



EXPERIMENTAL RESEARCH ON SHEAR STRENGTH OF GEOPOLYMER CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH STEEL AND GFRP BARS

Dang Thuy Chi

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 06/03/2025

Revised: 11/04/2025

Accepted: 12/04/2025

Published online: 15/04/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.3.12>

* *Corresponding author*

Email: thuychi.dang@utc.edu.vn

Abstract. The combination of GFRP reinforcement with geopolymer concrete (GPC) presents a promising solution, as it amalgamates the sustainability and durability of GPC with the corrosion resistance and strength of GFRP reinforcement. A comprehensive understanding of the shear strength and failure mechanisms of geopolymer reinforced concrete beams and GFRP bars is essential for structural design. This study evaluated the shear behavior of geopolymer concrete beams reinforced steel and GFRP bars, focusing on the shear failure mechanism, shear strength and shear crack width. A set of four beams was fabricated, two of which were geopolymer concrete beams reinforced with GFRP bars and two were reinforced with steel bars. Experimental results showed that the use of GFRP bars significantly reduced the shear strength of the beams, which was about 30-40% lower than that of steel beams. The very low modulus of elasticity of GFRP bars also increased the deflection at failure of the structure. The geopolymer concrete beams had up to 50% narrower shear crack widths and 30% smaller deflections than the GFRP beams.

Keywords: shear strength, geopolymer concrete, without stirrups, glass fiber reinforced polymer (GFRP).

@ 2025 University of Transport and Communications



NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM SỨC KHÁNG CẮT CỦA DẦM BÊ TÔNG GEOPOLYME GIA CƯỜNG CỐT THÉP VÀ CỐT SỢI THỦY TINH GFRP

Đặng Thùy Chi

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 06/03/2025

Ngày nhận bài sửa: 11/04/2025

Ngày chấp nhận đăng: 12/04/2025

Ngày xuất bản Online: 15/04/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.3.12>

* Tác giả liên hệ

Email: thuychi.dang@utc.edu.vn

Tóm tắt. Sự kết hợp giữa cốt thanh polyme sợi thủy tinh (GFRP) với bê tông geopolymer hứa hẹn mang đến một giải pháp kết cấu hiệu quả khi kết hợp tính bền vững và độ bền của bê tông geopolymer với khả năng chống ăn mòn và cường độ của cốt GFRP. Việc hiểu biết toàn diện về sức chịu cắt và cơ chế phá hủy của dầm bê tông geopolymer cốt thép và cốt GFRP là cần thiết cho quá trình thiết kế kết cấu. Nghiên cứu này tiến hành đánh giá ứng xử cắt của dầm bê tông geopolymer cốt thép và cốt thanh GFRP, tập trung vào cơ chế phá hủy cắt, sức kháng cắt và bề rộng vết nứt do cắt. Tổ hợp gồm bốn dầm được chế tạo, trong đó hai dầm bê tông geopolymer cốt GFRP và hai dầm gia cường cốt thép. Kết quả thực nghiệm cho thấy việc sử dụng cốt thanh GFRP làm giảm đáng kể sức kháng cắt của dầm, thấp hơn khoảng 30-40% so với dầm cốt thép. Mô đun đàn hồi rất nhỏ của thanh GFRP còn làm tăng độ võng khi phá hoại của kết cấu. Dầm bê tông geopolymer cốt thép có bề rộng vết nứt do cắt hẹp hơn tới 50% và độ võng nhỏ hơn 30% so với dầm cốt GFRP.

Từ khóa: khả năng chịu cắt, bê tông geopolymer, không cốt đai, polyme cốt sợi thủy tinh (GFRP).

@ 2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, bê tông xi măng là vật liệu điển hình được sử dụng rộng rãi nhất trong ngành xây dựng. Do vậy yêu cầu có nguồn năng lượng lớn để sản xuất xi măng, và sự tiêu thụ năng lượng lớn góp phần gây nên hiệu ứng nhà kính. Điều này đặt ra yêu cầu về một loại vật liệu có thể thay thế bê tông xi măng truyền thống trong các công trình xây dựng nhằm đáp ứng

nhu cầu phát triển hạ tầng đang tăng nhanh chóng, đồng thời không gây ảnh hưởng xấu đến môi trường. Trong khoảng bốn thập kỷ qua, “Geopolyme” đã được nghiên cứu và cho thấy có thể góp phần đa dạng hóa các giải pháp về chất kết dính, thay thế một phần thị trường của xi măng. Chất kết dính geopolyme thu được bằng cách kết hợp những vật liệu giàu aluminosilicat (thường là một số chất thải công nghiệp như tro bay, xỉ lò cao nghiền mịn, tro trấu,...) với dung dịch kiềm hoạt tính. Do không sử dụng xi măng, đồng thời tận dụng sử dụng thải phẩm tro bay trong sản xuất, bê tông geopolyme giúp giảm đáng kể (khoảng 5-6 lần) lượng khí phát thải CO₂ so với xi măng [1]. Mặt khác, các nghiên cứu cho thấy bê tông geopolyme (cốt liệu tự nhiên) có ứng xử cơ học tương tự như bê tông xi măng poóc lăng thông thường, thậm chí còn có một số tính năng ưu việt hơn như bền nhiệt, bền sun phát, co ngót và từ biến thấp,... [1,2].

Trên thực tế, các nghiên cứu trước đây về bê tông geopolyme tập trung chủ yếu đến đặc tính của các vật liệu bê tông mới theo hướng khoa học vật liệu mà chưa có nhiều các nghiên cứu về cơ học cho kết cấu sử dụng những vật liệu này. Về mặt sức kháng của kết cấu bê tông geopolyme, các đặc tính cơ học của bê tông geopolyme có phần khác với bê tông truyền thống, ví dụ như mô đun đàn hồi có xu hướng nhỏ hơn trong khi cường độ chịu kéo tăng lên so với cùng cường độ chịu nén. Những tính chất này liên quan trực tiếp đến đặc tính dính bám giữa bê tông và cốt chịu lực, cũng như đến đặc tính cơ học trong kết cấu về mặt sức kháng, ví dụ như chiều cao vùng bê tông chịu nén có xu hướng tăng so với bê tông truyền thống. Do vậy, những ảnh hưởng liên quan đến khả năng chịu lực do đặc tính cơ học của bê tông geopolyme cần được nghiên cứu nhiều hơn trong quan hệ với các cấu kiện chịu lực như uốn, cắt...

Gần đây, cốt thanh polyme gia cường sợi (FRP) đã nổi lên như một giải pháp thay thế đầy hứa hẹn cho cốt thép truyền thống, nhờ khả năng chống ăn mòn, nhẹ và cường độ chịu kéo cao [3]. Trong số các loại FRP, cốt thanh polyme sợi thủy tinh (GFRP) được sử dụng rộng rãi nhất do chi phí tương đối thấp hơn so với các vật liệu khác như cốt sợi carbon hay bazan, đồng thời vẫn có khả năng chống ăn mòn clorua – đặc tính quan trọng với các công trình làm việc trong môi trường biển [4]. Sự kết hợp giữa cốt GFRP với bê tông geopolyme mang đến một giải pháp đầy hứa hẹn, vì nó kết hợp tính bền vững và độ bền của bê tông geopolyme với khả năng chống ăn mòn và độ bền của cốt GFRP.

Việc hiểu biết toàn diện về sức chịu cắt và cơ chế phá hủy của dầm bê tông geopolyme cốt thép và cốt GFRP là cần thiết để thiết kế kết cấu hiệu quả và ứng dụng chúng. Mặc dù sức chịu cắt của dầm bê tông cốt thép đã được nghiên cứu rộng rãi, nhưng vẫn chưa đạt được sự đồng thuận về phương pháp tiếp cận cơ học phù hợp nhất để làm sáng tỏ các cơ chế phá hủy, đặc biệt là đối với dầm geopolyme cốt thanh phi kim loại [5].

Các nghiên cứu của Sumajouw và cộng sự [6] trên mười sáu dầm bê tông geopolyme có cường độ nén từ 37 đến 76 MPa cho thấy ứng xử tương tự như dầm bê tông thông thường về sức chịu uốn và độ dẻo [6]. Ứng xử cắt của bê tông cốt GFRP chủ yếu được nghiên cứu trên bê tông truyền thống, tập trung vào các chế độ phá hủy cắt, sự phát triển vết nứt cắt và độ võng dưới tải trọng tác dụng [5,7,8]. Trong dầm bê tông geopolyme, phá hủy cắt thường bắt đầu do vết nứt chéo lan truyền khi lực cắt tăng cường [8]. Cốt GFRP được đặc trưng bởi ứng xử đàn hồi tuyến tính mà không có giai đoạn chảy rõ rệt, ảnh hưởng xấu đến sự đóng góp của nó vào sức chịu cắt [7]. Hơn nữa, thanh GFRP có mô đun đàn hồi thấp hơn thép, ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt của các kết cấu bê tông cốt thép [6]. Do đó, trong khi thanh GFRP làm tăng cường độ kéo tổng thể của bê tông, khả năng chống cắt của chúng yếu hơn khá nhiều, do đó cần nghiên cứu thêm về ứng xử cắt của dầm geopolyme cốt GFRP.

Yost [9] thấy rằng ứng xử cắt của bê tông tro bay kiềm hoạt hóa gần giống với đầm bê tông truyền thống. Mourougane [10] đã báo cáo rằng đầm bê tông geopolyme cường độ cao và có sức chịu cắt cao hơn 5–23% so với đầm thông thường, điều này được lý giải là do tương tác được cải thiện giữa chất kết dính geopolyme và cốt thép. Chang [11] đã sử dụng các mô hình phân tích tiên tiến để dự đoán sức chịu cắt trong đầm geopolyme tốt hơn, nhấn mạnh sự cần thiết của các mối quan hệ ứng suất-biến dạng được điều chỉnh. Ng. và cộng sự [12,13] đã chứng minh rằng việc kết hợp các sợi thép làm chậm quá trình nứt do cắt và tăng sức chịu cắt cực đại lên tới 60%, trong khi lõi aramid FRP tiếp tục cải thiện cường độ. Bất chấp những tiến bộ này, vẫn còn một khối lượng đáng kể trong việc hiểu toàn diện về sức chịu cắt và ứng xử của đầm bê tông geopolyme gia cường bằng thép và GFRP. Việc hiểu khả năng chịu cắt của bê tông geopolyme cốt GFRP đặc biệt quan trọng để tăng tính bền vững của các công trình biển và ven biển, nơi cốt thép truyền thống rất dễ bị ăn mòn.

Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ứng xử cắt của đầm bê tông geopolyme cốt thép và cốt thanh GFRP, tập trung vào cơ chế phá hủy cắt, sức kháng cắt và bề rộng vết nứt do cắt. Cụ thể, nghiên cứu sẽ so sánh ứng xử cắt của đầm bê tông geopolyme được gia cường bằng thép và với cốt GFRP, kiểm tra sự khác biệt về khả năng chịu cắt, cơ chế phá hủy và quan hệ lực - độ võng. Một quan trọng của nghiên cứu này là phân tích tác động của cốt GFRP lên sức chịu cắt của đầm geopolyme so với cốt thép.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu thí nghiệm

Bê tông geopolyme sử dụng trong nghiên cứu được chế tạo từ cốt liệu tự nhiên (đá dăm và cát), chất kết dính geopolyme và nước. Trong đó, chất kết dính geopolyme là sự kết hợp của chất hoạt hóa một thành phần và các vật liệu giàu aluminosilicat. Nghiên cứu này sử dụng chất hoạt hóa một thành phần, dạng bột khô có thành phần chính là muối natri silicate (Na_2SiO_3), có khối lượng thể tích là $0,89 \text{ g/cm}^3$ với hàm lượng Na_2O là 29%. Vật liệu khoáng giàu silic và nhôm dùng trong nghiên cứu là hỗn hợp tro bay khô và xỉ lò cao nghiền mịn. Tro bay sử dụng được lấy tại nhà máy nhiệt điện Phả Lại có thành phần hóa học đạt yêu cầu của tro bay loại F theo tiêu chuẩn TCVN 10302-2014 [14], khối lượng riêng $2,5 \text{ g/cm}^3$, độ mịn 94% lọt qua sàng 0,08 mm. Thành phần hóa học của tro bay sử dụng được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học của tro bay sử dụng trong nghiên cứu.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	SO_3	MKN*
51,74	24,53	5,59	0,81	1,95	4,42	0,11	0,76	0,31	8,98

Xỉ lò cao nghiền mịn mác S95 của nhà máy Hoà Phát – Hải Dương đã được sử dụng làm vật liệu kết dính trong nghiên cứu. Xỉ lò cao nghiền mịn S95 có khối lượng riêng $2,45 \text{ g/cm}^3$ và bề mặt riêng $4425 \text{ cm}^2/\text{g}$, phù hợp các yêu cầu của TCVN 11586-2016 [15]. Thành phần hóa học của tro bay sử dụng được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Thành phần hóa học của xỉ lò cao sử dụng trong nghiên cứu.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	MKN*
35,02	13,56	1,41	38,6	8,18	0,80	0,31	0,23	1,89

Cốt liệu lớn sử dụng trong nghiên cứu là đá dăm kích thước 10-20 mm, khai thác tại mỏ Sunway, Hà Nội. Cát sử dụng được lấy ở ven biển Cửa Lò, Nghệ An.

Chất hoạt hóa dạng bột được trộn khô cùng với tro bay và xỉ lò cao giúp cho quá trình chế tạo bê tông geopolyme đơn giản và an toàn tương tự như chế tạo bê tông xi măng thông thường. Thành phần bê tông geopolyme sử dụng được trình bày ở bảng 3. Quá trình nhào trộn hỗn hợp bê tông geopolyme diễn ra trong 2 giai đoạn:

Giai đoạn 1 (trộn khô): Đây là giai đoạn trộn khô hỗn hợp cốt liệu với hỗn hợp chất kết dính để tạo sự đồng nhất ban đầu. Cho hỗn hợp cát và chất kết dính (tro bay, xỉ lò cao và chất hoạt hoá) trộn trong 120s, sau đó thêm đá dăm trộn trong 60 giây.

Giai đoạn 2 (trộn ướt): Cho 70% nước vào trộn trong 150 giây, sau đó cho 30% nước còn lại trộn trong thời gian 150 giây.

Bảng 3. Thành phần bê tông geopolyme dùng cho 1m³ bê tông

Vật liệu	Đơn vị	Số lượng
Đá dăm	Kg	1080
Cát	Kg	680
Tro bay	Kg	242
Xỉ lò cao	Kg	161
Chất hoạt hoá	Kg	71
Nước	Kg	142

Các mẫu bê tông geopolyme sau khi trộn được bảo quản trong điều kiện không khí ở nhiệt độ phòng trong 14 ngày cho đến khi thử nghiệm [16]. Cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi của bê tông được xác định trên mẫu thí nghiệm hình trụ tròn có đường kính 15 cm, chiều cao 30 cm. Thí nghiệm cường độ chịu nén của bê tông geopolyme được tiến hành theo tiêu chuẩn ASTM C39-21 [17] và mô đun đàn hồi được xác định theo ASTM C469-22 [18]. Bê tông geopolyme có cường độ chịu nén và mô đun đàn hồi lần lượt là 42,6 MPa và 28,4 GPa.



Hình 1. Thí nghiệm xác định cường độ chịu nén (trái) và mô đun đàn hồi (phải) bê tông geopolyme.

Cốt thép dọc đường kính 18 mm có cường độ chịu kéo là 439,6 MPa. Cốt thanh GFRP được sản xuất bởi Công ty thép polyme Việt Nam, cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi lần lượt là 810 MPa và 45 GPa. Sợi thủy tinh trong GFRP được phủ epoxy làm tăng khả năng dính bám với bê tông. Bên cạnh đó, cấu trúc thanh GFRP có gân để cải thiện khả năng cài khóa gờ cốt chịu lực với bê tông.

2.2. Thiết lập thí nghiệm

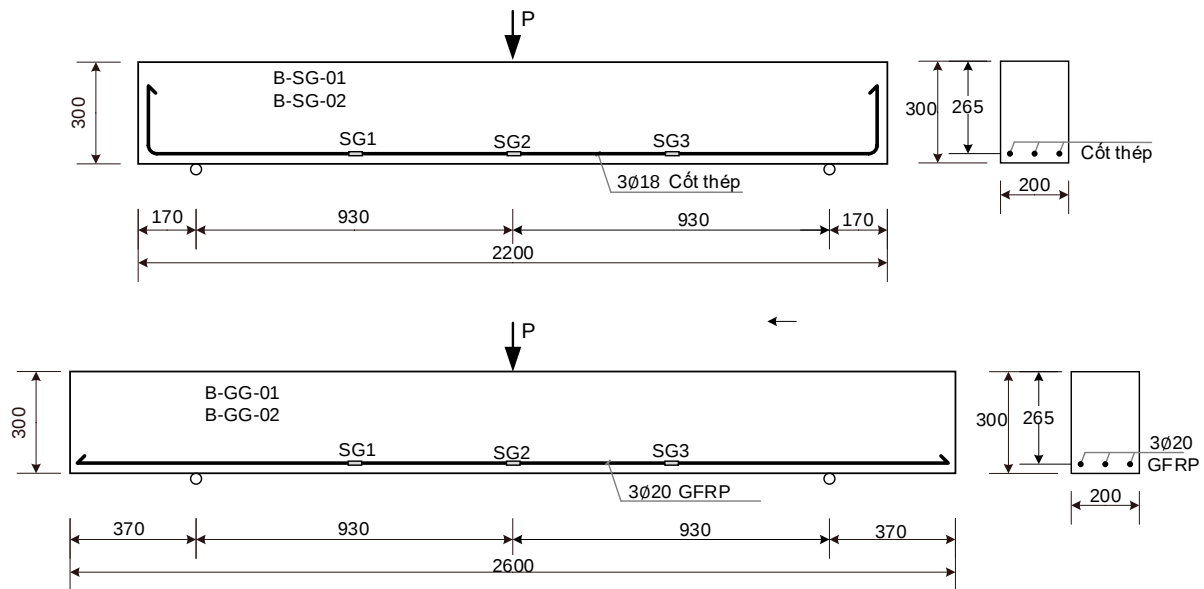
Trong nghiên cứu này, 04 dầm bê tông geopolyme cốt thép và cốt thanh GFRP dạng giản đơn được thí nghiệm uốn 3 điểm, dưới tác dụng của tải trọng tĩnh. Việc sử dụng 2 mẫu/tổ nhằm đảm bảo tính hội tụ, độ chính xác của kết quả thí nghiệm.

Trước khi đổ bê tông, ba lá điện trở đo biến dạng cho cả cốt thép dọc sẽ được gắn tại 3 vị trí như trên Hình 2. Tại vị trí gia tải và vị trí có gối đỡ sẽ chôn sẵn 1 tấm thép dày 5 mm (được hàn rêu thép), nhằm hạn chế việc ứng suất cục bộ làm vỡ bê tông. Các dầm cũng sẽ được quét vôi trắng, kẻ lưới 50 x 50 mm nhằm dễ phát hiện và định vị vị trí vết nứt xuất hiện.



Hình 2. Chế tạo dầm bê tông geopolyme.

Tất cả các dầm đều có cùng kích thước tiết diện $200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, với lớp bê tông bảo vệ cốt chịu lực là 25 mm. Các dầm được thí nghiệm uốn 3 điểm, với chiều dài nhịp là 1860 mm, tương ứng với tỷ lệ chiều dài chịu cắt trên chiều cao làm việc (a/d) xấp xỉ 3,5. Kích thước và cấu tạo của dầm tính toán dựa trên ý tưởng để đảm bảo kết cấu dầm sẽ bị phá hoại do cắt không chế. Các dầm có cốt thép sẽ sử dụng ba thanh cốt thép đường kính 18 mm ở thớ dưới ($A_s = 763 \text{ mm}^2$), không có cốt đai và cốt thép ở thớ trên. Cốt thép được uốn gấp ở đầu dầm để đảm bảo chiều dài neo của thép trong bê tông, do đó, tổng chiều dài dầm là 2200 mm. Các dầm có cốt GFRP sử dụng 3 thanh thẳng đường kính 20 mm (cần lưu ý rằng, theo thông số của nhà sản xuất, 3 thanh GFRP $\phi 20$ có diện tích $A_f = 720 \text{ mm}^2$, xấp xỉ $3\phi 18$). Chiều dài “đầu mút thừa” của dầm là 370 mm, dẫn đến tổng chiều dài dầm là 2600 mm. Tuy nhiên, chiều dài nhịp chịu uốn của cả 4 dầm trong thí nghiệm này là như nhau. Cấu tạo dầm bê tông cốt thép và bê tông cốt thanh GFRP được mô tả trên Hình 3.



Hình 3. Cấu tạo dầm bê tông geopolyme cốt thép và cốt thanh GFRP.

Tất cả các dầm được thí nghiệm tại Phòng thí nghiệm Vật liệu và kết cấu của Trường Đại học Giao thông Vận tải. Thí nghiệm uốn ba điểm được thực hiện theo phương pháp kiểm soát bằng chuyển vị, với tốc độ gia tải 1 mm/phút, trên máy kéo nén SANS 3000 kN. Sơ đồ bố trí và thiết lập thí nghiệm được thể hiện trên Hình 3 và Hình 4. Một LVDT (độ chính xác $\pm 0.01\text{mm}$), và một loadcell (độ chính xác là $\pm 0,1\%$ so với giá trị đo) đã được lắp đặt để đo độ võng giữa nhịp và tải trọng tác dụng lên dầm. Các lá điện trở (độ chính xác là $\pm 0.001\%$), được gắn trong cốt thép để đo biến dạng của cốt dọc trong quá trình thí nghiệm. Đồng thời, các đồng hồ đo thiên phân kế sẽ được lắp đặt ngay khi vết nứt xuất hiện, nhằm đo độ mở rộng của vết nứt thẳng góc và vết nứt nghiêng.



Hình 4. Thiết lập thí nghiệm.

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

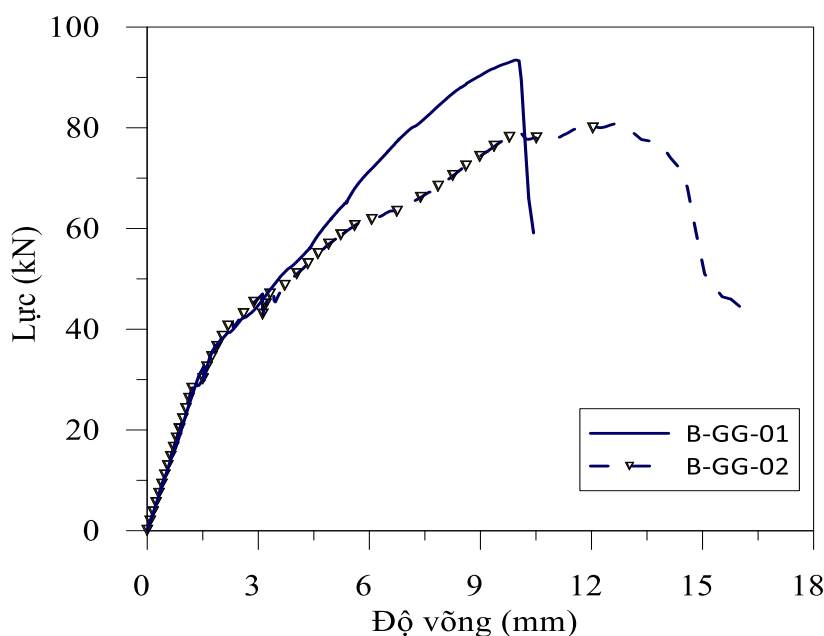
Kết quả thí nghiệm được thể hiện dưới dạng biểu đồ quan hệ giữa lực – độ võng giữa nhịp; lực – biến dạng dọc của cốt chịu lực, cấu trúc vết nứt và dạng phá hoại của 4 mẫu đầm được thí nghiệm. Đối với đầm B-GG-01 và B-GG-02 (đầm sử dụng cốt thanh GFRP kết hợp với bê tông geopolyme, các biểu đồ trên được thể hiện ở Hình 5 và Hình 7. Cấu trúc vết nứt của các đầm này được thể hiện trên Hình 6.

Có thể quan sát từ Hình 5, ứng xử chịu lực của 2 đầm này tương đối giống nhau, được chia làm 3 giai đoạn.

Ở giai đoạn 1, các đầm chưa bị nứt, quan hệ giữa lực- độ võng giữa nhịp là tuyến tính. Các đầm lần lượt xuất hiện vết nứt thẳng góc ở giữa nhịp ở mức tải trọng xấp xỉ 27÷29 kN. Lúc này, biến dạng SG2 (Hình 7) của cốt GFRP ở vị trí giữa nhịp tăng đột ngột.

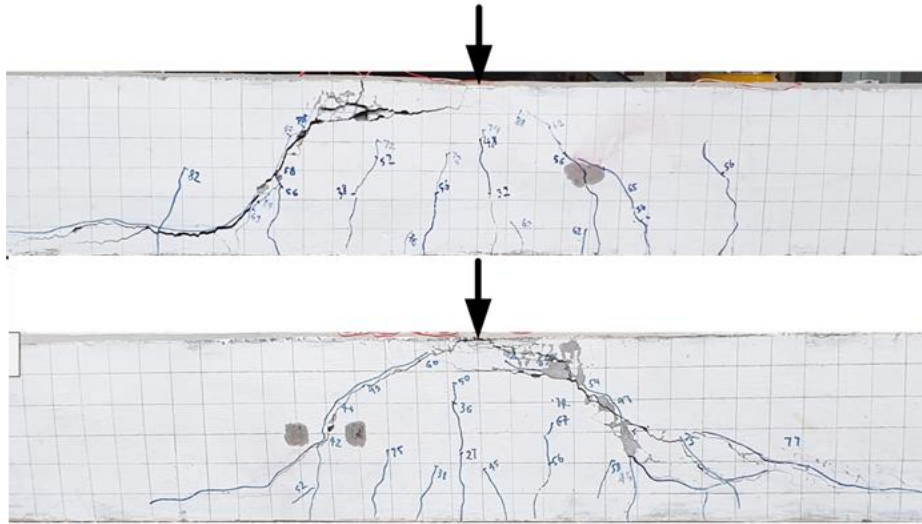
Ở giai đoạn tiếp theo, các vết nứt do uốn và vết nứt do uốn-cắt đồng thời liên tục xuất hiện, làm giảm đáng kể độ cứng của đầm. Lúc này, phần lớn lực kéo sẽ do thanh GFRP chịu. Tuy nhiên, do thanh GFRP có độ cứng tương đối nhỏ (so với cốt thép), dẫn đến độ võng của đầm tăng nhanh.

Ở giai đoạn 3, các vết nứt nghiêng ở bụng đầm xuất hiện ở mức tải trọng xấp xỉ 45 kN. Tuy nhiên, do bề rộng vết nứt nhỏ, lúc này lực cắt vẫn tiếp tục được truyền thông qua hiệu ứng cài khóa cốt liệu và hiệu ứng chốt của cốt dọc.

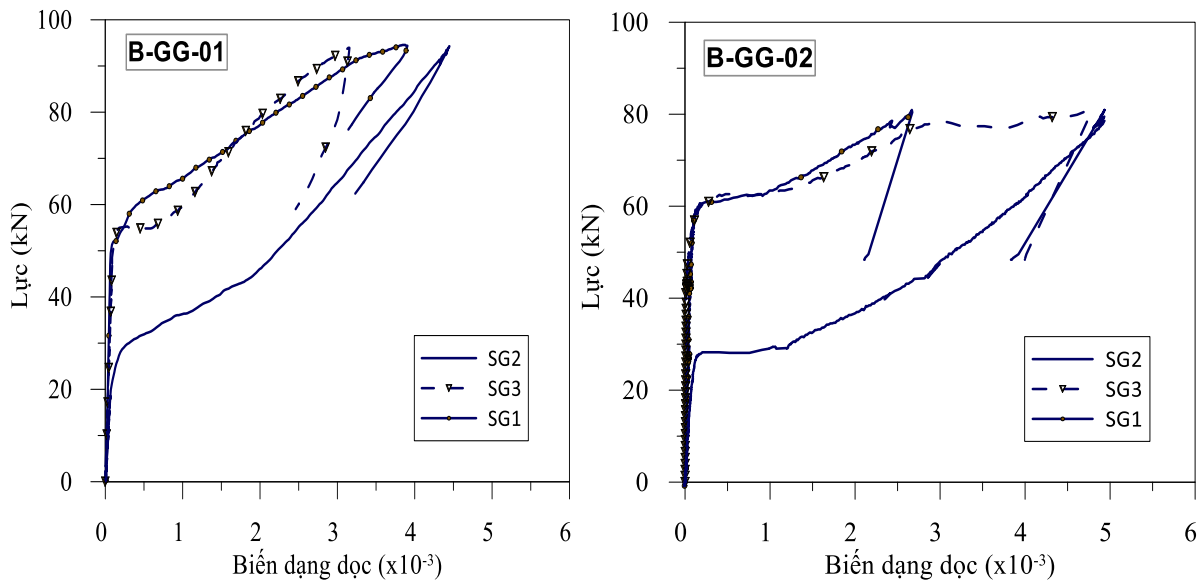


Hình 5. Quan hệ lực – độ võng của các đầm cốt GFRP.

Các đầm B-GG-01 và B-GG-02 lần lượt bị phá hoại ở mức tải trọng 93.4 kN và 80.9 kN, ngay thời điểm các vết nứt nghiêng mở rộng lớn, gây ra dạng phá hoại đột ngột. Tại thời điểm này, biến dạng dọc trong thanh GFRP mới chỉ xấp xỉ 5‰, nhỏ hơn rất nhiều so với biến dạng kéo đứt của thanh GFRP.

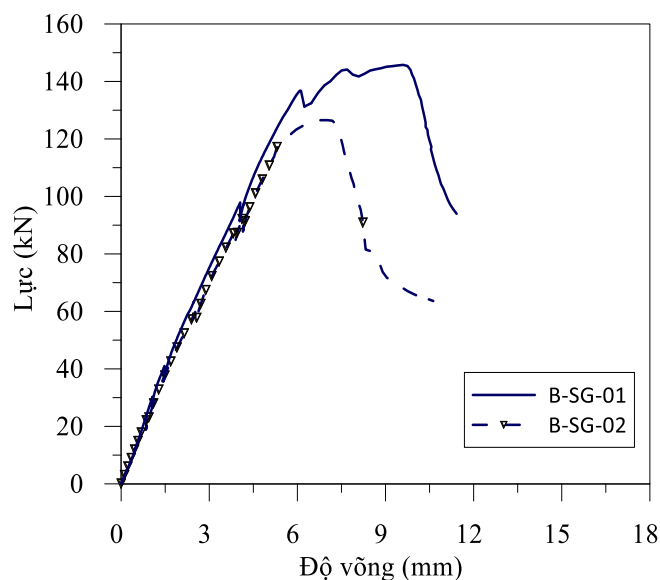


Hình 6. Cấu trúc vết nứt của mẫu thí nghiệm B-GG-01, B-GG-02.



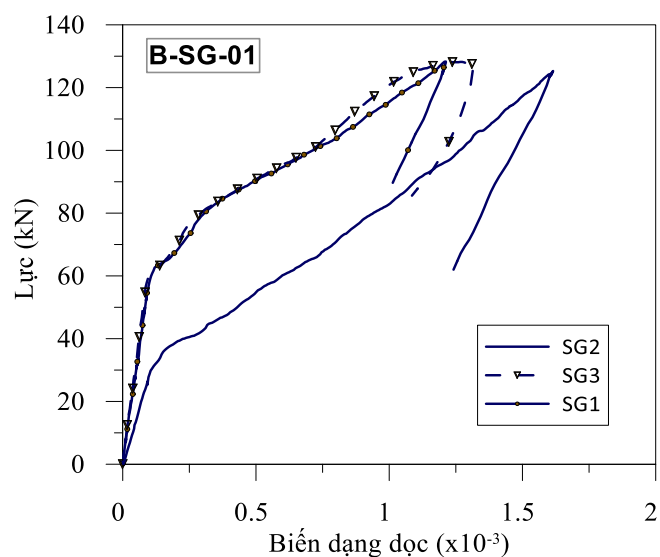
Hình 7. Quan hệ lực – biến dạng dọc của cốt GFRP trong dầm B-GG-01, B-GG-02.

Kết quả thí nghiệm đối với 2 dầm bê tông geopolyme kết hợp cốt thép thường (B-SG-01 và B-SG-02) lần lượt được thể hiện ở Hình 8, Hình 9 và Hình 10. Có thể thấy trên Hình 8, so với các dầm bê tông geopolyme sử dụng cốt GFRP, các dầm này có độ cứng sau khi nứt lớn hơn khá nhiều. Các vết nứt thẳng góc ở giữa nhịp (do mô men uốn) có thể quan sát được ở mức tải trọng xấp xỉ 42 kN. Sau đó, các vết nứt do uốn và do uốn-cắt tiếp tục xuất hiện. Tuy nhiên, độ cứng của dầm không bị suy giảm đáng kể.

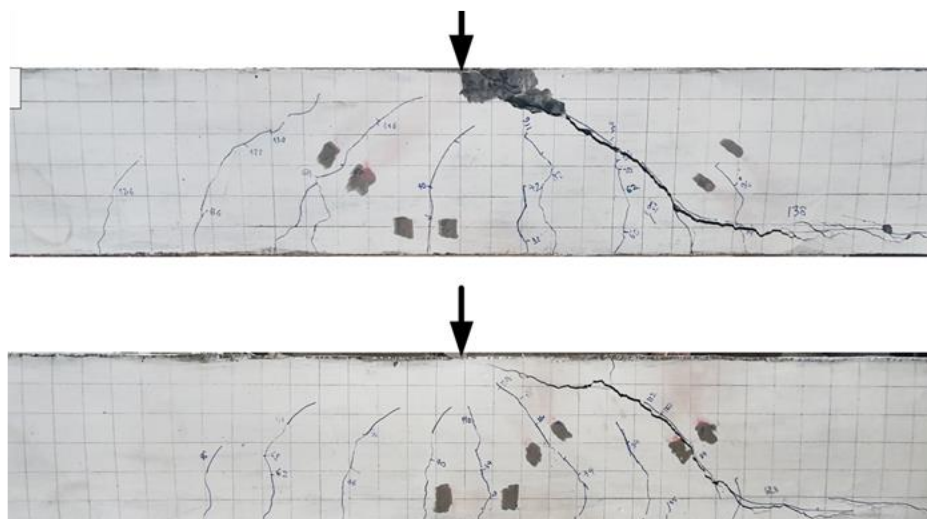


Hình 8. Quan hệ lực – độ võng của các dầm nhóm SG (sử dụng cốt thép với bê tông geopolyme).

Hình 9 mô tả quan hệ tải trọng-biến dạng đối với cốt thép trong dầm B-SG-01. Biến dạng dọc trong các thanh thép tăng đều đặn theo tải trọng tác dụng. Tại điểm nứt, ứng suất kéo được truyền đến cốt thép, gây ra sự gia tăng đột ngột của biến dạng. Khi phá hủy, biến dạng dọc trong cốt thép đạt giá trị xấp xỉ 1,8‰, thấp hơn nhiều so với biến dạng chảy của các thanh thép. Điều này chỉ ra rằng cơ chế phá hủy bị chi phối bởi phá hủy cắt và sự lan truyền vết nứt trong bê tông thay vì phá hoại tại thanh kéo (tie) hình thành ở khu vực có cốt thép dọc trong dầm bê tông geopolyme.



Hình 9. Quan hệ lực – biến dạng dọc của cốt GFRP trong dầm B-SG- 01.



Hình 10. Cấu trúc vết nứt của mẫu thí nghiệm B-SG-01, B-SG-02.

Quan sát quá trình phát triển nứt của hai loại dầm, ta thấy sự phát triển vết nứt trong dầm cốt GFRP tiến triển từ các vết nứt uốn ban đầu ở giữa nhịp đến các vết nứt cắt nghiêng dưới lực cắt tăng dần. Các vết nứt cắt xiên chính trong dầm cốt GFRP kéo dài khoảng 400–500 mm theo chiều ngang dầm và đi lên khoảng 150–250 mm theo chiều cao dầm, với các vết nứt thứ cấp cách nhau khoảng 25–50 mm. Các vết nứt cắt chính gần điểm tác dụng tải trọng đạt tới 1,5–2,0 mm khi phá hủy, rộng hơn đáng kể so với dầm gia cường thép. Điều này cho thấy khả năng kiểm soát việc xuất hiện và lan truyền vết nứt của cốt GFRP thấp hơn so với cốt thép.

Đường cong lực - biến dạng của dầm cốt GFRP cho thấy biến dạng tăng nhanh sau khi nứt do độ cứng của thanh GFRP thấp hơn. Điều này trái ngược với dầm sử dụng cốt thép, tiến trình biến dạng diễn ra chậm hơn, chứng tỏ độ cứng cao hơn và khả năng kiểm soát vết nứt tốt hơn nhờ cốt thép. Các thanh GFRP đạt đến giới hạn biến dạng trước khi khả năng chịu cắt của bê tông được sử dụng hết, dẫn đến hiện tượng phá hủy giòn.

Bảng 4 tổng hợp các kết quả thí nghiệm của bốn dầm. Kết quả tổng hợp cho thấy dầm gia cường thép có sức kháng cắt lớn hơn và độ võng thấp hơn so với dầm gia cường bằng cốt GFRP. So với các dầm bê tông geopolyme sử dụng cốt thép, việc sử dụng cốt thanh GFRP làm giảm đáng kể sức kháng cắt của dầm, thấp hơn khoảng 30-40% so với dầm cốt thép. Điều này được lý giải là do mô đun đàn hồi thấp của GFRP và độ dính bám kém giữa GFRP và bê tông geopolyme. Sức kháng cắt của dầm chịu ảnh hưởng lớn bởi biến dạng của cốt dọc, cũng như hiệu ứng “chốt” của cốt dọc. Mô đun đàn hồi thấp khiến GFRP có độ cứng kém hơn, dẫn đến sự gia tăng độ võng và làm suy giảm khả năng chịu lực cắt. Độ dính bám kém giữa GFRP và bê tông cũng ảnh hưởng đến sự truyền tải lực và khả năng chịu cắt của kết cấu.

Bảng 4. Tổng hợp kết quả thí nghiệm

Cốt chịu lực	Dầm	Lực gây phá hoại (kN)	Độ võng (mm)
Thép	B-SG-01	145,8	7,2
	B-SG-02	126,5	10,3
GFRP	B-GG-01	93,4	10,4
	B-GG-02	80,9	12,5

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá ứng xử cắt của dầm bê tông geopolyme cốt thép và cốt thanh GFRP, tập trung vào cơ chế phá hủy cắt, sức kháng cắt và bề rộng vết nứt do cắt.

Kết quả thực nghiệm cho thấy với cùng hàm lượng cốt dọc, việc sử dụng cốt thanh GFRP làm giảm đáng kể sức kháng cắt của dầm, thấp hơn khoảng 30-40% so với dầm cốt thép. Điều này được lý giải là do mô đun đàn hồi thấp của GFRP so với cốt thép và độ dính bám kém giữa GFRP và bê tông geopolyme.

Dầm bê tông geopolyme cốt thép có bề rộng vết nứt do cắt hẹp hơn tới 50% và độ võng nhỏ hơn 30% so với dầm cốt GFRP. Mô đun đàn hồi của thanh GFRP rất nhỏ (45 GPa, so với 200 GPa của thép) khiến GFRP có độ cứng kém hơn, dẫn đến làm gia tăng độ võng cũng như bề rộng vết nứt và làm suy giảm khả năng chịu cắt của dầm.

Như vậy, loại cốt sử dụng ảnh hưởng đáng kể đến sức chịu cắt và ứng xử nứt của dầm bê tông geopolyme. Việc sử dụng cốt thép giúp sức kháng cắt và kiểm soát vết nứt được cải thiện đáng kể so với cốt GFRP.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần thực hiện thêm mẫu thí nghiệm đối với cấu kiện cũng như thay đổi các tham số để khảo sát đầy đủ hơn ứng xử chịu cắt của cấu kiện bê tông geopolyme kết hợp với cốt chịu lực bằng vật liệu geopolyme cốt sợi.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2024-XD-002TĐ. Tác giả xin chân thành cảm ơn các thí nghiệm viên trung tâm KHCN đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ali Odeh, Recent Progress in Geopolymer Concrete Technology: A Review, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 48 (2024) 3285–3308, <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01391-z>
- [2]. Ge. Xiaonan, Duran. Lindsay, Tao. Mingjiang, DeGroot. Don J., Li. Emily, & Zhang. Guoping, Characteristics of the underwater cast and cured geopolymers. Cement and Concrete Composites, 114 (2020) 103783. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103783>
- [3]. Ahmed. Azzam, Guo. Shuaicheng, Zhang. Zuhua, Shi. Caijun, Zhu. Deju, A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete, Construction and Building Materials, 256 (2020) 119484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119484>
- [4]. Zhang. Bai, Zhu. Hong, Cao. Ruiming, Ding. Jianming, Chen. Xianhua, Feasibility of using geopolymers to investigate the bond behavior of FRP bars in seawater sea-sand concrete, Construction and Building Materials, 282 (2021) 122636. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122636>
- [5]. Chen. Hui, Yi. Wei-Jian, Ma. Zhongguo John, Hwang. Hyeon-Jong, Modeling of shear mechanisms and strength of concrete deep beams reinforced with FRP bars, Composite Structures, 234 (2020) 111715. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111715>
- [6]. D.M.J. Sumajouw, B.V. Rangan, Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Reinforced Beams and Columns., Research Report GC 3, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology Perth, Australia, 2006.
- [7]. Fan. Xiaochun, Zhou. Zhengrong, Tu. Wenlin, Zhang. Mingzhong, Shear behaviour of inorganic

- polymer concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups, *Composite Structures*, 255 (2021) 112901. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112901>
- [8]. Tran. Ngoc Linh, Shear model mSM-c for slender reinforced concrete members without shear reinforcement subjected to fatigue loads, *Engineering Structures*, 233 (2021) 111886. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111886>
- [9]. J.R. Yost, A. Radlinska, S. Ernst, M. Salera, N.J. Martignetti, Structural behavior of alkali activated fly ash concrete, Part 2: Structural testing and experimental findings, *Materials and Structures*, 46 (2013) 449–462.
- [10]. R. Mourougane, C.G. Puttappa, C. Sashidhar, K.U. Muthu, Shear behaviour of high strength GPC/TVC beams, *Proceedings of International Conference on Advances in Architecture and Civil Engineering*, Bangalore, India, (2012) 142–145.
- [11]. E.H. Chang, Shear and bond behaviour of reinforced fly ash-based geopolymer concrete beams (Ph.D. thesis), Curtin University of Technology, Australia, 2009.
- [12]. Ng. T.S., S.J. Foster, A. Amin, The behaviour of steel-fibre-reinforced geopolymer concrete beams in shear, *Magazine of Concrete Research*, 65 (2013) 308–318.
- [13]. Ng. T.S., S.J. Foster, Shear strength of lightweight fibre reinforced geopolymer concrete composite beam, In *Incorporating Sustainable Practice in Mechanics of Structures and Materials*, 2011, Taylor & Francis Group, London.
- [14]. TCVN 10302-2014, Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng, 2014.
- [15]. TCVN 11586-2016, Xi hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa, 2016.
- [16]. Đặng Thùy Chi, Nghiên cứu chế tạo bê tông geopolyme sử dụng chất hoạt hóa một thành phần và cát biển, *Tap chí Giao thông vận tải*, 741 (2024) 94-97.
- [17]. ASTM C39/39M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, 2021.
- [18]. ASTM C469/469M-22, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, 2022.