

NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ CỦA TẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP ĐƯỢC GIA CƯỜNG BẰNG VẬT LIỆU FRP KHI CHỊU TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG NỔ

RESEARCH ON THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE SLABS REINFORCED WITH FRP MATERIALS WHEN SUBJECTED TO BLAST LOADS



Ths. Lê Hoàng Long¹

Tóm tắt: Vật liệu FRP (Fiber reinforced plastic) là một loại vật liệu composite mới, cường độ cao với nhiều ưu điểm về khả năng chịu lực, chống ăn mòn. Đồng thời, do đặc điểm cấu tạo, vật liệu này có khả năng hấp thụ hiệu quả xung lượng do tải trọng nổ gây ra. Việc sử dụng vật liệu FRP trong gia cố cho các kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) chịu tác dụng của tải trọng nổ cần được nghiên cứu nhằm ứng dụng tăng cường khả năng chịu lực cho một số loại kết cấu công trình thực tế. Trong bài báo, tác giả sử dụng phần mềm mô phỏng ABAQUS để nghiên cứu ứng xử của tấm BTCT được gia cường bằng vật liệu FRP khi chịu tác dụng của tải trọng nổ, từ đó đánh giá hiệu quả của việc sử dụng vật liệu này.

Từ khóa: Vật liệu FRP, tấm bê tông cốt thép, tải trọng nổ, vật liệu composite.

Abstract: Fiber reinforced plastic (FRP) is a new, high-strength composite material with many advantages in bearing capacity and corrosion resistance. Simultaneously, due to its structural characteristics, this material is able to effectively absorb the momentum caused by blast loads. In fact, it is required to study the use of FRP in reinforced concrete structures subjected to blast loads in order to apply it to increase the bearing capacity of some types of construction structures. In the article, the author uses ABAQUS software to study the behavior of reinforced concrete slabs strengthened with FRP when subjected to blast loads, thereby providing an evaluation of the effectiveness in using this material.

Keywords: FRP, reinforced concrete slabs, blast load, composite materials.

Nhận bài ngày 15/2/2024, chỉnh sửa ngày 20/3/2024, chấp nhận đăng ngày 22/5/2024.

1. Giới thiệu

Có thể nói việc nghiên cứu tính chất cơ lý của các loại vật liệu mới trong lĩnh vực xây dựng là tiền đề quan trọng trong công cuộc xây dựng cơ sở hạ tầng nói chung và công nghệ xây dựng trong quân đội nói riêng. Sự phát triển của cuộc cách mạng công nghệ 4.0 mang theo

nhiều hướng phát triển cho lĩnh vực vật liệu, đồng thời yêu cầu ngày càng cao về chất lượng và hiệu quả.

Bài báo đề cập đến một loại vật liệu có tên là bê tông cốt thép gia cường FRP. Hiện nay, việc sử dụng tấm sợi composite cường độ cao (Fibre Reinforced Polymer, viết tắt FRP) trong công tác gia cường kết cấu công trình được áp dụng phổ biến ở các nước tiên tiến trên thế giới [1]. Các kết cấu công trình được gia cường có thể là kết cấu cột, dầm, sàn BTCT, kết cấu khối xây gạch... Phương pháp gia cường bằng tấm FRP tận dụng được những ưu điểm của loại vật liệu này như cường độ chịu kéo và mô đun đàn hồi cao, trọng lượng nhẹ, không bị ăn mòn... Bên cạnh ưu điểm về đặc tính cơ học, gia cường bằng tấm FRP còn cho thấy những tiện lợi cho quá trình thi công gia cường như nhanh chóng, đơn giản, không cần nhiều máy móc thiết bị, rút ngắn thời gian thi công.

Loại vật liệu composite cốt sợi FRP là một loại vật liệu khá mới, chưa được áp dụng nhiều cho các công trình quân sự, mặc dù đây là vật liệu có rất nhiều lợi thế phù hợp để làm kết cấu chịu lực cho công trình quân sự ở vùng ven biển, hải đảo. Hệ thống tiêu chuẩn, hướng dẫn tính toán thiết kế kết cấu được gia cường bằng vật liệu này chưa được thống nhất. Để có thể áp dụng và phát triển vật liệu FRP cho công trình quân sự một cách hiệu quả, cần phải có những nghiên cứu đầy đủ và toàn diện về đặc tính cơ học, những nghiên cứu về ứng xử cơ bản của các dạng kết cấu sử dụng FRP (dầm, cột, tấm,...) và kết cấu bê tông cốt thép được gia cường bằng FRP chịu các dạng tải trọng đặc biệt như tải trọng nổ.

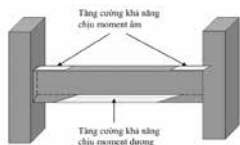
2. Tổng quan lý thuyết

Trong phương pháp dán tấm, việc sử dụng tấm FRP đã dần thay thế tấm bản thép. Đặc biệt, vật liệu FRP không bị ăn mòn, không bị giới hạn chiều dài và có độ cứng lớn. Trong những thập niên cuối thế kỷ 20, phương pháp dán tấm FRP đã được áp dụng rộng rãi trên toàn thế giới (Burgoyne, 1993 [2]; Erki, 1999; Fukuyama, 1997 [3]; Meier, 1999). Ở Châu Âu, ngay từ những năm 1978, các báo cáo khoa học của Đức đã đề cập đến vấn đề ứng dụng FRP tăng cường kết cấu BTCT. Các nhà nghiên cứu

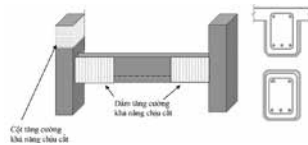
¹ Học viện Kỹ thuật Quân sự
Email: lehoanglong@lqdtu.edu.vn

ở Thụy Sĩ đã triển khai ứng dụng FRP tăng khả năng chịu uốn cho kết cấu nhịp cầu BTCT từ năm 1987. Phần lớn các nghiên cứu và các đồ án đều tập trung vào việc gia cường khả năng chịu uốn (Shin và Lee, 2003) [4], dán ốp cột (Seible et al, 1997). Trong các trường hợp này, tấm dán trở thành cốt thép ngang đặt ngoài tiết diện bê tông cốt thép. Việc sử dụng tấm dán FRP để tăng cường khả năng chống xoắn của kết cấu cũng được nghiên cứu trong các công bố của Ghobarah, 2002 [5] và Grace, 2002. Các nghiên cứu được công bố về việc sử dụng vật liệu FRP để gia cường cho các cấu kiện BTCT [6], [7], [8], [9], [10], [11]. Tại Việt Nam, vật liệu FRP cũng đã được áp dụng sửa chữa cho các công trình cầu như: Cầu Sài Gòn, Cầu Trần Hưng Đạo – Phan Thiết, cầu Trần Thị Lý – Đà Nẵng và một số công trình dân dụng khác. Các nghiên cứu được công bố về vấn đề này có thể kể đến như của như các bài báo của Nguyễn Minh Hải [12], Nguyễn Tuấn Ninh [13], luận án Tiến sĩ của Ngô Thanh Thủy, Nguyễn Chí Thanh... Các kết quả ban đầu cũng đã cho thấy tiềm năng ứng dụng loại vật liệu này trong lĩnh vực gia cường kết cấu.

Nói chung, phương pháp sử dụng FRP khắc phục được những nhược điểm của phương pháp truyền thống: Không làm tăng tĩnh tải, không làm thay đổi sơ đồ kết cấu, tăng độ cứng chống uốn, tăng hiệu quả trong việc ngăn chặn mở rộng và sự xuất hiện vết nứt trong bê tông và thi công dễ dàng, nhanh chóng. Các tấm vật liệu FRP có bề dày tương đối mỏng, có thể thỏa mãn yêu cầu về mặt kiến trúc. Một số hình ảnh sử dụng FRP gia cường kết cấu được thể hiện trên hình



Hình 1. Tăng khả năng chịu uốn của kết cấu dầm bê tông cốt thép



Hình 2. Tăng khả năng chịu cắt của kết cấu dầm, cột bê tông cốt thép

3. Phương pháp nghiên cứu và phân tích dữ liệu

Việc khảo sát sự làm việc của tấm BTCT có gia cường vật liệu FRP khi chịu tải trọng nổ trong phần mềm Abaqus được tiến hành căn cứ trên các hướng dẫn của Abaqus [8]. Các giả thiết xây dựng mô hình tính toán:

Khi tính toán thừa nhận các giả thiết sau:

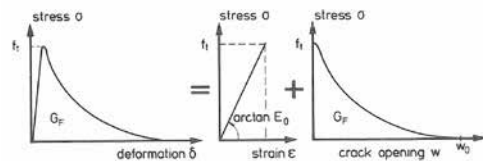
- + Khảo sát tấm bê tông cốt thép được gia cường bằng vật liệu FRP đặt trên gối cứng;
- + Bê tông và cốt chịu lực là vật liệu đồng nhất;
- + Tác dụng của tải trọng nổ chỉ xem xét dưới dạng xung;
- + Dưới tác dụng của tải trọng, lớp vật liệu gia cường FRP và tấm BTCT không có sự tách trượt.

Việc mô hình hóa kết cấu được thực hiện cho từng nhóm: Mô hình hóa hình học, mô hình hóa vật liệu, mô hình hóa liên kết và mô hình hóa tải trọng.

Lựa chọn loại phần tử: Bài báo sử dụng phần tử C3D8R trong thư viện vật liệu là dạng phần tử khối 3 chiều, 8 nút tuyến tính [14],[15] để gán cho các phần tử bê tông thường và bê tông hạt mịn của FRP. Các thanh cốt thép, lưới sợi dệt sử dụng phần tử dạng thanh T3D2 (trong Abaqus chọn wire) nhằm giảm bớt khối lượng tính toán. Mô hình kết cấu tấm bê tông cốt thép và tấm bê tông cốt thép được gia cường bằng FRP được tổ hợp hoàn chỉnh từ các phần riêng lẻ thông qua khai báo ràng buộc (constraint) thích hợp giữa các phần. Cốt thép và lưới sợi dệt được khai báo nhúng (embedded) vào bê tông với giả thiết dính bám giữa cốt chịu lực và cốt bê tông là dính bám tuyệt đối.

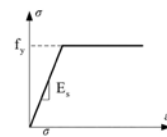
Mô hình ứng xử dính bám bề mặt (Surface based cohesive behavior) trong Abaqus cho phép khai báo ứng xử dính bám giữa 2 lớp vật liệu bê tông và FRP. Mô hình này mô phỏng quá trình dính bám và bong tách giữa 2 lớp vật liệu thông qua mối quan hệ giữa lực dính và độ trượt với giả thiết ứng xử dính bám là tuyến tính trong giai đoạn đầu. Sau khi đạt đến lực dính lớn nhất, quá trình bong tách bắt đầu xuất hiện và khi quá trình bong tách diễn ra hoàn toàn, kết cấu bị phá hoại.

Mô hình vật liệu bê tông: Sử dụng mô hình của Hognestad do E.Hognestad phát triển và mô hình theo hướng dẫn của Abaqus dùng để mô tả tính chất phi tuyến của bê tông dựa trên mô hình phá hoại dẻo. Mô hình này dựa trên cường độ chịu kéo và chịu nén dọc trục thiết lập đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng của miền chịu kéo và miền chịu nén để mô tả tính chất bê tông khi làm việc.



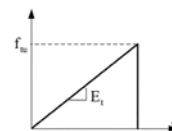
Hình 3. Quan hệ ứng suất - biến dạng của bê tông vùng kéo

Mô hình ứng xử của thép: Mô hình đàn hồi - dẻo được sử dụng để mô phỏng tính chất vật liệu của cốt thép. Đường ứng suất - biến dạng của thép được xác định bởi mô đun đàn hồi E_s và cường độ chịu kéo f_y . Mô hình này có thể được sử dụng cho cả ứng xử kéo và nén của cốt thép. Mối quan hệ ứng suất - biến dạng được thể hiện trên hình 4 dưới đây.



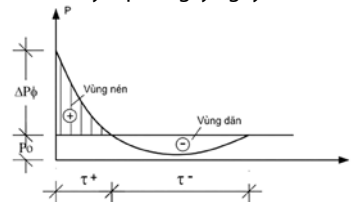
Hình 4. Quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu thép

Mô hình ứng xử của cốt sợi dệt: Lưới sợi dệt là loại vật liệu có tính chất đàn hồi - giòn. Ứng suất kéo tăng gần như tuyến tính, sau khi đạt ứng suất kéo cực đại, lưới sợi dệt bị phá hoại ngay lập tức mà không có giai đoạn biến dạng dẻo trước khi bị phá hoại. Sau khi đạt đến cường độ chịu kéo ứng suất giảm đột ngột về 0 thể hiện sự phá hoại giòn của vật liệu này.



Hình 5. Quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu cốt sợi dệt

Tải trọng tính toán: Dựa vào thực nghiệm, giáo sư Sadovsky đã xác định được trị số siêu áp mặt sóng xung kích khi nổ trong môi trường không khí vô hạn ở khoảng cách R. Quy luật biến đổi theo thời gian được bao gồm pha nén và pha giãn. Để đơn giản trong tính toán, trong bài báo, chỉ xét tới pha nén do đây là phần gây nguy hiểm nhất cho tấm.



Hình 6. Quy luật biến đổi của sóng xung kích

$$\Delta P_{\phi} = 1,06 \frac{\sqrt{C_p}}{R} + 4,3 \left(\frac{\sqrt{C_p}}{R} \right)^2 + 14 \left(\frac{\sqrt{C_p}}{R} \right)^3 \quad (1)$$

Trong đó: ΔP_{ϕ} là siêu áp mặt sóng, kg/cm^2 ; C_p là trọng lượng toàn phần của khối thuốc nổ, kg ; R là khoảng cách từ điểm tính toán đến tâm nổ, m ;

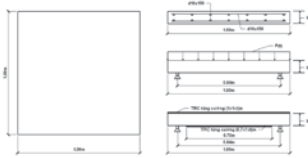
Bài toán: Xác định các ứng xử (ứng suất, chuyển vị) của tấm bê tông cốt thép được tăng cường TRC khi chịu tác dụng của tải trọng nổ trong các trường hợp có thay đổi số lớp lưới tăng cường.

Một số thông số cơ bản:

- Tấm bê tông cốt thép có kích thước 1m x 1m x 0,1m với a là chiều dày của tấm, khảo sát 3 tấm với chiều dày lớp FRP sử dụng 1, 2, 3 lớp lưới dệt tương ứng với chiều dày là 5cm, 10cm, 15cm, được trát ở cả 2 mặt của tấm với các thông số cụ thể:

- + Bê tông hạt mịn, thông số vật liệu như bảng 1.
- + Mặt trước có kích thước 1m x 1m x (0,05 - 0,1 - 0,15)m.
- + Mặt sau có kích thước 0,7m x 1m x (0,05 - 0,1 - 0,15)m.
- + Chiều dày lớp bảo vệ là 0,004m, khoảng cách giữa các lớp lưới là 0,004m.

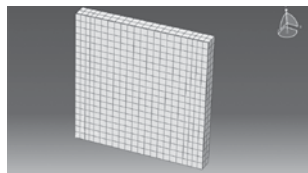
- Các thông số cơ bản của tấm bao gồm:
 - + Bê tông cấp độ bền B40.
 - + Thép CII bố trí 2 lớp lưới thép d10a200.
 - + Chiều dày lớp bê tông bảo vệ là 0,02m.
- Tải trọng tác dụng: Tải trọng nổ.



Hình 7. Mô hình bài toán khảo sát

Việc xác định các ứng xử của kết cấu được mô phỏng bằng phần mềm Abaqus với:

- Điểm khảo sát là điểm ở tâm mặt trước của tấm N12 có tọa độ (0,5m; 0,5m; 0m).
- Lưới chia có kích thước bước lưới lớn nhất là 0,005m.
- Bước thời gian khảo sát là 0,0005s (0,0001s - cho tấm có chiều dày 150mm và 200mm). Thời gian khảo sát là 1s. Việc khảo sát sự làm việc của tấm BTCT có gia cường FRP khi chịu tải trọng nổ.



Hình 8. Lưới phần tử của mô hình

- Thông số vật liệu bê tông

Vật liệu bê tông bao gồm hai loại, vật liệu bê tông của tấm BTCT và vật liệu bê tông hạt mịn cho kết cấu gia cường, các thông số cơ bản được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Bảng các tham số của vật liệu bê tông

Vật liệu	f _c ' (MPa)	f _t (MPa)	E _c (MPa)	v	γ (kg/m ³)
Bê tông thường B40	22,0	1,40	36000	0,20	2320
Bê tông hạt mịn	23,9	2,77	23120	0,20	1960

- Thông số vật liệu cốt thép

Các thông số của vật liệu cốt thép của tấm BTCT được thể hiện trong Bảng 2 dưới đây.

Bảng 2. Bảng các tham số của vật liệu cốt thép

Vật liệu	f _t (MPa)	E _c (MPa)	v	γ (kg/m ³)
Cốt thép thường	280	210000	0,30	7850

- Thông số vật liệu cốt sợi dệt

Các thông số của vật liệu FRP theo cả phương dọc và phương ngang được thể hiện trong Bảng 3 dưới đây.

Bảng 3. Bảng các tham số của vật liệu cốt sợi

Vật liệu	f _{tu} (MPa)	E _c (MPa)	v	γ (kg/m ³)
Cốt sợi dệt	623	31940	0,22	1740

- Tải trọng tính toán

Tải trọng nổ được xác định với lượng nổ 3kg đặt cách tấm 5m, giá trị của tải trọng nổ được giả thiết là phân bố đều trên toàn bộ phạm vi của tấm. Giá trị siêu áp sóng xung kích được tính theo (1).

$$\Delta P_{\phi} = 1,06 \frac{\sqrt{C_p}}{R} + 4,3 \left(\frac{\sqrt{C_p}}{R} \right)^2 + 14 \left(\frac{\sqrt{C_p}}{R} \right)^3 = 0,9891 (\text{kg/cm}^2) \quad (2)$$

Sóng xung kích tác dụng lên mặt trước của tấm là siêu áp sóng phản xạ có giá trị là:

$$\Delta P_{fx} = 2\Delta P_{\phi} + \frac{6\Delta P_{\phi}^2}{\Delta P_{\phi} + 7,2} = 2,7294 (\text{kg/cm}^2) \quad (3)$$

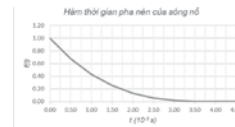
Xác định thời gian duy trì siêu áp sóng xung kích trong pha nén.

$$\text{Vi: } 2 < \frac{R}{\sqrt{C_{SXX}}} = 3,4668 \leq 1 \text{ nên: } \tau_+ = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{C_{SXX}} \cdot \sqrt{R} \approx 0,0038 (\text{s})$$

Qui luật biến thiên siêu áp sóng phản xạ có dạng: $\Delta P(t) = \Delta P_{fx} \left(1 - \frac{t}{\tau_+} \right)^n$

Trong đó, hệ số mũ n được xác định theo công thức: $n = 1 + \Delta P_{fx}^{2,3} \approx 2,9534$

Hình ảnh hàm thời gian pha nén của sóng nổ tác dụng lên tấm được thể hiện trên Hình 9.



Hình 9. Hàm thời gian pha nén của sóng nổ

4. Phân tích số liệu

Kết quả của các trường hợp được thể hiện cụ thể trong các hình dưới đây, trong đó:

a) Chuyển vị

b) Ứng suất



Hình 10. Chuyển vị và ứng suất của tấm BTCT dày 10cm không gia cường



Hình 11. Chuyển vị và ứng suất của tấm BTCT gia cường 1 lớp lưới



Hình 12. Chuyển vị và ứng suất của tấm BTCT gia cường 2 lớp lưới



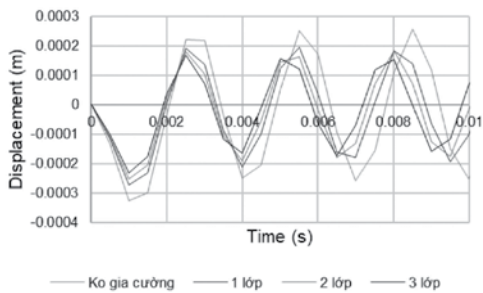
Hình 13. Chuyển vị và ứng suất của tấm BTCT gia cường 2 lớp lưới

So sánh các hình vẽ trên có thể thấy, thời gian tắt dần của quá trình giảm ứng suất và chuyển vị của tấm BTCT khi được gia cường bằng lớp FRP nhỏ hơn đáng kể so với tấm khi không được gia cường. Do đó, có thể nhận thấy, lớp FRP có tác dụng phân tán năng lượng hệ kết cấu tiếp nhận.

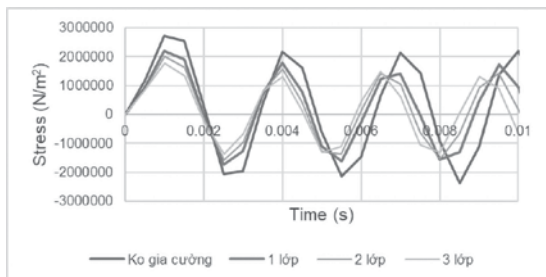
So sánh ứng xử (chuyển vị và ứng suất) của điểm khảo sát trong trường hợp tấm bê tông cốt thép khi không có lớp gia cường và có lớp gia cường được thể hiện trong bảng 4:

Bảng 4. Chuyển vị và ứng suất điểm N12 khi thay đổi chiều dày tấm

Trường hợp		Chuyển vị (*10 ⁻⁴ m)	Ứng suất (*10 ⁶ N/m ²)
Tấm BTCT Không gia cường		3,241	2,703
Gia cường 1 lớp lưới	Giá trị	2,723	2,198
	Hệ số tăng cường	1,188	1,234
Gia cường 2 lớp lưới	Giá trị	2,512	1,998
	Hệ số tăng cường	1,291	1,357
Gia cường 3 lớp lưới	Giá trị	2,308	1,777
	Hệ số tăng cường	1,405	1,526



Hình 14. Chuyển vị theo thời gian tại điểm chính giữa tấm khi thay đổi số lớp lưới dệt



Hình 15. Ứng suất theo thời gian tại điểm chính giữa tấm khi thay đổi số lớp lưới dệt

Từ các kết quả tính chuyển vị và ứng suất của tấm bê tông cho các trường hợp khi đổi chiều dày tấm khi không có gia cường và có gia cường thêm bằng FRP, ta nhận thấy:

- Giá trị chuyển vị và ứng suất trường hợp khi không có gia cường lớn hơn so với khi được gia cường.
- Giá trị chuyển vị và ứng suất giảm dần khi tăng dần số lớp lưới, hay hệ số tăng cường tăng dần.
- Khi gia tăng số lớp lưới mức độ giảm dao động theo số lớp lưới tăng lên. Như vậy, việc thay đổi số lớp lưới tăng khả năng chịu lực và giảm dao động cho kết cấu.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày việc tính toán tấm BTCT được gia cường bằng vật liệu cốt sợi dệt. Kết quả thử nghiệm số đã cho thấy việc gia cường FRP trong sàn bê tông cốt thép làm ứng suất và biến dạng trong bê tông và cốt thép đều giảm, ứng suất trong tấm FRP tăng lên theo tải trọng. Đồng thời, cũng nhận thấy rằng thời điểm xuất hiện vết nứt trong bê tông được gia cường là muộn hơn so với trường hợp không gia cường. Điều này hoàn toàn phù hợp với nguyên lý làm việc và các nghiên cứu đã thực hiện trước

đầy rằng việc gia cường tấm FRP làm tăng khả năng chịu kéo của bê tông, cốt thép trong sàn, hạn chế xuất hiện vết nứt và sự mở rộng vết nứt trong bê tông. Như vậy, có thể kết luận rằng vật liệu FRP gia cường cho tấm BTCT có thể tăng thêm đáng kể độ bền so với tấm BTCT thông thường.

Nguyễn Hải (XDBT)

Tài liệu tham khảo

- [1]. Anders Carolin, Doctor thesis, Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements, Sweden 2003.
- [2]. Burgoyne, C. J., Should Fiber Reinforced Plastic be Bonded to Concrete? Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures, A. Nanni and C. W. Dolan, eds., SP-138, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1993, pp. 367-380.
- [3]. H. Fukuyama, Y. Matsuzaki, N. Hayashida, K. Horie, M. Iso, N. Yoshida, A Study on Retrofitting of Shear Wall with Continuous Fiber Sheet : (Part3) Shear Strength of Shear Wall, Materials Science, Engineering, 1997.
- [4]. Yeong-Soo Shin and Chadon Lee, Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates at Different Levels of Sustaining Load, Structural Journal, Volume 100, pp. 231-239.
- [5]. A. Ghobarah, M. N. Ghorbel, and S. E. Chidiac, Upgrading Torsional Resistance of Reinforced Concrete Beams Using Fiber-Reinforced Polymer, Journal of Composites for Construction, Volume 6, Issue 4.
- [6]. S.N.Bousias, Thanasis Triantafillou, Fiber-reinforced polymer retrofitting of rectangular reinforced concrete columns with or without corrosion, July 2004 ACI Structural Journal 101(4):512-520.
- [7]. Mehdi Taher Khorramabadi, Chris Burgoyne, Fiber-Reinforced Polymer Bond Test in Presence of Steel and Cracks, November 2011 ACI Structural Journal 108(6).
- [8]. Umit Serdar Camli, Baris Binici, Strength of carbon fiber reinforced polymers bonded to concrete and masonry, July 2007 Construction and Building Materials 21(7):1431-1446.
- [9]. Archanaa Dongre, Fibre reinforced concrete- a case study, Conference: 33rd national Convention of Architectural Engineers and National Seminar on "Architectural Engineering Aspect for sustainable building envelopes" ArchEn-BuildEn-2017, by Institution of Engineers India in Association with Indian Association of structural Engineers.
- [10]. S.M. Ashik Al Aziz, Rupak Mutsuddy, Effect of jute fiber on the mechanical properties of concrete, Journal of Built Environment, Technology and Engineering, Vol. 5 (Sept).
- [11]. J. R. Duflou, Y. Deng, K. Van Acker, and W. Dewulf, "Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study," Mrs Bull., vol. 37, no. 4, pp. 374-382, 2012.
- [12]. Nguyễn Minh Hải, Đỗ Việt Hải, Phan Hoàng Nam, Phạm Văn Ngọc, Huỳnh Phương Nam, và Phạm Tiến Cường. "Nghiên cứu tổng Quan về các loại Thanh FRP Và tính ứng dụng của một số công thức đánh Giá cường độ Liên kết giữa Thanh FRP – Bê tông". Tạp Chí Khoa học Và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, vol 21, số p.h 7, Tháng Bảy 2023, tr 27-36.
- [13]. Ninh, N. T., Linh, T. H., Hải, Đỗ V., Tài, K. V., & Hiếu, N. T. (2021). Nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc chịu uốn của dầm bê tông cốt hỗn hợp thép và polyme cốt sợi thủy tinh (GFRP) bị ăn mòn bởi ion clorua. Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN, 15(3V), 16-26.
- [14]. Abaqus manual (2021).
- [15]. Simulia (2009), ABAQUS Analysis User's Manual 6.10.