

# NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG GIA CƯỜNG BẰNG TẤM SỢI CFRP TRÊN DẦM THÉP CHỮ I CÓ LỖ Ở BẢN BỤNG

## A Study on the Strengthening Effect of CFRP Sheets on Steel I-Beams with Web Openings

Phạm Nguyễn Tuấn Thanh<sup>1</sup> và Trà Thanh Phương<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Học viên cao học Trường Đại học Kinh tế Công nghiệp Long An, Tây Ninh, Việt Nam  
pntthanhxd997@gmail.com

<sup>2</sup>Trường Đại học Kinh tế Công nghiệp Long An, Tây Ninh, Việt Nam  
tstrathanhphuong@gmail.com

**Tóm tắt** — Trong các công trình dân dụng và công nghiệp hiện đại, việc khoét lỗ ở bản bụng dầm thép ngày càng phổ biến nhằm tạo không gian lắp đặt hệ thống kỹ thuật (điện, nước, điều hòa...) và giảm khối lượng vật liệu. Tuy nhiên, các lỗ khoét này làm suy giảm đáng kể khả năng chịu lực của dầm, đặc biệt tại các vùng chịu cắt, dẫn đến ứng suất tập trung cao và nguy cơ phá hoại sớm. Do đó, việc nghiên cứu các giải pháp gia cường hiệu quả là cần thiết để đảm bảo an toàn và hiệu suất kết cấu. Bài báo trình bày phân tích phi tuyến bằng phương pháp phần tử hữu hạn đối với dầm thép chữ I có lỗ khoét trên bản bụng, được gia cường bằng tấm CFRP. Kết quả cho thấy lỗ khoét làm giảm đáng kể khả năng chịu lực, đặc biệt trong trường hợp lỗ vuông và chữ nhật. Việc gia cường bằng CFRP giúp cải thiện rõ rệt khả năng chịu tải và độ cứng của dầm, đặc biệt hiệu quả trong vùng chịu cắt và khi tăng số lớp vật liệu gia cường.

**Từ khóa** — Dầm thép chữ I, ảnh hưởng của lỗ khoét, tấm gia cường CFRP, phân tích phi tuyến.

**Abstract** — In modern civil and industrial structures, creating web openings in steel I-beams has become increasingly common to accommodate technical systems (e.g., electrical, HVAC, piping) and reduce structural weight. However, these openings significantly weaken the beam's load-carrying capacity, especially in shear zones, leading to stress concentrations and early failure. Therefore, finding effective strengthening solutions is essential to ensure structural safety and performance. This paper presents a nonlinear finite element analysis of steel I-beams with web openings strengthened using CFRP plates. The results indicate that openings considerably reduce strength, particularly with square and rectangular shapes. Strengthening with CFRP significantly enhances the beam's stiffness and capacity, especially in shear-dominated regions and when multiple CFRP layers are applied.

**Keywords** — Steel I-beam, web openings, CFRP strengthening sheets, nonlinear analysis.

## 1. Giới thiệu

Trong kết cấu xây dựng hiện đại, dầm thép chữ I được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng chịu tải lớn, tiết diện tối ưu và trọng lượng nhẹ. Tuy nhiên, để tiết kiệm không gian và tạo đường đi cho hệ thống kỹ thuật (ống, dây cáp...), việc khoét lỗ trên bản bụng dầm ngày càng phổ biến. Dù giải pháp này có lợi về mặt công năng, nó cũng gây suy giảm đáng kể khả năng chịu cắt và mô-men. Một trong những giải pháp gia cường hiệu quả là sử dụng vật liệu composite sợi như CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). CFRP có trọng lượng nhẹ, cường độ kéo cao, khả năng thi công dễ dàng và chống ăn mòn. Khi được dán quanh vùng lỗ, CFRP giúp phân bố lại ứng suất, tăng độ cứng và khả năng chịu lực tổng thể.

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu trên thế giới đã tập trung vào việc phân tích ảnh

hưởng của lỗ khoét và khả năng gia cường bằng vật liệu CFRP [1, 2]. Một số nghiên cứu đã bước đầu triển khai mô phỏng dầm thép có lỗ gia cường CFRP [3]. Ngoài ra, hầu hết các công trình chưa xét đến ứng xử phi tuyến hình học và vật liệu của dầm, vốn rất quan trọng trong giai đoạn làm việc gần phá hoại. Nghiên cứu này sử dụng ANSYS để đánh giá ảnh hưởng của hình dạng lỗ khoét và số lớp CFRP đến khả năng làm việc của dầm. Qua đó, bài báo đóng góp một hướng dẫn thiết kế hợp lý khi sử dụng dầm thép có lỗ trong thực tế.

## 2. Cơ sở lý thuyết

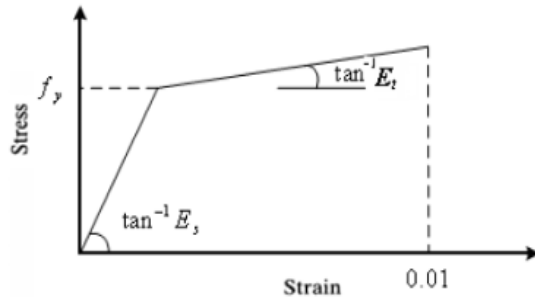
### 2.1. Mô hình vật liệu song tuyến tính

Nghiên cứu sử dụng mô hình vật liệu của thép và CFRP được xây dựng dựa trên các đặc tính cơ học đã được xác lập qua thực nghiệm. Thép được mô phỏng bằng mô hình ứng xử đàn

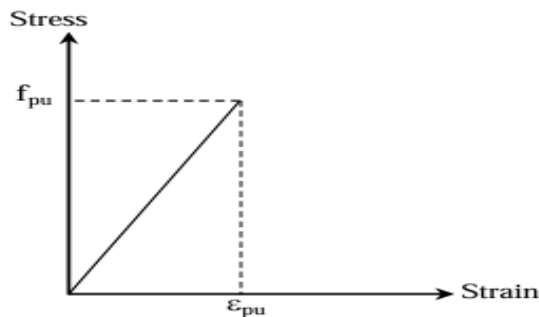
<https://doi.org/10.63783/dla.2026.012>

Ngày nộp bài: 18/07/2025; Ngày nhận bản chỉnh sửa: 25/02/2026; Ngày duyệt đăng: 25/03/2026

hồi dẻo song tuyến tính, thể hiện ở Hình 1, phản ánh hai giai đoạn chính: Đàn hồi tuyến tính theo định luật Hooke đến giới hạn chảy  $f_y$ , và giai đoạn dẻo tăng cứng với độ dốc nhỏ kéo dài đến ứng suất cực hạn  $f_u$ . Mô hình này giúp đơn giản hóa tính toán trong phân tích phi tuyến mà vẫn đảm bảo mô tả chính xác sự chuyển tiếp từ đàn hồi sang dẻo – yếu tố quan trọng trong dự đoán phá hoại kết cấu thép.



Hình 1. Quan hệ ứng suất – biến dạng của thép



Hình 2. Mô hình hóa quan hệ ứng suất-biến dạng của tấm CFRP

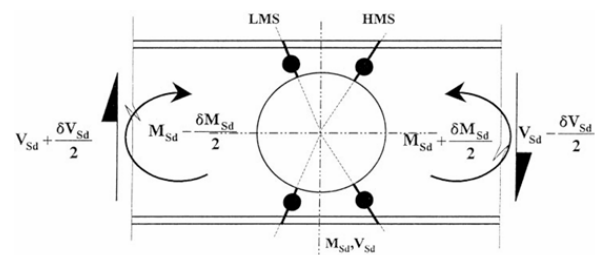
Ngược lại, vật liệu CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer – vật liệu polyme cốt sợi carbon) được giả định lý tưởng hóa là đàn hồi tuyến tính hoàn toàn cho đến khi đứt gãy, không có giai đoạn biến dạng dẻo, minh họa ở Hình 2. Vật liệu CFRP – một loại vật liệu composite có cốt sợi carbon và nền nhựa polymer – được mô phỏng theo mô hình tuyến tính giòn, tức là có quan hệ ứng suất – biến dạng tuyến tính đến khi đạt đến giới hạn phá hủy, sau đó mất hoàn toàn khả năng chịu lực mà không có giai đoạn biến dạng dẻo. Đây là đặc trưng cơ bản của vật liệu CFRP: Có cường độ kéo rất cao nhưng ứng xử giòn, không biến dạng trước khi gãy, khác biệt hoàn toàn với vật liệu kim loại như thép. Việc mô hình hóa CFRP bằng mối quan hệ đàn hồi tuyến tính lý tưởng là hợp lý trong phân tích phần tử hữu hạn, đồng thời giúp tránh hiện tượng phá hủy đột ngột do vượt quá giới hạn đàn hồi trong thiết kế kết cấu thực tế. Cả hai mô hình vật liệu trên được lựa chọn để cân bằng giữa độ chính xác và khả năng tính toán, đảm bảo phản ánh đúng đặc tính cơ học chính của từng vật liệu trong phân

tích phi tuyến toàn phần của dầm thép được gia cường bằng CFRP.

## 2.2. Cơ chế Vierendeel xung quanh lỗ khoét trên bản bụng

Đánh giá khả năng chịu lực của dầm thép có lỗ khoét trên bản bụng là một bài toán phức tạp do chịu ảnh hưởng đồng thời của ứng xử chịu cắt, mô men uốn và nội lực dọc phân bố không đều. Trong khi đối với dầm đặc (không khoét lỗ), các công thức thiết kế tiêu chuẩn có thể áp dụng tương đối đơn giản, thì với dầm có lỗ khoét, đặc biệt là ở vùng bản bụng chịu cắt mạnh, ứng xử cấu kiện trở nên phi tuyến và khó dự đoán hơn.

Một trong những hiện tượng cơ học đặc trưng xuất hiện xung quanh lỗ khoét là cơ chế Vierendeel – hiện tượng xuất hiện khi phần vật liệu xung quanh lỗ (thường là tiết diện chữ T ở phía trên và dưới lỗ) chịu mô men lớn và bắt đầu hình thành các bản lề dẻo. Khi chịu tải trọng tăng dần, ứng suất uốn phân bố qua các tiết diện chữ T dẫn đến hình thành bốn bản lề dẻo tại bốn cạnh của lỗ (trên – dưới, trái – phải), như minh họa trong Hình 3. Cơ chế này cho phép phân kết cấu xung quanh lỗ phân phối lại nội lực và tạm thời giữ được khả năng chịu tải trước khi mất ổn định hoặc phá hoại xảy ra.



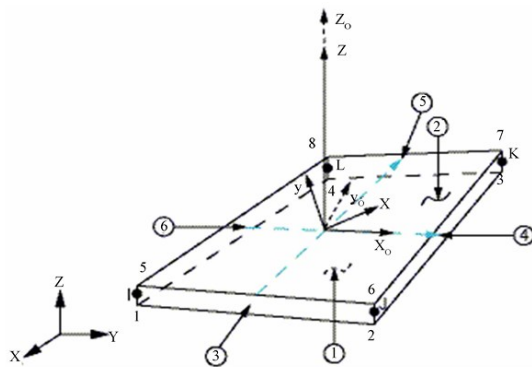
Hình 3. Cơ chế Vierendeel xung quanh lỗ khoét tròn trên bản bụng

Khác với phân tích đàn hồi tuyến tính, phương pháp thiết kế dẻo (plastic design) hoặc phân tích phi tuyến toàn phần cần được sử dụng để mô phỏng chính xác sự hình thành và phát triển của các bản lề dẻo quanh lỗ. Đây là cách tiếp cận hiệu quả để đánh giá giới hạn chịu uốn thực tế của kết cấu trong vùng bị khoét, đồng thời giúp tận dụng toàn bộ khả năng làm việc của vật liệu. Song song với giới hạn chịu lực, độ võng (deflection) của dầm cũng là yếu tố quan trọng trong thiết kế. Việc khoét lỗ làm giảm độ cứng tổng thể, từ đó gia tăng độ võng đáng kể khi chịu tải trọng. Trong các công trình yêu cầu kiểm soát chuyển vị nghiêm ngặt như cầu, sàn công nghiệp hoặc kết cấu cao tầng, độ võng vượt giới hạn có thể ảnh hưởng đến an toàn và tính sử dụng. Do đó, khi thiết kế dầm có lỗ khoét, cần đồng thời kiểm soát cả khả năng chịu lực và độ cứng, thông qua

các giải pháp như: Sử dụng vật liệu gia cường (CFRP, thép tấm), tối ưu hóa khoảng cách và kích thước lỗ, hoặc cải tiến cấu hình tiết diện.

### 2.3. Lý thuyết phần tử Shell

Phần tử vỏ (Shell) được sử dụng trong mô hình, như minh họa trong Hình 4, với các chi tiết tham khảo từ tài liệu hướng dẫn của ANSYS [4]. Shell là phần tử có bốn nút (Q4), mỗi nút gồm 3 bậc tự do tịnh tiến theo ba trục  $x$ ,  $y$ ,  $z$  và 2 bậc tự do góc xoay theo trục  $x$ ,  $y$ . Loại phần tử này có khả năng mô phỏng các hiện tượng phi tuyến như biến dạng dẻo, làm cứng ứng suất, biến dạng lớn và chuyển vị lớn. Phần tử Shell181 của Ansys được điều chỉnh bởi lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất (FSDT), được kết hợp giữa phần tử vật rắn 2D (2D-solid elements) và phần tử tấm chịu uốn (plate bending element). Các phần tử vỏ có khả năng chịu được các điều kiện tải phức tạp từ nhiều hướng và thể hiện các hành vi kết cấu kết hợp, bao gồm cả biến dạng trong mặt phẳng và phản ứng uốn/xoắn. Phần tử Shell sử dụng trong nghiên cứu là phần tử nội suy tuyến tính với dạng chung cho phép nội suy dịch chuyển liên quan đến tọa độ tự nhiên  $\zeta$  và  $\eta$  như sau:



Hình 4. Hình học của phần tử vỏ SHELL181

$$\begin{aligned}
 u &= \sum_{i=1}^4 N_i(\zeta, \eta) u_i; \\
 v &= \sum_{i=1}^4 N_i(\zeta, \eta) v_i; \\
 w &= \sum_{i=1}^4 N_i(\zeta, \eta) w_i; \\
 \theta_x &= \sum_{i=1}^4 N_i(\zeta, \eta) \theta_{xi}; \\
 \theta_y &= \sum_{i=1}^4 N_i(\zeta, \eta) \theta_{yi}
 \end{aligned} \quad (1)$$

cho các nút  $i = 1..4$ ,

$$N_i(\zeta, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \zeta_i \zeta)(1 + \eta_i \eta) \quad (2)$$

Trong quá trình giải bài toán phi tuyến, thuật toán Newton-Raphson được sử dụng để tìm nghiệm hội tụ. Tiêu chí hội tụ dựa trên độ dịch chuyển, đảm bảo rằng mô hình đạt đến trạng thái cân bằng trong từng bước tính toán. Việc sử dụng mô hình phi tuyến trong ANSYS giúp phân tích sâu hơn về ứng xử của dầm thép khi làm việc trong vùng phi tuyến, từ đó đánh giá được khả năng chịu lực của kết cấu trong thực tế.

## 3. Kết quả số

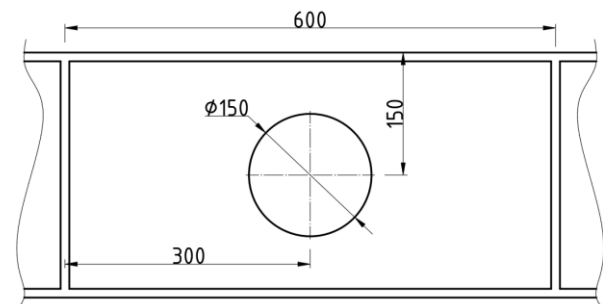
### 3.1. Mô hình hình học, điều kiện biên và kích thước lưới chia lưới

Trong nghiên cứu này, tính phi tuyến của vật liệu được mô phỏng bằng mô hình đàn hồi dẻo song tuyến (Bilinear elastic-plastic). Theo đó, mô hình sử dụng vật liệu có mô đun đàn hồi là 205GPa và hệ số Poisson là 0.3 và giả định sự biến cứng (strain hardening) với tỷ lệ 1%. Đối với bài toán có tấm gia cường (CFRP), cần thiết lập thêm vật liệu CFRP cho mô hình tấm gia cường với mô đun đàn hồi là 131.000 MPa, hệ số Poisson là 0.3 và độ bền kéo là 2.4 GPa.

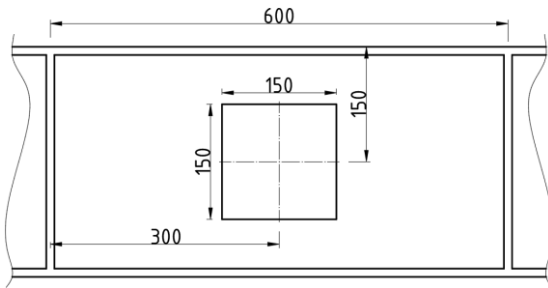
Trong nghiên cứu tham số này, tiết diện tiêu chuẩn IPE300 [5] đã được sử dụng với tổng chiều dài là 2200 mm. Hình học của dầm, điều kiện gờ tựa, tải trọng tác dụng và các đặc tính cơ học của vật liệu đều đã được minh họa trong Hình 5 và liệt kê chi tiết trong Bảng 1.

Bảng 1. Đặc tính vật liệu của dầm thép ipe-300 [5]

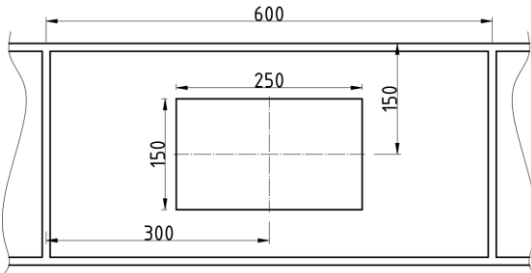
Thành phần	Bề dày (mm)	Giới hạn chảy $f_y$ (MPa)	Giới hạn kéo đứt $f_u$ (MPa)
Cánh dầm (Flange)	10.7	253.2	407.8
Bản bụng (Web)	7.1	253.2	407.8



Hình 6. Kích thước của dầm thép IPE-300 BCOC

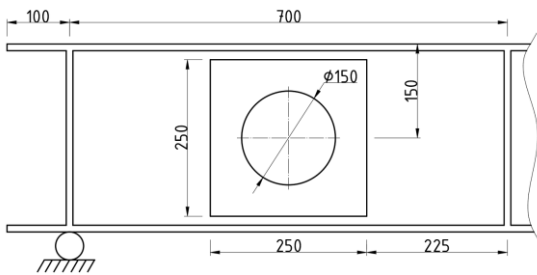


Hình 7. Kích thước của dầm thép IPE-300 BSOC

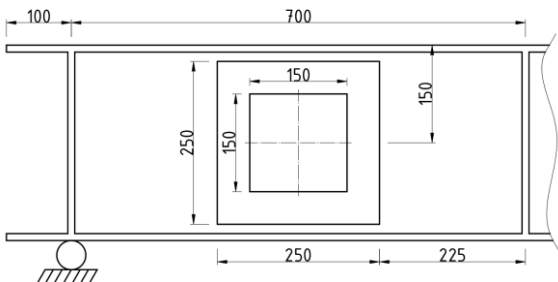


Hình 8. Kích thước của dầm thép IPE-300 BROC

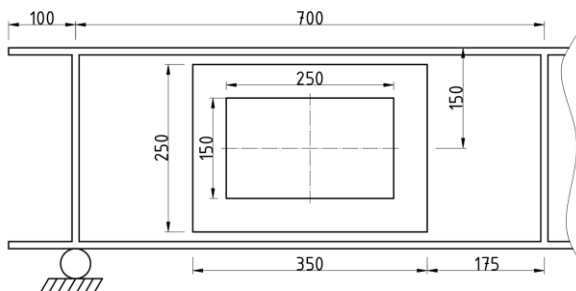
Trường hợp 2, các lỗ được khoét tại vị trí gần khớp gối có các kích thước hình học được thể hiện ở Hình 9-11.



Hình 9. Kích thước dầm thép IPE-300 gia cường CFRP khoét lỗ tròn gần gối tựa



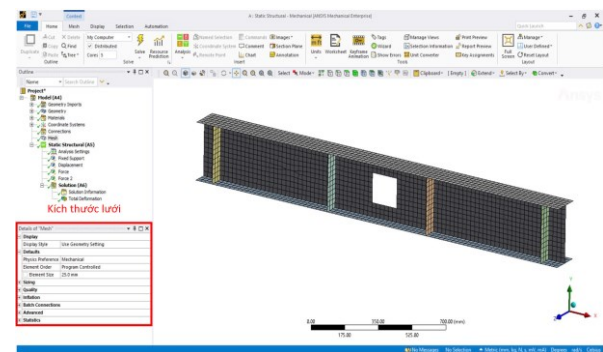
Hình 10. Kích thước dầm thép Ipe-300 gia cường Cfrp khoét lỗ vuông gần gối tựa



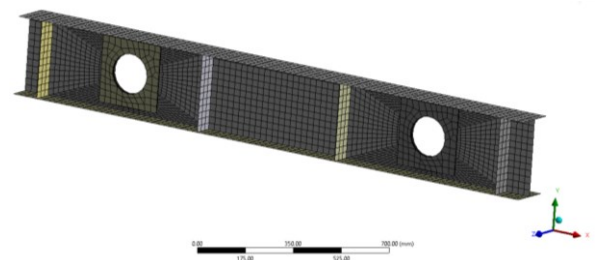
Hình 11. Kích thước dầm thép Ipe-300 gia cường CFRP khoét lỗ hình chữ nhật gần gối tựa

Nghiên cứu thực hiện hai trường hợp khảo sát khoét lỗ là 1 - Khoét lỗ tại nhịp giữa của dầm (BCOC, BROC, BSOC) và 2 - Khoét lỗ tại vị trí gần khớp gối (xem Bảng 2). Các hình dạng lỗ bao gồm: Hình tròn, hình vuông, và hình chữ nhật. Trường hợp 1, khoét lỗ tại giữa nhịp các kích thước được thể hiện ở Hình 6-8.

Về điều kiện biên, dầm thép với hai gối tựa đặt ở hai đầu. Gối bên trái là gối ngàm cố định, có khả năng ngăn cản chuyển vị tịnh tiến theo 3 phương không gian  $x$ ,  $y$ ,  $z$  và các phép quay tự do. Trong khi đó, khớp gối bên phải là khớp gối tựa di động, chỉ ngăn chặn chuyển vị theo phương đứng  $y$ , phương ngang  $z$ , nhưng cho phép dịch chuyển theo phương ngang  $x$  và các góc quay. Dầm chịu tác dụng của hai tải trọng tập trung  $P/2$ , được đặt đối xứng tại hai đường cách gối tựa mỗi bên 700 mm, tạo ra vùng giữa có chiều dài 600 mm. Lực  $P$  tác dụng được khảo sát từ 40 kN đến 560 kN.



Hình 12. Mô hình lưới dầm thép chứa lỗ hình vuông, BSOC



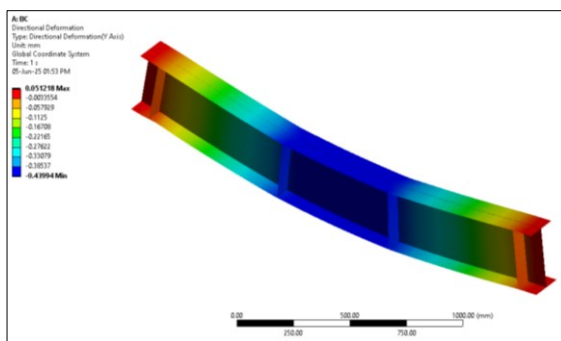
Hình 13. Mô hình lưới của dầm khoét lỗ gần khớp gối, B2COS-3S

Về điều kiện biên tiếp xúc của các tấm gia cường CFRP, sử dụng điều kiện Connection Bonded với các mặt Target và mặt Contact. Lần lượt tạo điều kiện tiếp xúc cho các mặt CFRP với bản bụng và các mặt CFRP phía sau với mặt CFRP liền kề trước đó. Cụ thể, mặt Contact là mặt có xu hướng cố định (bị tiếp xúc) và mặt Target là mặt mục tiêu muốn tạo tiếp xúc với các mặt khác (mặt contact).

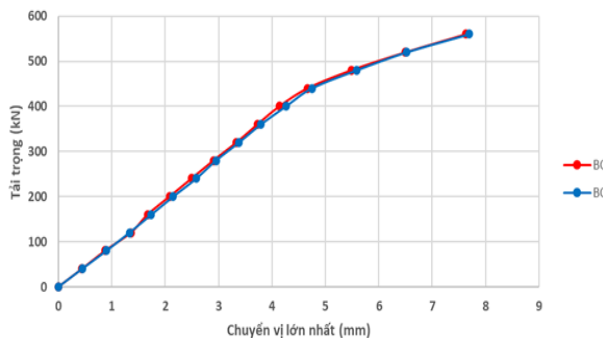
Một trong những bước quan trọng trong quá trình giải bài toán bằng phương pháp phần tử hữu

hạn là lựa chọn kích thước phần tử phù hợp. Điều này được thực hiện bằng cách giảm dần kích thước phần tử cho đến khi sự thay đổi của kết quả trở nên không đáng kể. Quá trình này được gọi là nghiên cứu hội tụ (convergence study) nhằm xác định mật độ lưới tối ưu. Trong nghiên cứu này, quá trình hội tụ lưới đã được thực hiện để xác định kích thước phần tử hợp lý. Kết quả cho thấy khi kích thước phần tử nhỏ hơn  $25 \times 25$  mm, ảnh hưởng của nó lên độ võng tại điểm giữa nhịp dầm là không đáng kể. Do đó, mật độ lưới với kích thước  $25 \times 25$  mm được đánh giá là phù hợp và được sử dụng trong nghiên cứu này. Mô hình chia lưới được minh họa ở Hình 12 và Hình 13.

### 3.2. Dầm thép chữ I không khoét lỗ - BC



Hình 14. Trường độ võng của dầm thép chưa khoét lỗ

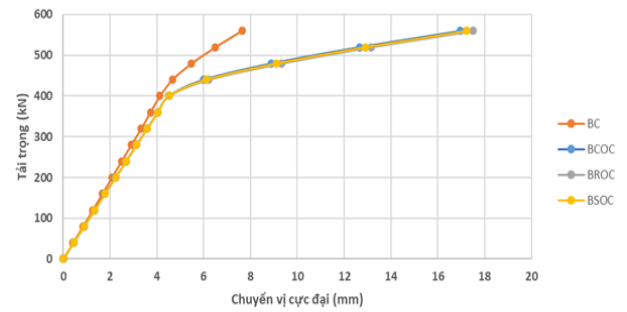


Hình 15. Quan hệ giữa tải trọng và độ võng lớn nhất của dầm chưa khoét lỗ

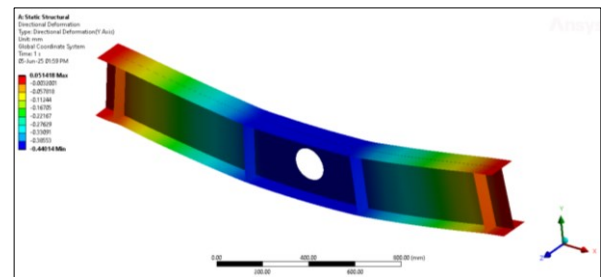
Mô hình dầm chưa khoét lỗ được đưa ra và mô phỏng theo điều kiện biên đã chỉ ra trước đó. Kết quả phân bố chuyển vị của dầm thép dưới tác dụng của tải trọng 40 kN được thể hiện ở Hình 14. Ở đây, chúng có thể thấy rằng chuyển vị lớn nhất của mô hình xuất hiện tại vị trí chính giữa dầm. Để xác minh tính chính xác của kết quả, một mối quan hệ giữa tải trọng tác dụng và chuyển vị lớn nhất của dầm được xây dựng trong Hình 15 và được so sánh với tài liệu tham khảo [6]. Kết quả cho sai số khoảng 4.38%. Sai số tương đối thấp nên phương pháp giải sẽ tiếp tục được thực hiện ở các phần sau.

### 3.3. Dầm thép chữ I khoét các lỗ tại vị trí giữa nhịp trên bản bụng

Trong nghiên cứu này, ba hình dạng lỗ khoét khác nhau trên bản bụng dầm thép đã được xem xét, bao gồm lỗ tròn, lỗ vuông và lỗ chữ nhật.



Hình 16. Quan hệ giữa tải trọng tác dụng và chuyển vị lớn nhất tại giữa dầm của các dầm chứa lỗ



Hình 17. Trường độ võng của dầm thép chứa lỗ hình tròn

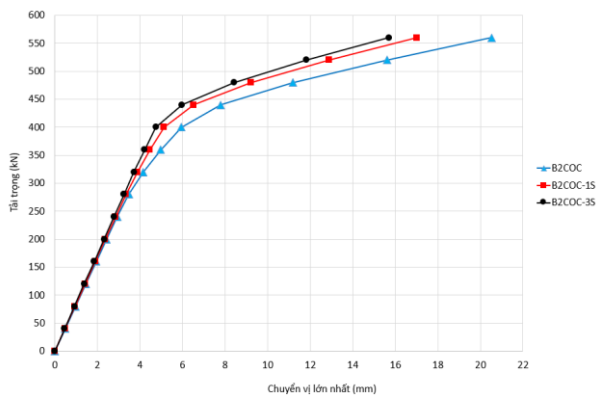
Hình 16 và Hình 17 thể hiện ảnh hưởng của hình dạng lỗ khoét khi được bố trí tại giữa nhịp (mid-span) của dầm. Kết quả mô phỏng chuyển vị cho thấy rằng, khi lỗ khoét được đặt tại vị trí trung tâm bản bụng dầm, chuyển vị tổng tại giữa nhịp tăng lên rõ rệt so với dầm không có lỗ. Điều này, cho thấy độ cứng tổng thể của dầm đã bị suy giảm do sự xuất hiện của lỗ mở. Đặc biệt, khi so sánh giữa các hình dạng lỗ khoét khác nhau, ta nhận thấy mức độ suy giảm độ cứng (được phản ánh qua sự gia tăng chuyển vị tại giữa nhịp của dầm) có xu hướng tăng dần từ lỗ tròn đến lỗ vuông, và lớn nhất là ở lỗ hình chữ nhật khi dầm bắt đầu làm việc trong miền phi tuyến (vượt qua miền đàn hồi). Tại mức tải trọng cuối cùng là 580kN, độ võng tại giữa nhịp của dầm có lỗ hình chữ nhật lớn hơn 1.22% so với dầm có lỗ hình vuông và lớn hơn 2.95% so với dầm có lỗ hình tròn. Sự khác biệt này cho thấy rằng hình dạng lỗ khoét ảnh hưởng đáng kể đến độ cứng tổng thể của dầm trong miền tải trọng cao, và từ đó tác động gián tiếp đến khả năng chịu tải tới hạn. Điều này nhấn mạnh vai trò quan trọng của việc lựa chọn hình dạng lỗ khoét phù hợp trong thiết kế, nhằm hạn chế sự suy giảm độ cứng và đảm bảo hiệu quả chịu lực của kết cấu dầm thép. Dựa trên cơ sở đó, có thể suy luận rằng khả năng chịu tải tới hạn của dầm giảm dần theo thứ tự: dầm có lỗ tròn, dầm có lỗ vuông và dầm có lỗ hình chữ nhật. Nhận định này phù hợp với kết quả đã được công bố trong nghiên cứu của Mohamed F.E. và cộng

sự [7]. Nguyên nhân của sự suy giảm khả năng chịu tải này không chỉ đến từ sự thay đổi hình học, mà còn do ảnh hưởng của hình dạng lỗ khoét đến phân bố độ cứng dọc theo chiều dài dầm. Lỗ hình chữ nhật và lỗ vuông tạo ra những vùng suy yếu lớn hơn so với lỗ tròn, dẫn đến chuyển vị lớn hơn dưới cùng một điều kiện tải. Do đó, có thể khẳng định rằng hình dạng và vị trí của lỗ khoét là các yếu tố then chốt trong thiết kế dầm thép, đặc biệt trong các ứng dụng chịu tải trọng lớn, khi độ cứng và ổn định tổng thể của kết cấu là yếu tố quyết định.

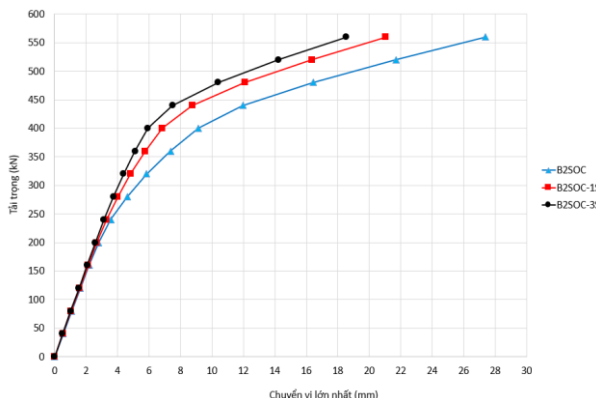
### 3.4. Dầm thép chữ I khoét các lỗ tại vị trí gần khớp gối trên bản bụng và được gia cường bằng các lớp CFRP

Trong nghiên cứu này, số lớp CFRP khác nhau đã được sử dụng để gia cường xung quanh lỗ khoét trên bản bụng của dầm thép IPE. Cụ thể, hai trường hợp được xem xét là một lớp CFRP và ba lớp CFRP cho 3 loại lỗ lần lượt là lỗ hình tròn, lỗ hình vuông và lỗ hình chữ nhật.

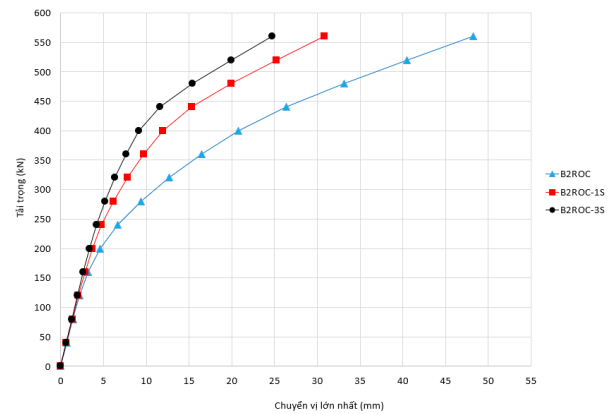
Từ kết quả thể hiện trong các đồ thị Hình 18 – 20, có thể thấy được xu hướng chuyển vị theo phương thẳng đứng tăng dần theo số lượng lỗ khoét trong vùng bản bụng. Nói cách khác, khi số lượng lỗ khoét gia tăng, độ võng của dầm cũng tăng theo.



Hình 18. Đường cong tải trọng tác dụng và độ võng lớn nhất của dầm chứa lỗ tròn và tấm gia cường CFRP

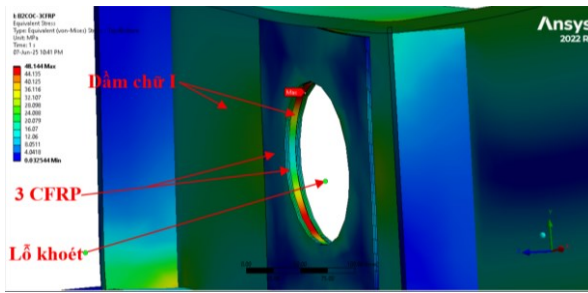


Hình 19. Đường cong tải trọng tác dụng và độ võng lớn nhất của dầm chứa lỗ tròn và tấm gia cường CFRP

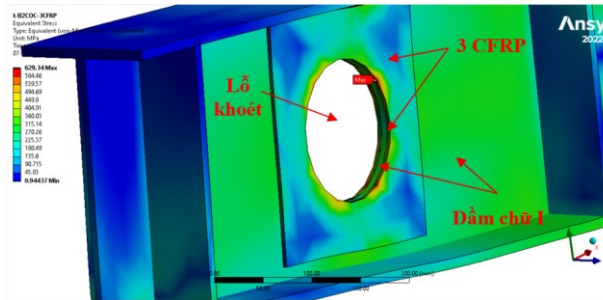


Hình 20. Đường cong tải trọng tác dụng và độ võng lớn nhất của dầm chứa lỗ hình chữ nhật và tấm gia cường CFRP

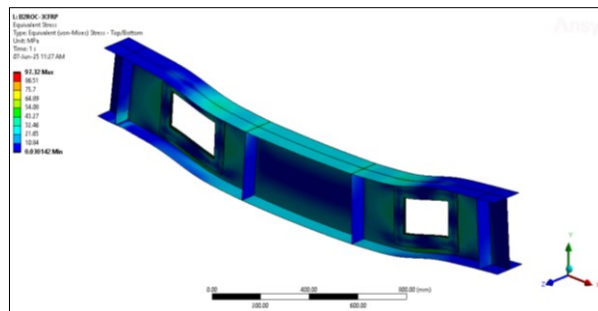
Kết quả này phù hợp với lý thuyết đàn hồi, việc tạo lỗ trên bản bụng làm giảm số lượng vật liệu chịu lực (ở đây là vùng chịu cắt – Shear zone), kéo theo sự suy giảm độ cứng tổng thể của dầm, từ đó dẫn đến chuyển vị lớn hơn dưới cùng một điều kiện tải trọng. Một lần nữa, có thể ghi nhận rằng dầm được khoét lỗ hình tròn tại vùng chịu cắt cũng cho độ võng nhỏ nhất, trong khi dầm có lỗ khoét hình chữ nhật ghi nhận độ võng lớn nhất. Điều này tiếp tục khẳng định ảnh hưởng rõ rệt của hình dạng lỗ khoét đến độ cứng tổng thể của dầm. Cụ thể, tại mức tải trọng 560 kN và trong điều kiện gia cường bằng ba lớp CFRP, độ võng cực đại của dầm có lỗ hình tròn ghi nhận là 15.71 mm, trong khi giá trị này tăng lên đến 24.72 mm đối với dầm có lỗ hình vuông. Kết quả này cho thấy rằng, ngay cả khi đã áp dụng giải pháp gia cường, hình dạng lỗ khoét vẫn là yếu tố quyết định đáng kể đến độ võng và hiệu quả phân bố nội lực trong kết cấu. Khi các tấm CFRP sử dụng để gia cường tại vùng xung quanh lỗ khoét, kết quả mô phỏng cho thấy sự cải thiện rõ rệt về độ cứng và khả năng chịu tải của dầm. Các đồ thị minh họa rõ xu hướng giảm chuyển vị tổng thể khi áp dụng các lớp gia cường CFRP. Ảnh hưởng tích cực của CFRP ngày càng rõ hơn khi tăng số lượng lớp gia cường. Điều này cho thấy vai trò của CFRP trong việc phục hồi độ cứng tại các vùng suy yếu, đồng thời làm giảm mức độ tập trung ứng suất. Tuy nhiên mức độ hiệu quả của việc tăng các lớp CFRP không tỉ lệ thuận với số lượng lớp CFRP. Cụ thể tại mức tải trọng cuối cùng, trong trường hợp dầm khoét lỗ tròn gia cố bằng CFRP 3 lớp độ võng giảm khoảng 23% so với khi chưa gia cường CFRP. Mức độ giảm của độ võng dầm khi tăng từ 0 – 1 lớp CFRP và từ 1 – 3 lớp CFRP lần lượt là khoảng 17% và 7.7%. Xu hướng trên vẫn phù hợp với các trường hợp lỗ khoét khác của dầm được gia cố bằng lớp CFRP trong Hình 19 và Hình 20.



Hình 21. Trường phân bố ứng suất quanh lỗ 3CFRP của mô hình B2COS tại 40kn



Hình 22. Trường phân bố ứng suất quanh lỗ 3CFRP của mô hình B2COS tại 560kn



Hình 23. Trường phân bố ứng suất của mô hình B2ROS-3CFRP tại 40kn

Khi ở tải trọng  $P$  nhỏ, ứng suất tương đương von-mises tập trung chủ yếu xuất hiện tại vùng mép lỗ khoét (minh họa ở hình 21), nơi có sự gián đoạn hình học và độ cứng giảm cục bộ. Tuy nhiên, khi tiếp tục gia tăng tải trọng và tiến tới ngưỡng phi tuyến, vùng ứng suất tập trung có xu hướng dịch chuyển và lan rộng về phía biên lỗ khoét của lớp gia cường CFRP, được minh họa ở Hình 22. Hiện tượng này, có thể được lý giải dựa trên sự khác biệt về đặc trưng cơ học giữa hai vật liệu: dầm thép và CFRP. Mặc dù CFRP có cường độ kéo rất cao, nhưng mô đun đàn hồi của nó lại nhỏ hơn đáng kể so với thép. Trong giai đoạn đầu (tải nhỏ), thép chịu phần lớn nội lực do độ cứng cao hơn. Tuy nhiên, khi tải trọng tăng lên, đặc biệt là khi vùng thép xung quanh lỗ bắt đầu rơi vào trạng thái chảy dẻo cục bộ hoặc phân bố ứng suất bị mất cân bằng, lớp CFRP bắt đầu đóng vai trò tích cực hơn trong việc chia sẻ nội lực. Khi đó, ứng suất chuyển dịch về vùng tiếp giáp giữa CFRP và dầm thép. Do đó, sự chuyển dịch vùng ứng suất tập trung về phía lớp gia cường CFRP ở

tải trọng cao là một hệ quả của quá trình tái phân phối nội lực giữa hai vật liệu có mô đun khác nhau.

### 3.5. Đánh giá moment kháng uốn của dầm

Theo lý thuyết sức bền vật liệu, moment kháng uốn ( $W$ ) là đại lượng phản ánh khả năng của tiết diện dầm chống lại tác động của moment uốn. Moment kháng uốn phụ thuộc vào hình học tiết diện. Trong trường hợp dầm thép hình chữ I chịu uốn, moment kháng uốn thường được xác định theo công thức:

$$W_x = \frac{I_x}{y_{\max}} \quad (3)$$

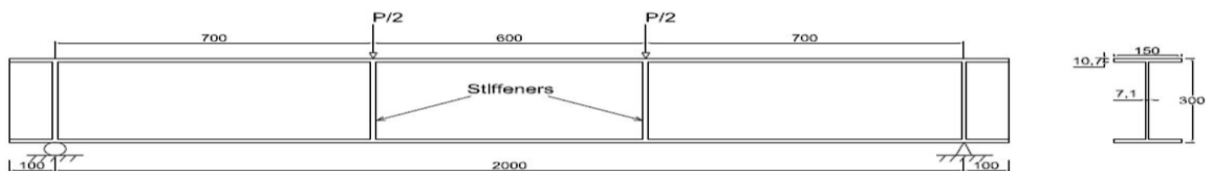
với,  $I_x$  là moment quán tính hình học của mặt cắt ngang và  $y_{\max}$  là khoảng cách từ trục trung hòa đến mép biên tiết diện chịu uốn xa nhất. Tiết diện của các trường hợp ví dụ lỗ khoét (tròn, vuông, chữ nhật) đều có đường kính hoặc chiều cao lỗ lớn nhất là  $d_0 = 150\text{mm}$ , tại mặt cắt đi qua tâm lỗ, thể hiện ở Hình 25. Do đó, moment kháng uốn trong ba trường hợp đều có cùng giá trị lý thuyết. Tuy nhiên, xét về mặt phân bố tiết diện nguy hiểm dọc theo chiều dài dầm, sự ảnh hưởng của từng hình dạng lỗ khoét đến khả năng kháng uốn không hoàn toàn giống nhau. Trong trường hợp lỗ tròn, tiết diện nguy hiểm chủ yếu chỉ tập trung tại mặt cắt đi qua tâm lỗ do hình tròn có tính đối xứng đều và không tạo ra cạnh sắc – nơi thường gây tập trung ứng suất. Ngược lại, với lỗ vuông, các cạnh thẳng và góc vuông làm xuất hiện thêm nhiều vùng mặt cắt nguy hiểm quanh chu vi lỗ. Đặc biệt, trong trường hợp lỗ chữ nhật nằm theo phương dọc trục dầm, phần vật liệu bị loại bỏ sẽ trải dài, gây suy yếu kéo dài cho bản bụng và tạo ra dải các mặt cắt nguy hiểm liên tục, vừa làm giảm moment kháng uốn  $W_x$ , vừa làm suy yếu khả năng chịu cắt. Theo nghiên cứu [8, 9], sự suy giảm moment kháng uốn không chỉ xuất phát từ việc mất tiết diện về mặt hình học, mà còn do tương tác giữa lực cắt và moment uốn khi lỗ khoét nằm gần vùng chịu cắt lớn. Hiện tượng này dẫn đến sự giảm sút hiệu quả tiết diện kháng uốn. Từ những phân tích trên, có thể kết luận rằng khả năng chịu moment uốn của dầm bị suy giảm theo thứ tự như sau: Lỗ hình tròn < lỗ hình vuông < lỗ hình chữ nhật.

Việc bổ sung các lớp CFRP tại bản cánh góp phần đáng kể việc gia tăng moment kháng uốn tại mặt cắt qua tâm lỗ khoét, thể hiện ở Hình 26. Kết quả tính toán cho thấy, giá trị moment kháng uốn của dầm sau khi khoét lỗ và được gia cường còn lớn hơn cả dầm nguyên không khoét lỗ. Tuy nhiên, điều này không đồng nghĩa với việc

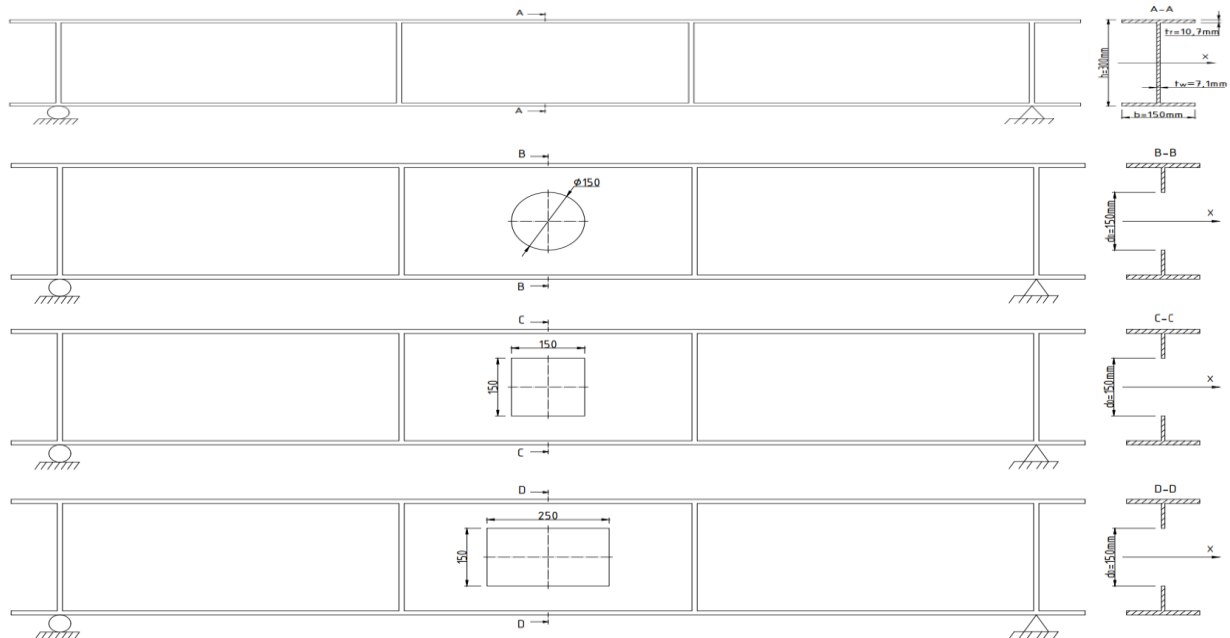
chuyên vị tổng thể của dầm khoét lỗ sau gia cường sẽ luôn nhỏ hơn dầm nguyên, do chuyên vị của dầm không chỉ phụ thuộc vào moment kháng uốn mà còn bị chi phối bởi nhiều yếu tố khác như: độ cứng vật liệu, sự tập trung ứng suất và tương tác giữa moment và lực cắt, cũng như vị trí lỗ khoét trong vùng chịu cắt. Đặc biệt, khi lỗ khoét nằm trong vùng chịu cắt cao, hiệu ứng Vierendeel [8, 9], và hiện tượng ứng suất cắt tập trung xung quanh lỗ có thể làm gia tăng đáng kể chuyên vị, thậm chí dẫn đến phá hoại sớm nếu không có giải pháp gia cường phù hợp. Trong các trường hợp này, tấm CFRP không chỉ đóng vai trò gia cường moment kháng uốn, mà còn góp phần phân tán ứng suất, tăng độ cứng cục bộ tại khu vực yếu và hỗ trợ gián tiếp khả năng chống cắt. Ngoài ra, từ cơ sở lý thuyết sức bền vật liệu, mặt cắt nguy hiểm thường được kiểm tra theo biểu thức:

$$\sigma_{z \max} = \frac{M_x}{W_x} = \frac{M_x}{I_x} y_{\max} \quad (4)$$

Trong quá trình thiết kế kết cấu, việc khoét lỗ dầm là điều không thể tránh khỏi nhằm để kết nối các hệ thống kết cấu với nhau, giảm khối lượng tổng thể. Tuy nhiên, từ biểu thức (4), có thể thấy rằng nếu lỗ khoét được bố trí gần trục trung hòa – nơi mà  $y_{\max}$  nhỏ, thì ảnh hưởng đến ứng suất pháp  $\sigma_{z \max}$  sẽ thấp hơn so với khi khoét gần mép ngoài bản bụng. Vì vậy, việc bố trí lỗ khoét tại vùng gần trục trung hòa và hướng ra ngoài biên là giải pháp tối ưu để giảm thiểu ảnh hưởng tiêu cực đến khả năng chịu tải tổng thể của dầm mà vẫn thỏa mãn các điều kiện bền. Tuy nhiên, điều này đồng thời cũng làm giảm giá trị  $W_x$ , vì tiết diện chịu uốn và truyền ứng suất bị cắt xén, dẫn đến cần phải có giải pháp gia cường tại vùng khoét, đặc biệt là bằng các vật liệu có độ cứng cao như CFRP. Tổng thể, khi xét đến cả yếu tố lý thuyết và thực tiễn, gia cường bằng CFRP là một giải pháp hiệu quả và hợp lý để phục hồi và nâng cao khả năng chịu uốn của dầm thép có khoét lỗ, đặc biệt trong các vùng có nguy cơ tập trung ứng suất và biến dạng lớn.



Hình 24. Kích thước của dầm thép IPE-300 [6]



Hình 24. Mặt cắt ngang của các dầm thép BC, BCOC, BSOC, BROC



Hình 25. Mặt cắt của dầm khi khoét lỗ tròn và gia cường thêm 3-CFRP

#### 4. Kết luận

Kết quả phân tích cho thấy rằng sự xuất hiện của lỗ khoét trên bản bụng làm giảm đáng kể khả năng chịu lực của dầm, đặc biệt là khi lỗ khoét nằm trong vùng chịu cắt. Lỗ khoét hình chữ nhật và hình vuông có xu hướng gây ra sự suy giảm khả năng chịu lực lớn nhất do tập trung ứng suất cao tại các góc lỗ, trong khi lỗ khoét tròn có ảnh hưởng ít hơn do không có các cạnh sắc gây tập trung ứng suất cục bộ. Khi lỗ khoét được đặt tại vùng có lực cắt lớn, sự suy giảm khả năng chịu lực của dầm trở nên đáng kể hơn, do đó cần có các biện pháp gia cường để khắc phục tình trạng này. Việc gia cố bằng các lớp CFRP được thực hiện nhằm mục đích nâng cao khả năng chịu tải của dầm, trong đó khu vực nguy hiểm của dầm chính là vùng xung quanh lỗ khoét – nơi tập trung ứng suất cao. Nếu chỉ xét đến khả năng làm việc cơ học của dầm (chỉ đảm bảo dầm không bị phá hủy), kết quả mô phỏng cho thấy rằng việc tăng số lớp CFRP có tác dụng rõ rệt trong việc giảm ứng suất tập trung tại vùng này. Do các lớp CFRP có khả năng gánh bớt nội lực tại các vị trí bị suy yếu, góp phần phân tán ứng suất và giảm mức độ tập trung ứng suất quanh lỗ so với khi chưa gia cường.

Nhờ vậy, khi sử dụng một lớp CFRP, khả năng chịu tải của dầm được cải thiện trong khoảng từ 2% đến 51% và khi tăng lên ba lớp CFRP, mức cải thiện này tăng lên, dao động trong khoảng từ 5% đến 64%, tùy thuộc vào hình dạng lỗ khoét và độ lớn của tải trọng P. Mức tăng này có được là nhờ vào sự gia tăng độ cứng và độ bền uốn tổng thể của dầm, từ đó cải thiện khả năng phân bố nội lực và làm chậm quá trình suy giảm cục bộ tại vùng yếu. Như vậy, gia cường bằng CFRP không chỉ giúp giảm ứng suất tập trung quanh lỗ mà còn đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu suất làm việc tổng thể của dầm, đặc biệt trong các trường hợp kết cấu chịu tải trọng lớn hoặc có lỗ khoét làm suy yếu tiết diện của dầm. Việc sử dụng nhiều lớp CFRP là một giải pháp gia cường hiệu quả đối với dầm có lỗ khoét, giúp hạn chế biến dạng không mong muốn và tăng khả năng chịu lực tổng thể của kết cấu. Tuy nhiên, cần có sự cân nhắc hợp lý giữa hiệu quả gia cường và chi phí vật liệu khi xác định số lớp CFRP tối ưu trong thiết kế thực tế.

Dựa vào kết quả đạt được, nghiên cứu trong tương lai có thể mở rộng theo một số hướng như: Kết hợp phân tích số và thực nghiệm để đánh giá

chính xác hơn hiệu quả gia cường bằng CFRP trong điều kiện làm việc thực tế; xem xét ảnh hưởng của các yếu tố thi công như vị trí kết nối giữa dầm – CFRP và điều kiện môi trường (âm, nhiệt độ) đến hiệu quả của tấm CFRP; đồng thời mở rộng mô hình phân tích cho các loại tiết diện khác hoặc các dầm thép chịu tải động và môi. Những hướng đi này sẽ góp phần nâng cao khả năng ứng dụng thực tiễn và hoàn thiện giải pháp gia cường CFRP trong thiết kế và cải tạo kết cấu thép hiện đại.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Chung, K. F., Liu, T. C. H and Ko, A. C. H. "Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 57, pp. 467–490, 2001.
- [2] Najafi, M., and Wang, Y. C. "Behaviour and design of steel members with web openings under combined bending, shear and compression," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 128, pp. 579–600, 2017.
- [3] Al-Khafaji, A. G. A. "Numerical study on the effect of openings in steel IPE beams strengthened by CFRP plats," *Journal of University of Kerbala*, vol. 14, no. 4, 2016.
- [4] ANSYS, Inc., *ANSYS User's Manual*, Version 14.5. United States of America: SAS IP, Inc., 2012.
- [5] *IPE Beams European Standard Universal I Beams (I Section) with Parallel Flanges: Dimensions, Specifications, Accordance with Format Standard EU 19-57*. European Committee for Standardization, 1957.
- [6] Abbas, A. G. and Bahaa, H. A, "Numerical study on the effect of openings in steel IPE beams strengthened by CFRP plates," *Journal of University of Kerbala*, vol. 14, 2016.
- [7] Mohamed, F. E., Mohamed, A. E and Boshra, E. "Structural performance of strengthened steel girders with web openings under shear forces," *Engineering Research Journal*, vol. 44, pp. 175–188, 2021.
- [8] Chung, K. F. and Lawson, R. M. "Simplified design of composite beams with large web openings to Eurocode 4," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 57, pp. 135–163, 2001.
- [9] Chung, K. F. and Ko, C. H. "Harmonization on practical design of steel and composite beams with large web openings for full integration with building services," in *Proceedings of the Second Structural Engineering World Congress*, Yokohama, Japan, 2002, CD Publication.