợi thép trong việc cải thiện các đặc trưng kết cấu của dầm cao bê tông sợi thép liên tục chịu tác dụng bởi lực cắt và so sánh với trường hợp dầm đơn giản. Chương trình thực nghiệm được thực hiện trên bốn dầm cao bê tông sợi thép với hàm lượng sợi thay đổi lần lượt là 0 và 30 kg/m³ bê tông. Các dầm được chia thành hai nhóm; trong đó, nhóm A (các dầm đơn giản) có kích thước hình học 2000×500×150 (mm) và nhóm B (các dầm liên tục hai nhịp) có kích thước 3600×500×150 (mm). Các mẫu dầm được thiết kế theo tỉ lệ mô hình là 1:4 so với dầm cao thực tế. Dựa trên các kết quả thực nghiệm thu được, một số kết luận có thể được rút ra như sau:

- Sợi thép giúp cải thiện đáng kể các đặc trưng kết cấu của dầm cao như:
 - + Tăng khả năng kháng nứt xiên (lên tới 12,5%) và tăng sức kháng cắt (lên tới 9,2%);
 - + Giảm bề rộng vết nứt (đến 69,2%) và chuyển vị (đến 11,1%);
 - + Tăng khả năng hấp thụ năng lượng (tối đa 22,0%) và độ dẻo dai (tối đa 28,2%).
- Hiệu quả của sợi thép trong việc cải thiện các đặc trưng kết cấu của dầm cao liên tục có xu hướng giảm rõ so với của dầm cao đơn giản, cụ thể như sau:
 - + Giảm khả năng kháng nứt xiên và khả năng kháng cắt (xấp xỉ 10%);
 - + Tăng bề rộng vết nứt đáng kể (đến 3,3 lần);

+ Tăng biến dạng cốt đai (đến 2,7 lần).

Điều này thật sự đáng lưu tâm khi mà hầu hết các nghiên cứu về ứng xử của dầm cao bê tông sợi thép hiện nay đều được thực hiện trên dầm cao đơn giản.

- Sơ đồ thí nghiệm dầm (đơn giản hay liên tục) ảnh hưởng không rõ nét đến hình thái, bề rộng cuối cùng của vết nứt và kiểu phá hoại của dầm cũng như khả năng chịu lực của dầm; tuy nhiên, nó ảnh hưởng mạnh đến các đặc trưng biến dạng (chuyển vị) của dầm đi kèm theo là khả năng hấp thụ năng lượng và chỉ số dẻo của dầm.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ kinh phí bởi Bộ Xây dựng từ đề tài nghiên cứu khoa học mã số: RD34-22. Các tác giả cũng chân thành cảm ơn sự hỗ trợ về mặt chuyên môn kỹ thuật của Phòng Thí nghiệm Kết cấu Công trình, Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Đại học Quốc gia TP. HCM - Trường Đại học Bách Khoa.

Tài liệu tham khảo

- [1] Roberts, T. M., Ho, N. L. (1982). [Shear failure of deep fibre reinforced concrete beams](#). *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 4(3):145–152.
- [2] Ma, K., Qi, T., Liu, H., Wang, H. (2018). [Shear behavior of hybrid fiber reinforced concrete deep beams](#). *Materials*, 11(10):2023.
- [3] Narayan, R., Darwish, I. Y. S. (1988). [Fiber concrete deep beams in shear](#). *ACI Structural Journal*, 85(2):141–149.
- [4] Nguyen-Minh, L., Rovňák, M. (2011). [New formula for the estimation of shear resistance of fibre reinforced beams](#). *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(1):23–35.
- [5] Luu-Thanh, B., Nguyen-Minh, L., Namba, T., Nakagawa, K., Oki, K., Ngo-Huu, C. (2022). [Distinguished punching shear behaviour of unbonded post-tensioned concrete slab – CFT column vs reinforced concrete slab – CFT column connections](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 16(3):29–45.
- [6] Swaddiwudhipong, S., Shanmugam, N. E. (1985). [Fiber reinforced concrete deep beams with openings](#). *Journal of Structural Engineering*, 111(8):1679–1690.
- [7] Mansur, M. A., Ong, K. C. G. (1991). [Behavior of reinforced fiber concrete deep beams in shear](#). *ACI Structural Journal*, 88(1):98–105.
- [8] Yoo, D.-Y., Yang, J.-M. (2018). [Effects of stirrup, steel fiber, and beam size on shear behavior of high-strength concrete beams](#). *Cement and Concrete Composites*, 87:137–148.
- [9] Moradi, M., Esfahani, M. R. (2017). [Application of the strut-and-tie method for steel fiber reinforced concrete deep beams](#). *Construction and Building Materials*, 131:423–437.
- [10] Do-Dai, T., Tran, D. T., Nguyen-Minh, L. (2021). [Effect of fiber amount and stirrup ratio on shear resistance of steel fiber reinforced concrete deep beams](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 15(2):1–13.
- [11] Dang, T. D., Tran, D. T., Nguyen-Minh, L., Nassif, A. Y. (2021). [Shear resistant capacity of steel fibres reinforced concrete deep beams: An experimental investigation and a new prediction model](#). *Structures*, 33:2284–2300.
- [12] Nayak, C. B. (2021). [Experimental and numerical study on reinforced concrete deep beam in shear with crimped steel fiber](#). *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(1):41.
- [13] Sagar Varma Sagi, M., Lakavath, C., Suriya Prakash, S. (2022). [Effect of steel fibers on the shear behavior of Self-Compacting reinforced concrete deep Beams: An experimental investigation and analytical model](#). *Engineering Structures*, 269:114802.
- [14] Sandeep, M. S., Nagarajan, P., Shashikala, A. P. (2022). [Behavior of steel fiber-reinforced rubcrete deep beams under shear](#). *ACI Structural Journal*, 119(1):15–25.
- [15] Albidah, A. S. (2023). [Shear behaviour of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete deep beams](#). *Engineering Structures*, 275:115271.

- [16] Hussain, L. N., Hamood, M. J., Al-Shaarbaf, E. A. (2024). [Behavior of ultra-high-performance concrete deep beams reinforced by basalt fibers](#). *Open Engineering*, 14(1).
- [17] Fan, S., Du, P., Tan, K. H. (2024). [Synergistic effects of web reinforcement and hybrid fibres on shear performance of continuous deep beams with unsymmetrical web openings](#). *Engineering Structures*, 300: 117129.
- [18] Arabzadeh, A. (2020). [Analysis of boundary condition effects on RC deep beams](#). *Structures*, 23:821–830.
- [19] Zeinab Reda, M., Ibrahim Hassan, E.-K., Ehab Mohamed, L., Erfan Abd, E.-L. (2020). Numerical study of steel fiber reinforced concrete continuous deep beams with openings. *Life Science Journal*, 17(11):245.
- [20] Deng, M., Ma, F., Wang, X., Lü, H. (2020). [Investigation on the shear behavior of steel reinforced NC/HDC continuous deep beam](#). *Structures*, 23:20–25.
- [21] Yousef, A. M., Tahwia, A. M., Al-Enezi, M. S. (2023). [Experimental and numerical study of UHPFRC continuous deep beams with openings](#). *Buildings*, 13(7):1723.
- [22] Yoo, D.-Y., Moon, D.-Y. (2018). [Effect of steel fibers on the flexural behavior of RC beams with very low reinforcement ratios](#). *Construction and Building Materials*, 188:237–254.
- [23] ACI 544.4R-18 (2018). *Guide to design with fiber-reinforced concrete*. American Concrete Institute.
- [24] Park, R. (1989). Structural assemblages from laboratory testing. *NZSEE – New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 22(3):155–166.