Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, Tập 77, Số 02 (02/2026), 154-165

Transport and Communications Science Journal

EFFECT OF INCLINED STIRRUPS WITH AN ANGLE FROM 90° TO 135 ºON SHEAR-TRANSFER MECHANISMS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Nguyen Dinh Hung[1*], Nguyen Tu Thang[1], Nguyen DVT Thuy Tien[2], Phan Lam Ven[1] and Tran Ngoc Linh[1]

[1]Vietnamese - German University, Ring Road 4, Quarter 4, Thoi Hoa, HoChiMinh City.

[2]An Giang Vocational College, No. 841 Tran Hung Dao Street, Bình Duc, An Giang

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article
Received: 28/08/2025
Revised: 24/11/2025
Accepted: 04/02/2026
Published online: 15/02/2026
https://doi.org/10.47869/tcsj.77.2.1

[*] *Corresponding author:*
Email: hung.nd2@vgu.edu.vn ; Tel: +84968069559

Abstract. Stirrups are normally arranged from 45° to 90° to a beam axis to prevent shear crack and improving the shear carrying capacity of the normal reinforced concrete (RC) beams designed horizontally. However, in inclined RC elements, stirrups were arranged parallelly or vertically to the earth surface to be constructed easily. Under uncertain direction load such as earthquake, wind water pressure or collision loads and so on, the angle of stirrup could become larger than 90°. In that case, the contribution of the stirrups on shear carrying capacity can be minimized and the shear transferring mechanism can be changed. This paper presents experimental results on RC beams with the inclined angle of stirrups of 90°, 105°, 125° và 135°. The results showed that all tested beams were failed in shear compression mode. The angle of the critical shear crack in the RC beam with the inclined angle of stirrup greater than 90° was guided by the inclined stirrup. Therefore, the larger the inclined angle of the stirrup is, the smaller the angle of critical shear crack is and the smaller the shear carrying capacity of the beam is. The experimental result also showed that the inclined angle of stirrups should not be larger than 105°.

Keywords: reinforced concrete, inclined stirrup, shear carrying capacity, critical shear crack, crack angle, shear compression failure mode.

@ 2026 University of Transport and Communications

Transport and Communications Science Journal, Vol.77, Issue 02 (02/2026), 154-165

Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải

ẢNH HƯỞNG CỦA CỐT ĐAI NGHIÊNG TỪ 90° TỚI 135° ĐẾN CƠ CHẾ TRUYỀN LỰC CẮT CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP THƯỜNG

Nguyễn Đình Hùng[1*], Nguyễn Từ Thắng[1], Nguyễn ĐVT Thủy Tiên[2], Phan Lâm Vẹn[1], Trần Ngọc Linh[1]

[1]Trường Đại học Việt Đức, Đường Vành đai 4, Phường Thới Hòa, TP. Hồ Chí Minh.

[2]Trường Cao đẳng nghề An Giang, 841 Trần Hưng Đạo, Phường Bình Đức, Tỉnh An Giang

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học
Ngày nhận bài: 28/08/2025
Ngày nhận bài sửa: 24/11/2025
Ngày chấp nhận đăng: 04/02/2026
Ngày xuất bản Online: 15/02/2026
https://doi.org/10.47869/tcsj.77.2.1

* Tác giả liên hệ
Email: hung.nd2@vgu.edu.vn; Tel: +84968069559

Tóm tắt. Cốt đai thường được bố trí ở góc 45° đến 90° so với trục dầm để chống lại vết nứt cắt và làm tăng khả năng chống cắt của cấu trong cấu kiện bê tông cốt thép thường nằm ngang. Nhưng đối với các cấu kiện bê tông cốt thép thường được thiết kế nghiêng, cốt đai có thể được bố trí song song hoặc vuông góc với mặt đất cho dễ thi công. Dưới tác động của lực đổi chiều như lực động đất, lực gió, áp lực dòng chảy, lực va xô … góc nghiêng của cốt đai có thể thành lớn hơn 90°. Khi đó, sự đóng góp của cốt đai vào sức kháng cắt có thể bị suy giảm và cơ chế truyền lực có thể bị thay đổi. Bài báo này trình bày kết quả thí nghiệm dầm bê tông cốt thép có góc cốt đai là 90°, 105°, 125° và 135°. Kết quả cho thấy các dầm đều có cơ chế phá hủy cắt nén. Góc nghiêng của vết nứt cắt nghiêng quyết định trong dầm có cốt đai nghiêng lớn hơn 90° bị dẫn hướng bởi cốt đai nghiêng. Do đó, góc nghiêng của cốt đai càng lớn thì góc nghiêng của vết nứt nghiêng quyết định càng nhỏ làm giảm khả năng chịu lực cắt của dầm. Kết quả cho thấy góc nghiêng của cốt đai không nên lớn hơn 105°.

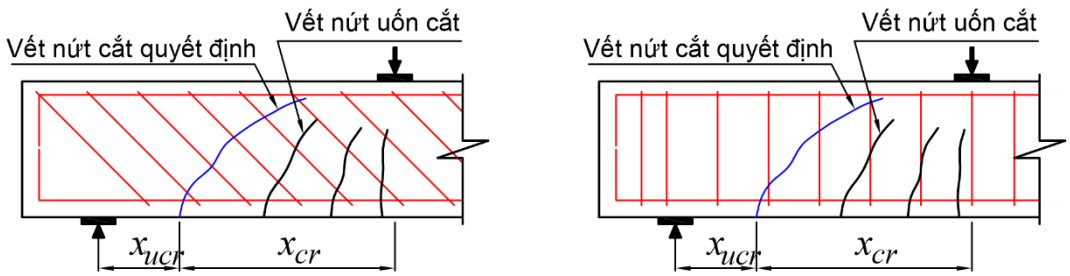
Từ khóa: bê tông cốt thép thường, cốt đai, sức kháng cắt, vết nứt cắt nghiêng quyết định, góc nghiêng của vết nứt cắt, cơ chế phá hủy cắt nén.

@ 2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu BTCT là kết cấu chủ yếu trong xây dựng công trình giao thông và dân dụng như cầu đường, nhà cửa, cảng sông biển, … Để đảm bảo sử dụng an toàn và bền lâu, kết cấu dầm BTCT thường được kiểm tra khả năng chống cắt, chống uốn và các khả năng chịu lực khác. Khả năng chống cắt của kết cấu dầm BTCT phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như kích thước bề rộng và chiều cao có hiệu của mặt cắt, hàm lượng và trọng tâm của cốt thép chịu uốn, hàm lượng và khoảng cách của cốt thép đai, góc nghiêng của cốt đai, cường độ bê tông, cường độ cốt thép chịu uốn và cốt thép đai, tỷ số giữa chiều cao có hiệu của mặt cắt và chiều dài nhịp cắt [1-4]. Các yếu tố trên lại không tác động độc lập mà có sự ảnh hưởng lẫn nhau dẫn đến cơ chế phá hủy rất phức tạp.

Trên thế giới, các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm đã được thực hiện nhằm mục đích làm sáng tỏ cơ chế truyền lực trong các dầm BTCT thường bị phá hủy cắt [2]. Sức kháng cắt của dầm bê tông cốt thép có cốt đai chủ yếu dựa trên mô hình dàn ảo. Trong đó, thanh dàn chịu nén được quy ước là 45° [1]. Hay nói cách khác là quy ước vết nứt nghiêng do cắt gây ra phá hủy kết cấu tạo ra góc nghiêng 45° so với trục dầm theo ngược chiều kim đồng hồ, gọi là vết nứt cắt nghiêng quyết định. Do đó, để chống lại vết nứt cắt nghiêng quyết định và tạo ra thanh dàn đứng chịu kéo, cốt đai được bố trí nghiêng 45°, vuông góc với vết nứt cắt nghiêng quyết định như Hình 1a, hay còn gọi là cốt đai được bố trí 45° so với trục dầm. Tuy nhiên, việc cốt đai được bố trí xiên thường gây khó khăn cho thi công. Do đó, cốt đai thường bố trí vuông góc với trục dầm như Hình 1b, hay còn gọi là cốt đai bố trí 90° so với trục dầm. Các nghiên cứu sau này chỉ ra rằng vết nứt nghiêng do phá hủy cắt có thể lớn hơn hoặc nhỏ hơn 45° [5, 6]. Tuy nhiên, việc xác định được góc nghiêng do phá hủy cắt chính xác vẫn còn là một thách thức. Mặc dù vậy, bố trí cốt đai nghiêng 45° vẫn là một lựa chọn được sử dụng để chống lại vết nứt cắt nghiêng quyết định.



a) Cốt đai nghiêng (45°) b) Cốt đai nghiêng (90°)

x_{ucr} chiều dài vùng không bị nứt, x_{cr} là chiều dài vùng bị nứt

Hình 1. Bố trí cốt đai chống lực cắt trong dầm BTCT thường.

Các Tiêu chuẩn và các nghiên cứu đều thống nhất sức kháng cắt của kết cấu dầm BTCT thường (V_u) là tổng khả năng chịu cắt tính toán của bê tông (V_c) và cốt đai (V_s) [5, 6]. Các công thức dự đoán sức kháng cắt của bê tông lại rất khác nhau và phụ thuộc vào các yếu tố kể trên, trong khi công thức dự đoán sức kháng cắt của cốt đai lại khá thống nhất trong các tiêu chuẩn và nghiên cứu. Tuy nhiên, công thức dự đoán sức kháng cắt của cốt đai thường dùng cho cốt đai có góc nghiêng từ 45° tới 90°. Các nghiên cứu vẫn tiếp tục để làm tăng sức kháng cắt của dầm BTCT và dự đoán sức kháng cắt có độ chính xác cao hơn. Các nghiên cứu trước thường tập trung vào việc bố trí cốt đai với góc nghiêng từ 45° đến 90° [7-9] và nghiên cứu sự ảnh hưởng của hàm lượng cốt dọc đến sức kháng cắt của dầm [3, 4]. Cốt thép dọc chịu uốn gần về

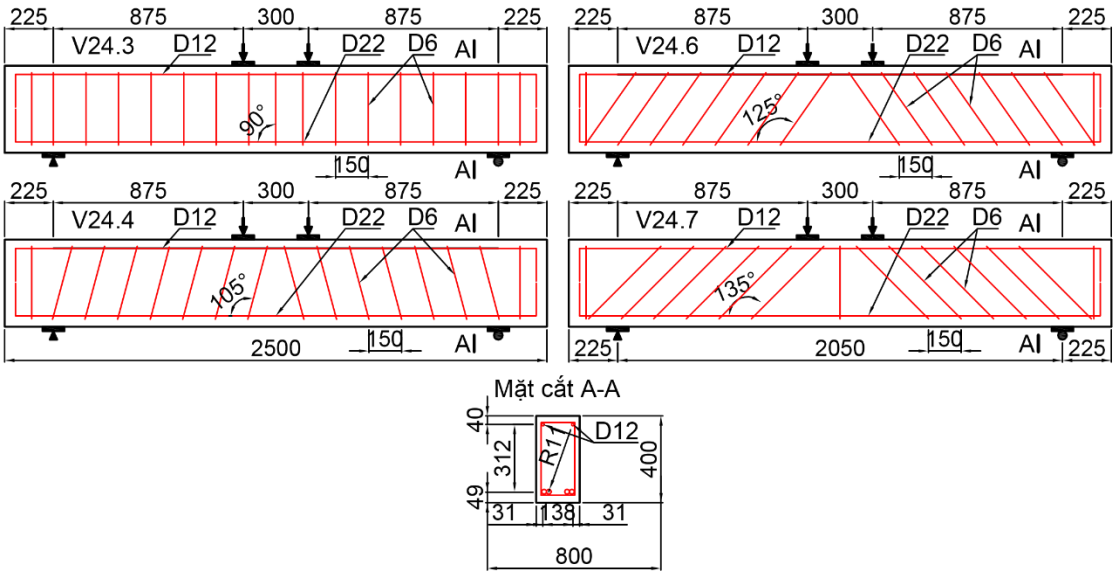
gối cũng thường được uốn nghiêng lên 45° để chống lại vết nứt nghiêng do phá hủy cắt. Ở trong nước, một số nghiên cứu tập trung vào đánh giá khả năng dự đoán của các công thức trong các Tiêu chuẩn [10-12]. Trong các nghiên cứu trước đây, góc nghiêng của cốt đai lớn hơn 90° không được nghiên cứu.

Trong thực tế, có rất nhiều dầm và cột được thiết kế xiên như dầm mái xiên, cầu thang trong nhà hay trong các nhà ga tàu điện, các cột và trụ cầu được thiết kế nghiêng. Đối với các cấu kiện nghiêng, việc bố trí cốt đai vuông góc với trục dầm lại gây khó khăn cho thi công. Đặc biệt là ở vùng đầu cấu kiện nghiêng, nơi cấu kiện giao với các kết cấu khác, có thể có mật độ cốt thép cao. Do đó, bố trí cốt đai song song hoặc vuông góc với mặt đất sẽ dễ thi công hơn. Khi đó, góc nghiêng của cốt đai có thể lớn hơn 90° (cốt đai gần song song với vết nứt cắt trong kết cấu). Ngoài ra, khi các cấu kiện trụ cầu nghiêng, việc bố trí cốt đai song song hoặc vuông góc với mặt đất có thể tạo ra góc của cốt đai lớn hơn 90° khi chịu lực có hướng đổi chiều như động đất, lực gió, áp lực dòng chảy hoặc lực va xô của tàu thuyền ... Vì vậy, nghiên cứu khả năng chịu lực của cấu kiện BTCT thường có cốt đai nghiêng lớn hơn 90° là cần thiết.

2. THÍ NGHIỆM

2.1. Dầm thí nghiệm

Có bốn (04) dầm dạng dầm giản đơn bằng bê tông cốt thép thường được sử dụng trong thí nghiệm này. Mỗi dầm có chiều dài 2,5 m, cao 40 cm và rộng 20 cm như Hình 2. Khoảng cách giữa hai tim gối dầm là 2,05 m. Khoảng cách từ tim gối đến đầu dầm là 22,5 cm. Dầm có nhịp chịu cắt là 875 mm (*a*) và tỷ số chiều cao có hiệu của mặt cắt (*d*) và chiều dài nhịp cắt là khoảng 2,5. Với tỷ số *a*/*d* xấp xỉ 2,5, cấu kiện ứng xử gần với cấu kiện dầm cao và có thể bị phá hủy theo cơ chế nén cắt (shear compression failure mode) đối với cốt đai 90º. Nhưng góc cốt đai lớn hơn 90º, mô hình phá hủy của dầm có thể bị thay đổi. Do đó tỷ số *a*/*d* bằng 2,5 được lực chọn. khi Dầm V24.3 là dầm đối chứng với góc của cốt đai là 90°. Dầm V24.5, V24.6 và V24.7, góc nghiêng của cốt đai so với trục dầm lần lượt là 105°, 125° và 135° để nghiên cứu sự ảnh hưởng của góc nghiêng cốt đai lớn hơn 90° so với trục dầm. Kết cấu nghiêng còn chịu lực dọc trục. Tuy nhiên, lực dọc trục thường nhỏ. Việc tạo ra lực dọc trục nhỏ trong kết cấu nhỏ cũng khó thực hiện, nên trong thí nghiệm này lực dọc trục bị bỏ qua.



Hình 2. Kích thước của các dầm thí nghiệm.

2.2. Vật liệu

Bê tông của dầm được thiết kế sao cho cường độ chịu nén của bê tông, f'_c khoảng 30 MPa, tương đương mác bê tông của dầm BTCT thường trong thực tế trong xây dựng công trình. Độ hút nước của cát và đá dăm được thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM C128 [13] lần lượt là 1,25% và 0,7%. Lượng nước hút ẩm của cát và đá dăm phải được kể đến trong quá trình thiết kế cấp phối. Cát được dùng để thí nghiệm có kích cỡ lọt qua cỡ sàng No.4 (4,75 mm) và sót lại trên cỡ sàng No. 200 (0,075 mm). Môđun độ mịn của cát được xác định theo tiêu chuẩn ASTM C125 [14] là 1,8. Khối lượng thể tích của cát và của đá được đo lần lượt bằng thùng 5 lít và 15 lít và có khối lượng thể tích của cát và đá dăm lần lượt là 1470 kg/m^3 và 1554 kg/m^3. Khối lượng riêng của cát và đá dăm được đo bằng bình tỷ trọng theo tiêu chuẩn ASTM C128 [13]. Trong đó, đá dăm có kích thước nhỏ hơn được sàng loại bỏ và được sử dụng để đo khối lượng riêng. Khối lượng riêng của cát và đá dăm có kết quả lần lượt là 2,67 tấn/m^3 và 2,57 tấn/m^3. Các loại xi măng Pooclăng hỗn hợp (PCB40) của hãng FICO được sử dụng trong thí nghiệm này. Nước sinh hoạt được sử dụng trong bê tông. Cấp phối bê tông của dầm được thiết kế dựa trên tiêu chuẩn ACI [15] và được chỉ ra trong Bảng 1.

Bảng 1. Cấp phối bê tông.

W/C	Nước, W (l)	Xi măng, C (kg)	Cát, (kg)	Đá, (kg)	Độ sụt, cm	Cường độ, f'_c (MPa)
0,37	178	500	610	980	5,0	26,4

Trong mỗi dầm, bốn (04) thanh thép loại D22 được bố trí cho cốt thép chịu kéo. Lượng cốt thép chịu uốn tương ứng với hàm lượng cốt thép bằng 1,9%. Hàm lượng cốt thép chịu uốn này nhỏ hơn hàm lượng cốt thép lớn nhất cho phép trong thiết kế theo Tiêu chuẩn Eurocode 2 [5] là 4%. Khoảng cách trống giữa hai cặp thanh cốt thép chịu kéo là 62 mm, đủ đảm bảo lớn hơn 03 lần đường kính hạt cốt liệu lớn nhất, D_{max} = 19 mm. Hai (02) thanh cốt thép loại D12 được bố trí ở vùng chịu nén của dầm. Cốt đai là loại D6. Khoảng cách cốt đai theo phương ngang được bố trí là 150 mm từ tim đến tim. Góc nghiêng của cốt đai cho các dầm V24.3, V24.5, V24.6 và V24.7 lần lượt là 90°, 105°, 125° và 135°. Mỗi loại thép lấy 3 thanh có chiều dài 60 cm để thử nghiệm kéo và xác định các đặc trưng cơ học của vật liệu. Các đặc tính về ứng suất chảy f_y và ứng suất tới hạn f_u của thép được lấy từ giá trị trung bình của ba mẫu và liệt kê trong Bảng 2.

Bảng 2. Các đặc tính của cốt thép.

Loại	Ứng suất chảy, f_y (MPa)	Ứng suất tới hạn, f_u (MPa)	Mô-đun đàn hồi, E_s (GPa)	Diện tích (mm^2)
D6	378,5	543,0	200	28,27
D12	364,1	508,7	200	113,1
D22	429,6	591,6	200	380,13

2.3. Thi công và thí nghiệm

Các thanh cốt thép được thi công như thiết kế và buộc bằng dây thép buộc như Hình 3. Các dầm được đổ trong ván khuôn thép lắp ghép như Hình 4. Ván khuôn đã được phun lớp chống dính để quá trình tháo ván khuôn tương đối thuận lợi. Các cục kê chuyên dụng được sử dụng

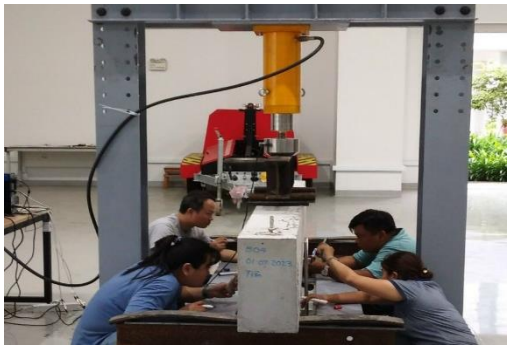
để đảm bảo khoảng cách bảo vệ cho cốt thép chịu uốn. Vật liệu cho mỗi mẻ trộn được cân đong theo cấp phối. Cối trộn cưỡng bức loại 60 lít được sử dụng. Bê tông đổ vào dầm được đầm bằng đầm rung chuyên dụng. Dầm và các mẫu bê tông được bảo dưỡng trong cùng điều kiện tại phòng thí nghiệm. Cường độ chịu nén của bê tông được tại thời điểm thí nghiệm theo mẫu hình lập phương và quy đổi ra mẫu trụ tròn có cường độ tương ứng là 26,4 MPa.

Hình 3. Cốt thép cho các dầm thí nghiệm.

Hình 4. Công tác ván khuôn.

Hình 5. Công tác lắp đặt dầm.

Hình 6. Các thiết bị đo độ võng.



Hình 7. Theo dõi các vết nứt khi gia tải.

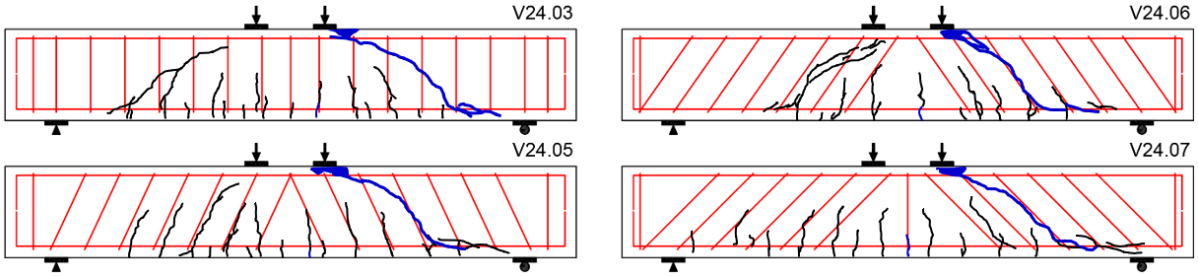
Sau 28 ngày bảo dưỡng, dầm được tháo ván khuôn và di chuyển về phía dàn gia tải để thử nghiệm như **Hình 5**. Dầm được đặt lên gối làm bằng tấm cao su rộng 10 cm, trước khi đặt trên tấm thép gối dày 10 mm và rộng 10 cm. Tấm thép gối đặt trên thanh ray tàu. Điều này cho phép dầm có thể được xoay dễ dàng tại gối trong quá trình gia tải và giúp cho dầm tiếp xúc với gối thép được tốt hơn. Kích thủy lực được kết nối với đầu đo tải (loadcell) sẽ truyền lực qua dàn gia tải bằng thanh I200 đã được gia cường với các sườn tăng cường để làm tăng độ cứng. Dàn gia tải sẽ đặt trên con lăn thép đường kính 40 mm. Dưới con lăn là tấm thép rộng 10 cm, dày 10 mm. Giữa tấm thép và dầm là là miếng cao su 10 cm để đảm bảo truyền lực giữa tấm thép

vào dầm là đều trên diện tích tiếp xúc. Khoảng cách điểm đặt lực và gối dầm được xác định cẩn thận đảm bảo đúng khoảng cách qua tim dàn nén như được thể hiện ở Hình 5. Hai (02) đầu đo biến dạng được đặt ở giữa dầm và 01 đầu đo biến dạng được đặt ở mỗi gối dầm như Hình 6 để đo độ võng của dầm. Đầu đo tải (loadcell) có khả năng đo lực đến 500 kN và các đầu đo biến dạng được kết nối với Data Logger để đo đồng thời độ võng và tải tác động lên dầm thử. Trong quá trình gia tải, vết nứt cũng thường xuyên được theo dõi tại các bước tải như Hình 7.

3. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

3.1. Mô hình vết nứt

Mô hình vết nứt của các dầm được thể hiện ở Hình 8. Các dầm được thử nghiệm theo thứ tự từ dầm V24.7, V24.6, V24.4 và V24.3. Vết nứt uốn đầu tiên của dầm V24.7 và V24.6 xảy ra ở gần vị trí giữa dầm. Trong khi đó, vết nứt uốn đầu tiên của dầm V24.4 và V24.3 ở gần vị trí của điểm đặt lực. Vết nứt uốn đầu tiên xảy ra khi lực đạt 50kN ở các dầm V24.7, V24.6 và V24.3. Trong khi đó, vết nứt uốn đầu tiên trong dầm V23.4 xảy ra khi lực đạt 50,1 kN. Như vậy, vết nứt uốn đầu tiên của các dầm gần như không khác nhau.

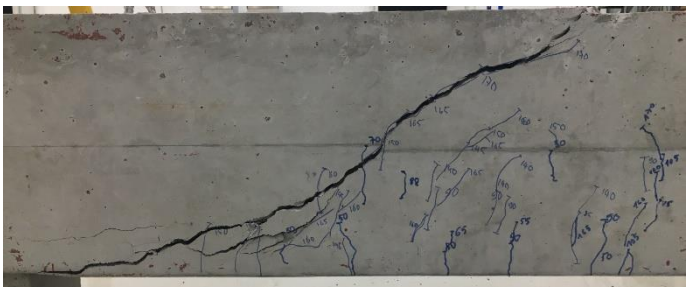


Hình 8. Mô hình vết nứt của các dầm.

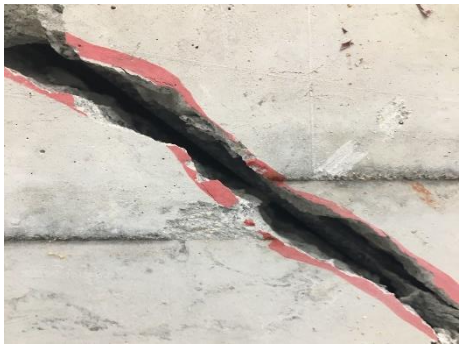
Tiếp theo các vết nứt uốn tiếp tục xuất hiện từ giữa ra hai bên gối dầm trên nhịp chịu cắt với khoảng cách khá đều nhau cho đến tải trọng khoảng 90 kN ở các dầm V24.7, V24.6 và V24.3. Trong khi đó, ở dầm V24.4, các vết nứt uốn phát triển đến tải trọng 80 kN. Thường chiều cao của các vết nứt uốn này xuất phát từ đáy dầm đến từ khoảng 60 mm đến 70 mm. Tức là các vết nứt uốn này chỉ phát triển qua cốt thép chịu uốn thì dừng. Các vết nứt uốn ở khu vực giữa hai điểm đặt tải vẫn phát triển thẳng đứng đến khoảng tải trọng 170 kN ở các dầm. Đây cũng là khu vực cốt đai nghiêng không có ở phần nửa dưới của dầm. Giai đoạn từ 90 kN đến 170 kN ở các dầm V24.7 và V24.6, giai đoạn từ 80 kN đến 170 kN ở dầm V24.4 và giai đoạn từ 90 đến 165 kN ở dầm V24.3, các vết nứt uốn ở nhịp chịu cắt tiếp tục phát triển nghiêng về phía điểm đặt tải gọi là vết nứt uốn cắt. Qua quan sát thấy rằng các vết nứt phát triển nghiêng thường trùng với vị trí của cốt đai ở dầm V24.7, V24.6 và V24.4. Đối với dầm V24.3 (cốt đai 90°) vết nứt uốn cắt thường phát triển đến cốt đai thì dừng. Trong giai đoạn vết nứt uốn cắt phát triển (từ 90 kN đến 170 kN), một mặt khác của dầm V24.7 xuất hiện một số vết nứt cắt ở khu vực bụng dầm, không bắt đầu từ vết nứt uốn như Hình 9. Trong giai đoạn này, một số vết nứt uốn cũng xuất hiện giữa các vết nứt uốn trong giai đoạn trước. Tuy nhiên vết nứt uốn này không phát triển thêm để trở thành vết nứt uốn cắt. Các vết nứt này được gọi là vết nứt uốn thứ cấp. Trong khi đó, các vết nứt uốn phát triển thành vết nứt uốn cắt được gọi là vết nứt sơ cấp.

Tại thời điểm 170 kN ở dầm V24.7, V24.6 và V24.4 và ở thời điểm 165 kN của dầm V24.3, vết nứt cắt uốn gần gối nhất có xu hướng mở rộng và phát triển nhanh dọc theo cốt đai nghiêng lên vùng chịu nén, gọi là vết nứt cắt nghiêng quyết định, rồi tiến về phía điểm đặt lực. Nhịp

chịu cắt khi đó chia làm hai vùng, gọi là vùng có vết nứt và vùng không vết nứt như Hình 1. Sau khi vết nứt cắt nghiêng quyết định xảy ra, vết nứt dọc theo cốt thép chịu uốn hình thành ở vùng bê tông không vết nứt. Đây là dấu hiệu của việc mất lực dính bám giữa cốt thép chịu kéo ở vùng không vết nứt. Tuy nhiên, các dầm tiếp tục chịu được tải trọng đến phá hủy với bê tông vùng chịu nén trước mũi vết nứt cắt nghiêng quyết định. Sau phá hủy, tại vết nứt cắt nghiêng quyết định, cốt thép đai nghiêng bị lộ ra ở dầm V24.7 và V24.6 như Hình 10. Đối với dầm V24.4, cốt đai nghiêng giao với vết nứt nghiêng quyết định được phát hiện bị đứt.



Hình 9. Vết nứt cắt ở giữa bụng dầm trên nhịp cắt dầm V24.7.

a) V24.7  b) V24.6

Hình 10. Vết nứt nghiêng quyết định tại vị trí cốt đai.

3.2. Mối quan hệ lực và độ võng

Mối quan hệ giữa lực và độ võng của dầm được thể hiện ở Hình 11. Có thể thấy rằng, hầu hết các dầm được thử nghiệm trong đợt này đều có tải trọng gây ra vết nứt uốn đầu tiên ở khoảng 50 kN. Độ võng của dầm ở tải trọng của vết nứt đầu tiên vào khoảng 0,4 mm. Mô-men nứt được tính như công thức (1). Mối quan hệ giữa mô-men nứt và lực gây ra nứt (P_{cr}) được thể hiện ở công thức (2). Vì vậy lực gây ra vết nứt uốn đầu tiên được thể hiện ở công thức (3)

$$M_{cr} = f_{ctm,fl}\frac{I}{y_b} \tag{1}$$

$$M_{cr} = P_{cr}\left(a - x_{cr} - L_p\right) \tag{2}$$

$$P_{cr} = f_{ctm,fl}\frac{I}{y_b(a - x_{cr} - L_p)} \tag{3}$$

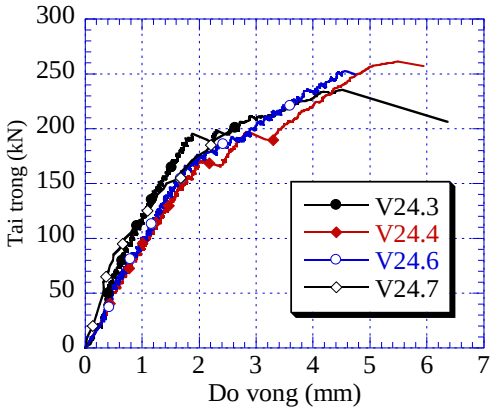
Trong đó, $f_{ctm,fl}$ là ứng suất kéo khi uốn; I là mô men quán tính của mặt cắt; y_b là khoảng cách từ trục trung hòa đến thớ dưới cùng chịu kéo; x_{cr} là chiều dài vùng bê tông bị nứt; L_p là bề rộng của tấm gia tải. Ứng suất chịu uốn khi kéo được xác định bằng các công thức từ (4) đến (6).

$$f_r = 0{,}63\sqrt{f_c'}\ [16] \quad (4)$$

$$f_{ctm,fl} = (1{,}6 - h/1000) * f_{ctm}\ [5] \quad (5)$$

$$f_r = 0{,}62\sqrt{f_c'}\ [15] \quad (6)$$

Trong đó, f'_c và f_{ctm} là cường độ chịu nén và kéo của bê tông theo mẫu lăng trụ, h là chiều cao của mặt cắt dầm. Kết quả tính toán thể hiện ở **Bảng 3** và cho thấy giá trị tải trọng thí nghiệm gây ra vết nứt uốn đầu tiên ($P_{cr.Exp}$) khá gần với giá trị tải trọng tính toán gây ra vết nứt uốn đầu tiên ($P_{cr.Cal}$) bởi 3 tiêu chuẩn thiết kế.



Hình 11. Mối quan hệ tải trọng (Tai trong) và độ võng (Do vong).

Bảng 3. Lực tại vết nứt uốn đầu tiên và sức kháng cắt của dầm.

Beams	$P_{cr.Exp}$ **(kN)**	**AASHTO**		**ACI**		**EC2.25**			$V_{u.Exp}$ **(kN)**	$V_{u.Exp}/V_{u.Cal}$
		f_r **(MPa)**	$P_{cr.Cal}$ **(kN)**	f_r **(MPa)**	$P_{cr.Cal}$ **(kN)**	$f_{ctm.fl}$ **(MPa)**	$P_{cr.Cal}$ **(kN)**	$V_{u.Cal}$ **(kN)**		
V24.3	50,0	4,27	50,3	4,62	49,6	4,21	49,5	111,8	117,8	1,05
V24.4	50,1							108,0	130,7	1,21
V24.6	50,0							91,6	126,3	1,38
V24.7	50,0							79,1	100,0	1,26

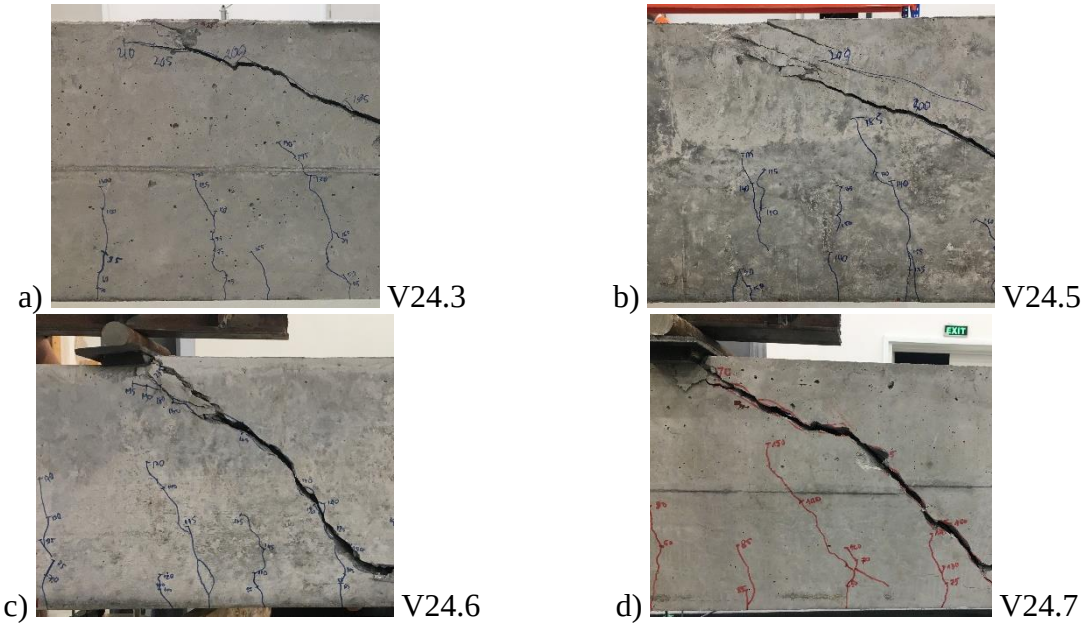
Tại tải trọng 90 kN, khi các vết nứt uốn song song với vết nứt uốn đầu tiên xuất hiện và phát triển lên đến cốt thép chịu kéo, độ võng của dầm cũng chỉ đạt trung bình xấp xỉ 0,8 mm. Tại tải trọng 170 kN, khi hầu hết các vết nứt cắt nghiêng quyết định xảy ra và mở rộng, độ võng của các dầm đạt trung bình khoảng 1,8 mm. Theo Tiêu chuẩn Eurocode 2 [5], thì độ võng của dầm có thể lấy là L/250 hoặc L/500. Lấy theo giá trị khắt khe nhất là L/500, thì độ võng tối đa cho phép của dầm là 4,1 mm. Như vậy, khi vết nứt cắt nghiêng quyết định xuất hiện, độ võng của dầm vẫn nhỏ hơn độ võng cho phép. Hay nói cách khác, các dầm được thử nghiệm không bị phá hủy uốn.

Cơ bản cũng có thể chia dầm ra làm 3 giai đoạn, giai đoạn đầu từ khi bắt đầu gia tải đến

khi vết nứt uốn đầu tiên xuất hiện với tải trọng trung bình trong các dầm là 50 kN. Đây là giai đoạn dầm làm việc tuyến tính đàn hồi không có vết nứt. Giai đoạn tiếp theo là giai đoạn tuyến tính có vết nứt. Giai đoạn này có tải trọng từ 50 kN đến khoảng 170 kN. Thực chất giai đoạn này có thể chia làm 2 giai đoạn nhỏ là từ 50 kN đến 90 kN và từ 90 kN đến 170 kN. Giai đoạn từ 50 kN đến 90 kN, các vết nứt uốn phát triển. Trong khi đó, giai đoạn từ 90 kN đến 170 kN, các vết nứt cắt phát triển từ vết nứt uốn tạo thành vết nứt uốn cắt, và các vết nứt phát triển hướng về điểm gia tải. Giai đoạn cuối cùng là giai đoạn phi tuyến. Giai đoạn này có tải trọng từ 170 kN đến khi dầm bị phá hủy. Giai đoạn này các vết nứt cắt quyết định trong dầm mở rộng đột ngột cho đến khi dầm bị phá hủy hoàn toàn. Khi các vết nứt cắt nghiêng quyết định xảy ra đã giải phóng năng lượng, đường cong tải trọng và độ võng thường xảy ra bước nhảy với lực giảm và độ võng tăng. Bước nhảy ở dầm V24.03 và V24.05 lớn hơn so với dầm V24.06 và V24.07. Lực tại thời điểm dầm bị phá hủy của dầm V24.7, V24.6, V24.4 và V24.3 lần lượt là 200 kN, 250 kN, 263,1 kN và 235,5 kN.

3.3. Cơ chế phá hủy

Cơ chế phá hủy của các dầm được đánh giá là tương đối giống nhau, và đó là cơ chế phá hủy cắt nén (shear compression failure mode) [17]. Hầu như các dầm đều ứng xử như dầm chịu uốn đến 90 kN. Giai đoạn đàn hồi của các dầm đến khoảng 50 kN. Tiếp theo là giai đoạn vết nứt uốn phát triển từ 50 kN đến 90 kN. Bắt đầu từ 90 KN chở đi dầm ứng xử có chút khác nhau bởi ảnh hưởng của cốt đai nghiêng. Vết nứt cắt phát triển từ vết nứt uốn và hướng về điểm đặt lực từ tải trọng 90 kN đến 170 kN. Tuy nhiên, với cốt đai góc nghiêng lớn hơn 90°, các vết nứt cắt nghiêng bị dẫn hướng bởi cốt đai. Trường hợp với góc nghiêng cốt đai là 105°, phần vết nứt cắt nghiêng quyết định bị dẫn hướng bởi cốt đai nhỏ hơn. Vết nứt cắt nghiêng quyết định vẫn còn cắt qua cốt đai khác khi tiến về điểm gia tải. Trong khi đó, với góc nghiêng cốt đai là 125° và 135°, phần vết nứt cắt nghiêng quyết định dẫn hướng bởi cốt đai nghiêng nhiều hơn. Vết nứt cắt nghiêng quyết định trong các dầm này gần như không cắt qua cốt đai khác khi tiến về điểm đặt lực. Sau 170 kN, vết nứt cắt nghiêng quyết định mở rộng và phát triển nhanh về phía điểm đặt lực. Sau đó, các vết nứt dọc theo cốt thép chịu uốn trong vùng chiều dài bê tông không bị nứt (x_{uc}) là do mất dính bám giữa các thanh thép cũng xuất hiện. Tuy nhiên, cuối cùng, bê tông vùng chịu nén ở đỉnh vết nứt cắt nghiêng quyết định và gần điểm đặt lực bị phá hủy nén như Hình 12 và dầm phá hoại. Rõ ràng rằng ở đây, cốt đai nghiêng đã dẫn hướng cho các thanh dàn nén quy ước theo các vết nứt nghiêng quyết định và có góc nghiêng khác so với 45°. Nhưng bê tông vùng chịu nén phá hủy nén thì dầm mới phá hoại. Do đó, cơ chế phá hủy của các dầm thí nghiệm vẫn được coi là phá hủy chế cắt nén (shear compression failure mode). Góc nghiêng của cốt đai nghiêng càng lớn, làm cho góc vết nứt cắt nghiêng quyết định (theo hướng cốt đai) cũng càng nhỏ và làm cho dầm phá hủy nhanh hơn. Từ thí nghiệm cho thấy, góc nghiêng của cốt đai không nên lớn hơn 105°. Giá trị sức kháng cắt tính toán theo dầm không cốt đai theo EC2.25 [5] là khoảng 43 kN (với hệ số $\gamma_V = 1$). Khi xem xét cốt đai nghiêng là hình chiếu của nó trên phương thẳng đứng, giá trị sức kháng cắt tính toán theo Tiêu chuẩn EC2.25 [5] cũng được thể hiện trên Bảng 3. Kết quả cho thấy, cốt đai nghiêng từ 105° đến 135° cũng vẫn có góp sức trong sức kháng cắt của dầm. Kết quả cũng cho thấy giá trị tính toán và giá trị thí nghiệm là tương đồng với dầm có cốt đai 90°. Tuy nhiên, giá trị tính toán sức kháng cắt của dầm theo EC2.25 [5] chỉ bằng từ 62.6% đến 89,2% giá trị thí nghiệm khi góc nghiêng của cốt đai lớn hơn 90°. Giá trị trung bình của tỷ số $V_{u.Exp}/V_{u.Cal}$ là 1,23, cho thấy giá trị tính toán theo EC2.25 [5] là khá an toàn.



Hình 12. Bê tông bị phá hủy nén ở đỉnh vết nứt cắt nghiêng quyết định.

4. KẾT LUẬN

Kết quả thực nghiệm đối với dầm chịu cắt có cốt đai nghiêng từ 90° đến 135° cho thấy:

- Các dầm phá hủy theo cơ chế cắt nén (shear compression failure mode) với vết nứt cắt nghiêng quyết định hướng đến điểm đặt lực và bê tông vùng chịu nén ở đầu vết nứt cắt nghiêng quyết định bị phá hủy nén trước khi dầm bị phá hủy.
- Vết nứt cắt nghiêng quyết định bị dẫn hướng bởi cốt đai nghiêng khi góc của cốt đai lớn hơn 90°. Đối với góc nghiêng cốt đai là 105°, vết nứt cắt nghiêng quyết định vẫn còn cắt qua cốt đai khác khi tiến về điểm gia tải. Trong khi góc nghiêng cốt đai là 125° và 135°, vết nứt cắt nghiêng quyết định không còn cắt qua cốt đai khác khi tiến về điểm gia tải.
- Góc nghiêng của cốt đai nghiêng càng lớn, làm cho góc vết nứt cắt nghiêng quyết định cũng càng nhỏ và làm cho dầm phá hủy nhanh hơn. Từ thí nghiệm cho thấy, góc nghiêng của cốt đai không nên lớn hơn 105°.
- Cốt đai nghiêng lớn hơn 90° vẫn góp phần vào sức kháng cắt của dầm bê tông cốt thép. Giá trị sức kháng cắt tính toán theo tiêu chuẩn EC2.25 [5] khá chính xác so với thí nghiệm khi cốt đai 90°. Khi cốt đai nghiêng từ 105° đến 135°, sức kháng cắt tính toán theo EC2.25 [5] chỉ bằng từ 62.6% đến 89,2%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. R. C. FENWICK, The shear strength of reinforced concrete beams, Doctoral thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1966.

[2]. G. Russo, D. Mitri and M. Pauletta, Shear strength design formula for RC beams with stirrups, Engineering Structures, 51 (2013) 226–35. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.01.024

[3]. E.J. Tompos, R.J. Frosch, Influence of beam size, longitudinal reinforcement, and stirrup effectiveness on concrete shear strength, ACI Structural Journal, 99 (2002) 559–67. https://doi.org/10.14359/12295

[4]. J.Y. Lee, U.Y. Kim, Effect of longitudinal tensile reinforcement ratio and shear span-depth ratio on minimum shear reinforcement in beams. ACI Structural Journal, 105 (2008) 134–44.

https://doi.org/10.14359/19728

[5]. EN 1992-1-1:2025 Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part I: General Rules and Rules for Buildings, 2025.

[6]. Tiêu chuẩn TCVN 11823-2:2017 - Thiết kế cầu đường bộ, 2017.

[7]. P. Colajanni, L.L. Mendola, G. Mancini, A. Recupero and N. Spinella, Shear capacity in concrete beams reinforced by stirrups with two different inclinations, Engineering Structures, 81 (2014) 444-453. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.011

[8]. C.B. Hunegnaw and T.W. Aure, Effect of orientation of stirrups in combination with shear span to depth ratio on shear capacity of RC beams, Heliyon, 7 (2012) e08193. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08193

[9]. M. Yoo, Experimental Study on the Shear Strength of Reinforced Concrete Beams with Various Integrated Shear Reinforcements, Materials, 15 (2022) 3091. https://doi.org/10.3390/ma15093091

[10]. Nguyễn Ngọc Phương, Khả năng chịu cắt của dầm BTCT theo một số tiêu chuẩn thiết kế, Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà nẵng, 78 (2014) 78-82.

[11]. Đặng Hồng Long, Phạm Phú Anh Huy, Đánh giá khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thép theo lý thuyết miền nén cải tiến, Journal of science and technology of Da Nang University, 2016.

[12]. Hoàng Hà, Nguyễn Đức Thị Thu Định, Hoàng Vũ, Đánh giá khả năng kháng cắt của cầu dầm bê tông cốt thép nhịp giản đơn theo Tiêu chuẩn thiết kế cầu TCVN 11823-2017, Tạp chí Giao thông vận tải, 3 (2021) 35-39.

[13]. ASTM International, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM C128-22, 2022

[14]. ASTM International, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM C125-21a, 2021.

[15]. ACI Committee 318 (2014), Building code requirements for structural concrete.

[16]. AASHTO, LRFD Bridge Design Specifications, 10th Edition, American Association of State Highways and Transportation Officials, 2024.

[17]. ASCE-ACI Committee 426, The shear strength of reinforced concrete members, 1973.