

PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ KỸ THUẬT GIẢI PHÁP GIA CƯỜNG KẾT CẤU BÊ TÔNG CỐT THÉP BẰNG VẬT LIỆU CỐT SỢI TỔNG HỢP

ThS. Nguyễn Chí Thanh

PGS.TS Lê Mạnh Hùng

Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam

GS.TS. Phạm Ngọc Khánh

Trường Đại học Thủy lợi

Tóm tắt: Gia cường kết cấu chịu lực bê tông cốt thép bằng việc dán lớp vật liệu cốt sợi cường độ cao là một trong các giải pháp duy trì và nâng cao sức chịu tải của kết cấu cũ để đáp ứng yêu cầu về khai thác. Để đánh giá tính hiệu quả kỹ thuật của giải pháp này, bài báo giới thiệu một số điểm quan trọng cũng như trình bày một số kết quả khảo sát số và khảo sát thực nghiệm của cấu kiện bê tông cốt thép được gia cường.

1. Giới thiệu

Ngày nay với sự tồn tại của nhiều công trình cũ nên việc cải tạo, mở rộng, nâng cấp công trình cũ là một giải pháp ngày càng quan trọng có thể thay thế cho việc xây mới vốn rất tốn kém về kinh tế. Trọng tâm trong lĩnh vực này là việc gia cường kết cấu bê tông cốt thép sau khi đã khai thác để đáp ứng điều kiện cũng như yêu cầu khai thác mới. Các lý do cho việc này có thể là:

- thay đổi việc khai thác công trình do sự thay đổi về hệ thống kết cấu hoặc về tải trọng
- do sự sai sót về thiết kế cũng như thi công
- do ăn mòn đối với cốt thép
- do ảnh hưởng của môi trường (ví dụ như động đất),...

Khoảng 40 năm trước đây, người ta đã biết đến việc gia cường sức kháng uốn của kết cấu bằng phương pháp dán bản thép. Trong vòng 20 năm gần đây việc sử dụng vật liệu gia cường cốt sợi các-bon và thủy tinh đã thay thế dần các bản thép. Các tấm vật liệu tổng hợp này được chế tạo từ các cốt sợi phi kim loại cường độ cao với khoảng 70% thể tích trong sự dính kết với keo epoxi. Trong các vật liệu liên kết cốt sợi thì vật liệu sợi các-bon (CFRP) có các đặc tính tốt hơn so với các vật liệu cốt sợi khác như thủy tinh (GFRP) và polymer aramid (AFRP). Vật liệu kết dính được dùng cũng giống như đối với bản thép là keo epoxi.

Các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm trước đây về giải pháp gia cường sức kháng uốn của kết cấu với các tấm composite cốt sợi các-bon được thực hiện ở nhiều nơi trên thế giới. Ngày nay thì các tấm gia cường composite này được sản xuất phổ biến ở Tây Âu, Nhật Bản, Nam Mỹ,...

So sánh với các phương pháp gia cố truyền thống, phương pháp sử dụng tấm composite thể hiện nhiều nhiều lợi thế. Việc thi công rất gọn nhẹ, sạch sẽ. Hơn nữa, chiều cao kết cấu được giữ nguyên và tĩnh tải gia tăng là rất nhỏ. Vật liệu cốt sợi phi kim loại cũng có những điểm hạn chế. So với giải pháp gia cường bằng các tấm thép thì vật liệu này đắt hơn. Việc thi công cũng đòi hỏi người có kỹ thuật cao và không thích hợp cho kết cấu chịu nhiệt vì dưới tác dụng của nhiệt độ cao các keo dính có nhiều vấn đề.

Vật liệu composite mới gia cường cho kết cấu bê tông có tiềm năng lớn và có thể đảm nhiệm được cả hai việc: sửa chữa gia cường và làm tăng sức chịu tải của kết cấu. Với ưu điểm nhẹ, cường độ cao, mô đun đàn hồi lớn và khả năng chống ăn mòn cao, vật liệu composite cốt sợi các-bon và thủy tinh rất thích hợp cho việc gia cường kết cấu bê tông cốt thép. Hơn thế nữa, việc sử dụng các tấm composite bọc lên bề mặt cấu kiện còn có thể bảo vệ và hạn chế sự gỉ cũng như ăn mòn của các phần cốt thép bên trong lòng bê tông.

2. Phương pháp gia cường kết cấu bằng tấm sợi tổng hợp

2.1. Vật liệu cốt sợi tổng hợp

2.1.1. Đặc tính cấu tạo

a) Chất kết dính:

Chất kết dính được sử dụng để gắn kết tấm vật liệu cốt sợi tổng hợp và bề mặt bê tông của cầu kiện. Chất kết dính giúp truyền tải trọng giữa bề mặt bê tông và hệ thống gia cường tấm composite. Chất kết dính cũng được sử dụng để gắn các lớp vật liệu composite lại với nhau.

b) Cốt sợi:

Các cốt sợi thủy tinh, aramid và các-bon thường được sử dụng với hệ thống gia cường bằng vật liệu composite. Các cốt sợi này giúp cho hệ thống gia cường về mặt cường độ và độ cứng.

e) Lớp bảo vệ:

Lớp bảo vệ giúp giữ gìn cốt thép gia cường đã được kết dính khỏi các tổn hại tiềm năng do môi tác động môi trường và cơ học. Lớp bảo vệ được ứng dụng điển hình ở bề mặt ngoài của hệ thống gia cường sau khi thực hiện việc bảo dưỡng lớp kết dính. Việc bảo vệ này có nhiều dạng khác nhau. Chúng bao gồm keo epoxy, hệ thống kết dính tạo nhám, lớp bảo vệ chống cháy,...

2.1.2. Đặc tính vật lý

a) Khối lượng riêng:

Vật liệu polymer cốt sợi có khối lượng riêng trong khoảng từ 1,2 tới 2,1 g/cm³, theo đó nhỏ hơn thép 6 lần. Việc giảm khối lượng riêng giúp giảm giá thành vận chuyển, giảm phần tĩnh tải gia tăng của kết cấu và có thể dễ dàng xử lý vật liệu ở công trường.

Bảng 1: Khối lượng riêng của các loại vật liệu cốt sợi (g/cm³)

Thép	GFRP	CFRP	AFRP
7,9	1,2 – 2,1	1,5 – 1,6	1,2 – 1,5

b) Hệ số dẫn nở nhiệt:

Các hệ số dẫn nở nhiệt của vật liệu composite chịu lực một chiều khác nhau theo phương dọc và ngang, phụ thuộc vào kiểu loại cốt sợi, vật liệu kết dính và tỷ lệ cốt sợi.

Bảng 2: Hệ số dẫn nở nhiệt của các loại vật liệu cốt sợi

	Hệ số dẫn nở nhiệt ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	GFRP	CFRP	AFRP
Theo chiều dọc, α_L	6 tới 10	-1 tới 0	-6 tới -2
Theo chiều ngang, α_T	19 tới 23	22 tới 50	60 tới 80

Ghi chú: đây là các giá trị điển hình đối với hàm lượng thể tích cốt sợi thay đổi trong phạm vi 0,5 tới 0,7 [1].

c) Ảnh hưởng của nhiệt độ cao:

Phụ thuộc vào nhiệt độ, mô đun đàn hồi của vật liệu polymer bị giảm đáng kể do sự thay đổi cấu trúc vật liệu của nó. Ở vật liệu composite FRP, cốt sợi thể hiện đặc tính nhiệt tốt hơn so với chất kết dính và có thể tiếp tục chịu một số tải trọng theo phương dọc thớ cho đến khi nhiệt độ đạt tới giới hạn làm chảy cốt sợi. Điều này có thể xảy ra khi nhiệt độ vượt quá 1000°C. Cốt sợi thủy tinh có khả năng chịu nhiệt không quá 275°C. Do sự giảm lực chuyển đổi giữa các cốt sợi thông qua liên kết tới chất kết dính, đặc tính chịu kéo của vật liệu composite bị giảm. Các kết quả thí nghiệm đã cho thấy, ở nhiệt độ 250°C (cao hơn nhiều so với nhiệt độ giới hạn của vật liệu kết dính) sẽ làm giảm cường độ chịu kéo của các vật liệu cốt sợi thủy tinh và carbon tới 20%. Các đặc tính khác bị tác động bởi sự truyền lực cắt qua phần vật liệu kết dính, chẳng hạn như cường độ chịu uốn, sẽ bị giảm đáng kể ở nhiệt độ thấp.

2.1.3. Đặc tính cơ học

a) Cường độ chịu kéo:

Khi chịu lực kéo trực tiếp, vật liệu cốt sợi tổng hợp không thể hiện ứng xử dẻo trước khi bị phá hoại. Ứng xử kéo của vật liệu này được biểu diễn bằng quan hệ ứng suất – biến dạng đàn hồi tuyến tính đến khi bị phá hoại, và trong trường hợp này sự phá hoại là đột ngột và giòn. Cường độ kéo và độ cứng của vật liệu cốt sợi composite phụ thuộc vào nhiều tham số. Vì các sợi trong vật liệu tổng hợp là thành phần chịu tải chính, nên kiểu cốt sợi, chiều

sắp xếp của cốt sợi, lượng cốt sợi và phương pháp cũng như điều kiện chế tạo cốt sợi ảnh hưởng tới đặc tính chịu kéo của vật liệu này.

b) Ứng xử nén:

Các hệ thống gia cường ngoài bằng vật liệu cốt sợi tổng hợp không được sử dụng cho mục đích gia cường vùng chịu nén. Mô đun đàn hồi nén thường nhỏ hơn so với mô đun đàn hồi kéo. Các kết quả thí nghiệm trên cùng loại vật liệu với tỷ lệ thể tích là 55-60% của cốt sợi thủy tinh liên tục nằm trong chất kết dính ester hoặc polyester đã cho thấy là mô đun đàn hồi có giá trị trong khoảng 34000 và 48000 MPa. Mô đun đàn hồi nén xấp xỉ 80% mô đun đàn hồi kéo đối với vật liệu GFRP, 85% đối với CFRP và 100% đối với AFRP.

2.2. Các dạng phá hoại

Cường độ chịu uốn của mặt cắt phụ thuộc vào kiểu phá hoại. Các dạng phá hoại sau đây cần được khảo sát đối với mặt cắt cấu kiện được gia cường bằng lớp vật liệu cốt sợi tổng hợp.

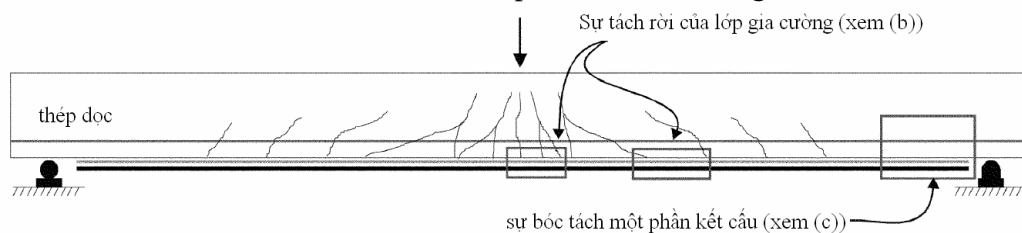
- Sự phá hoại của bê tông trong vùng nén trước khi cốt thép thường bị chảy,
- Sự chảy dẻo của thép trong vùng chịu kéo ngay sau khi xảy ra sự phá hoại của tấm gia cường,
- Sự chảy dẻo của thép trong vùng chịu kéo sau khi có sự phá hoại của bê tông vùng chịu nén,

- Sự bóc tách của lực cắt hoặc kéo của lớp bê tông bảo vệ và
- Sự bóc tách của lớp vật liệu gia cường khỏi bề mặt bê tông.

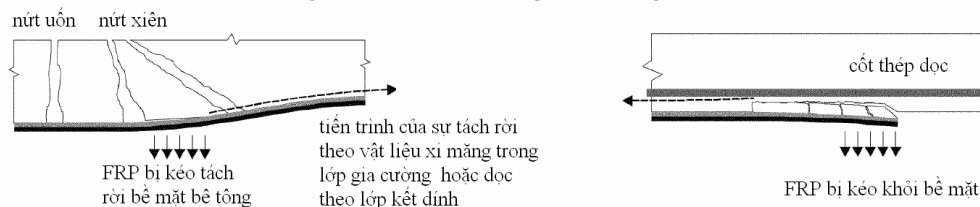
Sự phá hoại do nén của bê tông được giả định là xảy ra nếu biến dạng nén trong bê tông đạt tới giá trị biến dạng giới hạn ($\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0,003$). Sự phá hoại từ lớp gia cường được giả định là xảy ra khi biến dạng của lớp gia cường đạt tới giá trị biến dạng tới hạn trong thiết kế ($\epsilon_f = \epsilon_{fu}$) trước khi bê tông đạt tới biến dạng cực hạn. Sự bóc tách của lớp bê tông bảo vệ hoặc của lớp vật liệu gia cường xảy ra nếu lực trong lớp gia cường vượt qua khả năng chịu đựng của liên kết bề mặt. Với mặt cắt được gia cường lớp ngoài bằng vật liệu cốt sợi tổng hợp, phá hủy do sự bóc tách có thể là chủ yếu (hình 1b). Để tránh những dạng phá hủy do bóc tách bởi các vết nứt xiên, biến dạng có hiệu trong cốt liệu gia cường cần nhỏ hơn biến dạng mà sự bóc tách có thể xảy ra, ϵ_{fd} . Theo ACI 440.2R-08 (2008) thì giá trị này được xác định như sau:

$$\epsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\epsilon_{fu} \quad (1.1)$$

Cũng theo ACI 440.2R-08 (2008), giá trị biến dạng thiết kế của tấm gia cường được đề nghị lấy là $\epsilon_{fd} \leq 0,7\epsilon_{fu}$. Để đảm bảo phá hoại xảy ra theo dạng này, thì chiều dài dính bám phải lớn hơn một giá trị tính toán.



a) Ứng xử của cấu kiện bê tông chịu uốn được gia cường



b) Sự bóc tách của lớp gia cường do vết nứt uốn hoặc cắt

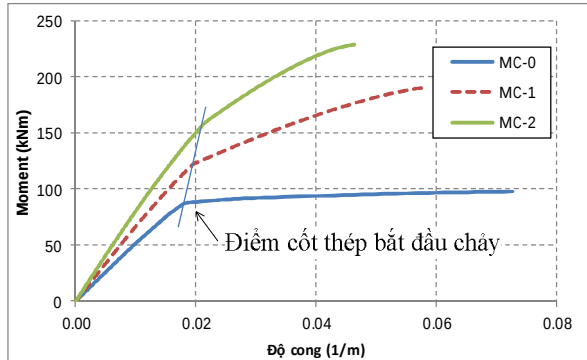
c) Sự bóc tách của lớp bê tông và vật liệu gia cường

Hình 1: Các dạng phá hoại điển hình của cấu kiện chịu uốn được gia cường bằng tấm sợi tổng hợp [1]

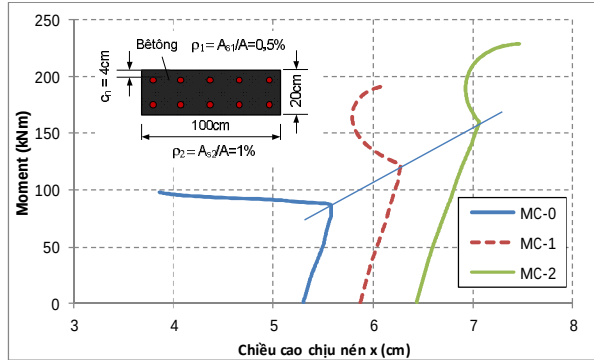
3. Phân tích sức kháng uốn của mặt cắt được gia cường bằng phương pháp số

Để đánh giá được hiệu quả của việc gia cường, trong phần này trình bày một khảo sát sức kháng uốn đối với mặt cắt bê tông cốt thép có kích thước $B \times H = 100\text{cm} \times 20\text{cm}$, mác bê tông #200 với cốt thép có giới hạn chảy là 340 MPa được bố trí như trên hình 2b. Ba mặt cắt với các mức độ gia cường khác nhau được nghiên cứu: MC-0 (không gia cường), MC-1 (gia cường một lớp) và

MC-2 (gia cường 2 lớp ở phía dưới mặt cắt). Các thông số về tấm gia cường composite được lấy từ nhà cung cấp Fyfe với chủng loại SEH-25A có bề dày 0,635mm, cường độ chịu kéo 521 MPa, mô đun đàn hồi 26,1 GPa và độ giãn dài cực hạn 2,0%. Keo dính được sử dụng có cường độ chịu kéo là 72,4 MPa, mô đun đàn hồi 3,18 GPa và độ giãn dài 5,0%. Trong trường hợp chịu uốn, keo dính có cường độ là 123,4 MPa và mô đun đàn hồi là 3,12 GPa.



a) Mô men – Độ cong



b) Mô men - Chiều cao vùng chịu nén của bê tông

Hình 2: Ứng xử của mặt cắt bê tông cốt thép gia cường bằng vật liệu composite

Các tính toán được thực hiện cho mặt cắt nứt với giả thiết là bê tông hoàn toàn không chịu kéo. Đường cong ứng suất-biến dạng của bê tông được xác định theo tiêu chuẩn Model Code 2010 [2]. Việc tính toán trạng thái ứng suất, biến dạng của mặt cắt dưới tác dụng của tải trọng mô men dựa trên phương pháp lặp Newton-Raphson và tích phân ứng suất mặt cắt thông qua ứng dụng chương trình BMAP [3]. Hình 2 thể hiện kết quả tính toán được biểu diễn thông qua các quan hệ a) độ cong – mô men và b) chiều cao vùng chịu nén của bê tông – mô men.

Các đường cong quan hệ trên hình 2a cho thấy độ cứng kháng uốn của mặt cắt gia cường (MC-1 và MC-2) cao hơn đáng kể so với độ cứng của mặt cắt không gia cường (MC-0). Sức kháng uốn của mặt cắt sau khi gia cường 1 lớp tăng gần gấp 2 lần trong trường hợp này (tỷ lệ mô men 195/100). Khi gia cường 2 lớp thì sức kháng uốn có tăng hơn nữa (tỷ lệ 2,3 lần). Việc gia cường đã làm cho chiều cao mặt cắt thay đổi chút ít, nhưng với sự phân bố của hàm lượng vật liệu cường độ cao nhiều ở mặt

dưới của mặt cắt đã làm cho vị trí trục trung hòa dịch chuyển xuống phía dưới theo hướng làm tăng chiều cao vùng chịu nén (Hình 2b). Việc này kéo theo điểm ứng với tải trọng làm chảy cốt thép thường vùng chịu kéo được dịch chuyển theo hướng tải trọng tăng vì biến dạng của nó trong trường hợp mặt cắt cùng độ cong bị giảm. Các điểm nằm trên một đường thẳng và được thể hiện trên hình 2a và 2b. Cho đến khi cốt thép thường bị chảy, ứng xử của mặt cắt là tuyến tính. Khi cốt thép chảy làm cho biến dạng vùng chịu kéo tăng nhanh kéo theo độ cong cũng tăng nhanh khi tải trọng tăng. Điều này lại làm giảm chiều cao vùng chịu nén của mặt cắt (đoạn cong trên hình 2b). Sự giảm này phụ thuộc vào tỷ lệ hàm lượng cốt thép thường vùng chịu kéo và vật liệu gia cường. Ở mặt cắt không gia cường, do cốt thép thường bị chảy nên chiều cao vùng chịu nén giảm mạnh, sức chịu tải của mặt cắt không lớn. Với mặt cắt gia cường hai lớp có sự giảm nhẹ về chiều cao vùng chịu nén hơn so với trường hợp gia cường một lớp. Cho đến khi bê tông bị chảy dẻo, chiều cao vùng chịu

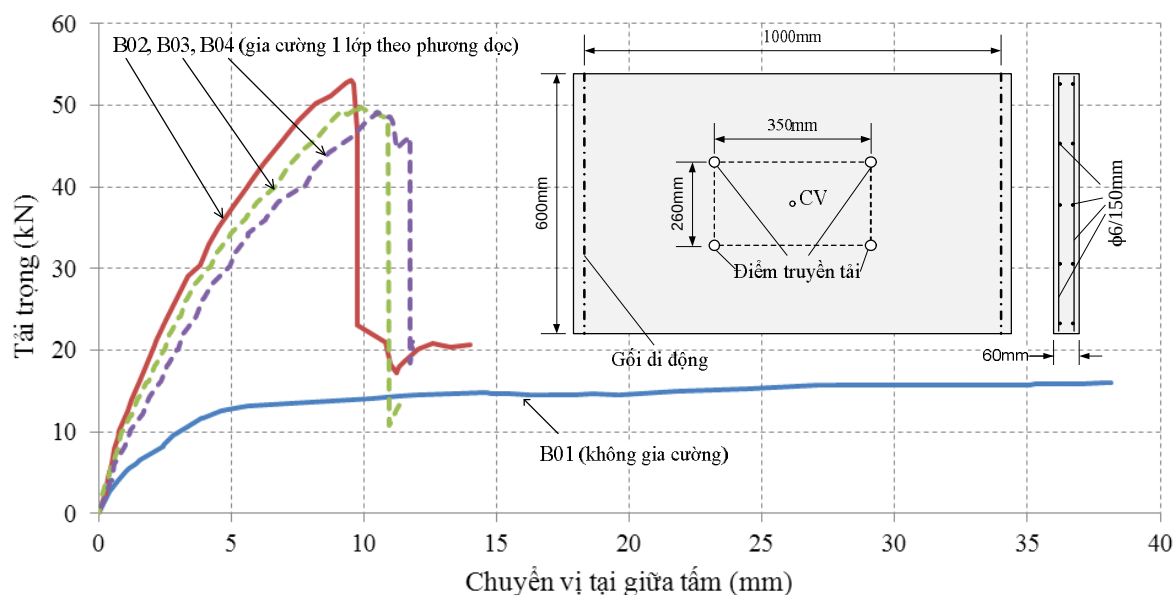
nén lại tăng dần và rồi đến một giới hạn nào đó thì bê tông vùng nén bị phá hủy. Như vậy, việc gia cường vật liệu composite ở vùng chịu kéo đã làm tăng đáng kể chiều cao chịu nén của bê tông và điều này dẫn tới sức kháng uốn của mặt cắt được tăng lên. Đây chính là điểm cơ bản thể hiện hiệu quả của việc gia cường cấu kiện chịu uốn bằng cách dán lớp vật liệu cường độ cao ở vùng chịu kéo.

4. Đánh giá hiệu quả của phương pháp gia cường bằng thực nghiệm

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp gia cường, ở phần này trình bày kết quả thí nghiệm của bản bê tông cốt thép chịu uốn. Các bản này có kích thước làm việc là $B \times L \times H = 60\text{cm} \times 100\text{cm} \times 6\text{cm}$, được chế tạo bởi bê tông mác #200, cốt thép có cường độ chảy là 340 MPa (hình 3). Bản B01 không gia cường, các bản còn lại B02, B03 và B04 được gia cường bằng tấm cốt sợi từ nhà cung cấp Fyfe với chủng loại SEH-25A có bề dày 0,635mm, cường độ chịu kéo 521 MPa, mô đun đàn hồi 26,1 GPa và độ giãn dài cực hạn 2,0%. Keo dính được sử dụng

có cường độ chịu kéo là 72,4 MPa, mô đun đàn hồi 3,18 GPa và độ giãn dài 5,0%. Trong trường hợp chịu uốn, keo dính có cường độ là 123,4 MPa và mô đun đàn hồi là 3,12 GPa. Các quan hệ chuyển vị tại giữa tấm và tải trọng của các bản này được thể hiện trên hình 3.

Ở đây, bản B01 với chỉ cốt thép thường thể hiện một miền chảy dẻo rất lớn và có chuyển vị ở trạng thái tới hạn là 38mm. Ở trạng thái này, bản có tỷ lệ chuyển vị tương đối so với chiều dài nhịp uốn là 3,8%. Tải trọng lớn nhất mà bản B01 chịu được là khoảng 17 kN. Ngược lại, các bản B02, B03 và B04 gần như không có miền chảy dẻo do bị phá hoại đột ngột bởi sự bong bật của lớp gia cường. Các đường cong quan hệ giữa chuyển vị và tải trọng có cùng một dạng và giá trị tải trọng tới hạn cũng như chuyển vị tới hạn tương đối gần nhau. Ở đây, giá trị trung bình của tải trọng tới hạn là xấp xỉ 50 kN, của chuyển vị là 11mm. Như vậy ở thử nghiệm này, kết cấu bản được gia cường có sức chịu tải lớn xấp xỉ bằng ba lần so với kết cấu không gia cường (300%).



Hình 3: Biểu đồ quan hệ chuyển vị-tải trọng ở vị trí giữa dầm

5. Kết luận

Với những ưu điểm về vật liệu như cường độ chịu tải lớn, khối lượng nhẹ so với các vật liệu truyền thống, và về sự thuận tiện trong việc thi công, phương pháp gia cường kết cấu chịu lực bê tông cốt thép bằng việc dán vật liệu cốt sợi tổng hợp thể hiện sự hiệu quả kỹ

thuật cao. Sự tăng cường vật liệu cường độ cao này ở những vùng chịu kéo làm tăng chiều cao chịu nén của mặt cắt bê tông, kéo theo sự tăng về sức chịu tải uốn của cấu kiện. Khảo sát số và thực nghiệm đều cho thấy, việc gia cường bằng tấm vật liệu composite cũng làm tăng đáng kể độ cứng của cấu kiện sau khi gia

cường. Vì vật liệu gia cường có giới hạn biến dạng phá hoại cao, nên sự phá hoại của mặt cắt chịu lực chủ yếu xảy ra do bê tông vùng chịu nén vượt quá khả năng chịu lực. Sự chuyển đổi từ dạng phá hoại dẻo do cốt thép thường sang phá hoại giòn ở bê tông vùng chịu nén đã khai thác được tối đa sự chịu lực của bê tông, và do đó hiệu quả gia tăng sức chịu tải của kết cấu là cao (300% cho trường hợp kết cấu được thí nghiệm trong khuôn khổ bài báo này).

Ngoài các dạng phá hoại thông thường của mặt cắt do sự đứt của cốt liệu chịu kéo hoặc sự phá hoại nén của bê tông, thì ở phương pháp gia cường này cũng có thể có sự phá hoại do bóc tách của lớp gia cường khi chiều dài lớp gia cường không đủ lớn. Việc nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của mức độ gia cường, chiều dài gia cường, sự dính bám giữa bê tông và lớp vật liệu gia cường cùng với sự làm việc chung của bê tông vùng chịu kéo là rất cần thiết.

Tài liệu tham khảo

- [1] ACI: *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, Report by ACI Committee 440, American Concrete Institute, July 2008.
- [2] MC2010: *Model Code 2010, First complete draft*, Volume 1 & 2, fib Bulletin 55, 03-2010.
- [3] N.L. Tran, C.A. Graubner: *Numerical Determination of Bending Stiffness of Reinforced Concrete Elements under Repeated Loading*, Darmstadt Concrete, Annual Journal on Concrete and Concrete Structures, Vol. 25, Darmstadt 2010.

Abstract:

TECHNICAL EFFECTIVENESS ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES STRENGTHENED WITH FRP PLATES

Using FRP plates to cover the surface of reinforced concrete structures is one of the various strengthening methods, which can recover and also make the load-bearing of structures stronger to adapt the new requirement of exploitation. To determine the technical effectiveness of this method, this paper introduces some important points of the method and also presents results of numerical as well as experimental analyses of reinforced concrete elements strengthened with FRP plates.