

# Giải pháp khắc phục ảnh hưởng của ứng suất dư và biến dạng ban đầu trong kết cấu thép

Solutions to mitigate the effects of residual stress and initial deformation in steel structures

> THS CAO THỊ MAI HƯƠNG

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: huongketcau@utc.edu.vn

## TÓM TẮT

Sức kháng ổn định phi tuyến của các cấu kiện dầm, cột thép nói chung thường bị ảnh hưởng bởi các thông số cường độ chính: Độ mảnh, liên kết ở hai đầu, ứng suất dư và độ cong ban đầu. Ảnh hưởng của ứng suất dư tới sức kháng của dầm thép được đánh giá là lớn. Các ảnh hưởng của cong vênh bản bụng, bản cánh thường được xem xét kết hợp với ứng suất dư trong phân tích ổn định phi tuyến. Tuy nhiên, dạng phá hoại của dầm thép cánh rộng tương đối phức tạp và phụ thuộc vào chiều dài nhịp, phân loại độ chắc của bản bụng, bản cánh.

**Từ khóa:** Ổn định, độ mảnh, dầm thép cánh rộng.

## ABSTRACT

The nonlinear stability resistance of steel beams and columns is generally affected by the main strength parameters: Slenderness, end connections, residual stress and initial curvature. The influence of residual stress on the resistance of steel beams is considered to be large. The effects of web and flange warping are often considered in combination with residual stress in nonlinear stability analysis. However, the failure mode of wide-flange steel beams is relatively complex and depends on the span length and strength classification of webs and flanges.

**Keywords:** Stability, slenderness, wide-flange steel beam.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

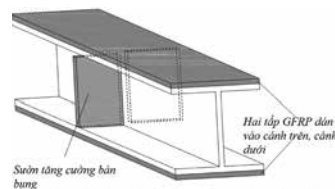
Thép là một vật liệu vô cùng phổ biến trong lĩnh vực xây dựng. Thép có ưu điểm chịu lực cao, có thể chế tạo thành nhiều hình dạng mong muốn dưới dạng cốt hoặc tấm. Đối với các cấu kiện kết cấu thép được tổ hợp bằng cán hoặc hàn, trong cấu kiện luôn có ít nhiều sự tồn tại của ứng suất dư. Ứng suất tồn tại trong các bộ phận kết cấu mà không do tác động của bất kỳ ngoại lực nào được gọi là ứng suất dư [1]. Điều quan trọng là nhận biết sự có mặt của nó vì ứng suất dư ảnh hưởng đến cường độ của các cấu kiện chịu lực.

Các ảnh hưởng của cong vênh bản bụng, bản cánh thường được xem xét kết hợp với ứng suất dư trong phân tích ổn định phi tuyến. Các kết cấu dầm thép thành mỏng được áp dụng rộng rãi cho các kết cấu thực tế như kết cấu cầu, kết cấu nhà và kết cấu cảng vì chúng mỏng, nhẹ và có cường độ chịu cắt và uốn cao. Tuy nhiên, dạng phá hoại của dầm thép cánh rộng tương đối phức tạp và phụ thuộc vào chiều dài nhịp, phân loại độ chắc của bản bụng, bản cánh.

## 2. MÔ HÌNH HÓA VÀ CÁC DẠNG PHÁ HOẠI CỦA CÁC GIẢI PHÁP

Để làm giảm sự mất ổn định cục bộ của bản cánh và bản bụng, đề tài hiện tại nghiên cứu đề xuất 3 giải pháp gia cường và chúng được đặt tên là Giải pháp 1, Giải pháp 2 và Giải pháp 3. Trong Giải pháp 1, chỉ có một sườn tăng cường được đặt ở giữa nhịp. Trong Giải pháp 2, chỉ có hai tấm GFRP dày 9,5 mm được dán vào các cánh trên và dưới của dầm thép thông qua các lớp kết dính dày 1 mm. Các đặc trưng vật liệu của tấm GFRP và lớp kết dính tương tự như vật liệu đã được sử dụng trong các nghiên cứu gần đây. Tấm GFRP

có một mô-đun đàn hồi dọc trục 17,0 GPa, một hệ số Poisson 0,3 và một cường độ chịu kéo 209 MPa. Vật liệu kết dính là Tyfo S với một mô-đun đàn hồi 3.180 MPa, một hệ số Poisson 0,295 và một cường độ chịu kéo là 75,0 MPa. Mô hình được thực hiện trong phần mềm ABAQUS. Trong Giải pháp 3, cả sườn tăng cường giữa nhịp và hai tấm GFRP dày 9,5 mm được gia cường vào dầm (Hình 1). Các sức kháng mô-men của các giải pháp gia cường được điều tra số và được so sánh với các sức kháng của dầm không được gia cường. Các ưu, nhược điểm của mỗi giải pháp gia cường được thảo luận và phân tích chi tiết.



Hình 1. Gia cường dầm thép bằng cách sử dụng sườn tăng cường giữa nhịp cho bản bụng và hai tấm GFRP trên hai cánh

## 3. PHÂN TÍCH ĐÁNH GIÁ CHI TIẾT TÁC DỤNG CỦA GIẢI PHÁP SỬ DỤNG SƯỜN TĂNG CƯỜNG BẢN BỤNG

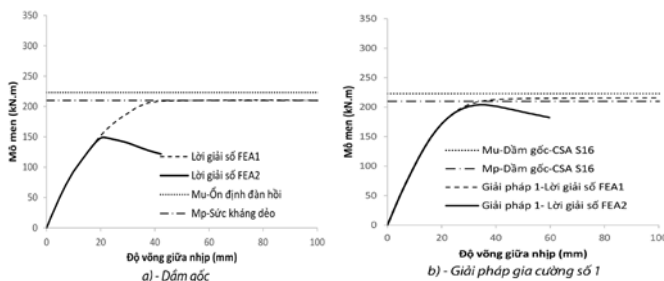
Đối với các sức kháng mô-men phi tuyến, hai loại phân tích khác nhau được thực hiện và được đặt tên là "Lời giải số FEA1" và "Lời giải số FEA2". Trong loại phân tích "Lời giải số FEA1", phi tuyến vật liệu được xem xét nhưng các ảnh hưởng của ứng suất dư và biến dạng ban đầu không được xem xét. Trong loại phân tích thứ hai "Lời giải

số FEA2", các ảnh hưởng của phi tuyến vật liệu, ứng suất dư và biến dạng ban đầu được xem xét.

Khi các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và các ứng suất không được xem xét (trong lời giải số FEA1), các sức kháng mô-men ổn định đàn hồi và sức kháng mô-men của hệ tăng theo thứ tự: Dầm gốc, dầm gia cường theo Giải pháp 1. Sức kháng mô-men của dầm gốc và dầm gia cường theo Giải pháp 1 gần như là một hằng số và xấp xỉ bằng các sức kháng mô-men mặt cắt chày dẻo hoàn toàn. Khi so với các sức kháng mô-men của dầm gốc, các sức kháng mô-men của các giải pháp gia cường 1 cao hơn tương ứng là 1,9% (cho nhịp L=4,0 m). Trên Hình 2a, ta quan sát thấy dạng phá hoại của dầm gốc khi các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và ứng suất dư không được xem xét chủ yếu dựa trên hiện tượng mất ổn định cục bộ của bản cánh. Do vậy, sườn tăng cường bản bụng ở giữa nhịp trong giải pháp gia cường 1 không làm tăng đáng kể sức kháng này của dầm khi so sánh với sức kháng lý thuyết của dầm (CSA S16). Lưu ý rằng, trường hợp này, các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và các ứng suất không được xem xét.

Khi các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và các ứng suất được xem xét (trong lời giải số FEA2), ta lại quan sát thấy một bức tranh khác biệt. Bằng cách so sánh Hình 2a với Hình 2b, ta thấy rằng các sức kháng mô-men của giải pháp gia cường số 1 (các giải pháp có sử dụng sườn tăng cường bản bụng ở giữa dầm) là cao hơn nhiều so với các sức kháng của dầm gốc. Dạng phá hoại của các Giải pháp 1 không bị kiểm soát bởi ổn định bản bụng. Cụ thể, dạng phá hoại của Giải pháp 1 là sát với một dạng phá hoại mặt cắt chày dẻo hoàn toàn. Do vậy, việc bổ sung sườn tăng cường bản bụng trong Giải pháp 1 là có hiệu quả cao trong việc tăng sức kháng mô-men của hệ. Khi so sánh với sức kháng mô-men của dầm gốc, sức kháng mô-men của các Giải pháp 1 cao hơn tương ứng là 36,7%.

Nếu ta so sánh các sức kháng mô-men trong giải pháp gia cường 1 cả khi xét và khi không xét đến các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và ứng suất dư với mô-men mặt cắt chày dẻo hoàn toàn của dầm gốc, ta có thể thấy rằng các sức kháng mô-men của Giải pháp 1 chỉ tiệm cận dưới đến giá trị mô-men dẻo. Điều này chỉ ra rằng, việc gia cường sườn tăng cường bản bụng chỉ giúp khôi phục sức kháng của dầm về gần với giá trị sức kháng lý thuyết của dầm, chứ không làm tăng được đáng kể sức kháng này.



Hình 2. Mối quan hệ sức kháng mô-men phi tuyến và độ võng giữa nhịp của a) - Dầm gốc và b) - Giải pháp gia cường số 1

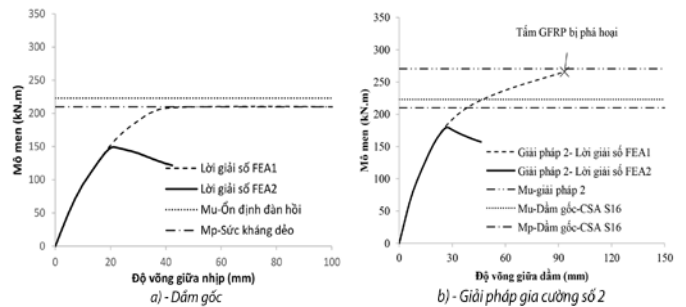
#### 4. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ CHI TIẾT TÁC DỤNG CỦA GIẢI PHÁP SỬ DỤNG TẤM DÁN GIA CƯỜNG BẢN CÁN

Các Hình 3a và 3b trình bày mối quan hệ giữa sức kháng mô-men phi tuyến và độ võng giữa nhịp của dầm gốc và các dầm gia cường theo Giải pháp 2 khi chiều dài nhịp dầm là L=4,0 m. Các kết quả, trong đó các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và ứng suất dư không được xem xét, được thực hiện trong lời giải số FEA1. Còn các kết quả, trong đó các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và ứng suất dư có được xem xét, được thực hiện trong lời giải số FEA2. Các mô-men dẻo của mặt cắt chày hoàn toàn  $M_p$  và mô-men ổn định

đàn hồi  $M_u$  của dầm gốc xác định theo Tiêu chuẩn CSA S16 [15]. Sức kháng mô-men ổn định tổng thể đàn hồi  $M_u$  của các dầm gia cường trong giải pháp gia cường 2 cũng được trình bày trong Hình 3b.

Khi các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và các ứng suất không được xem xét (trong lời giải số FEA1), các sức kháng mô-men ổn định đàn hồi và sức kháng mô-men của hệ tăng theo thứ tự: Dầm gốc, dầm gia cường theo Giải pháp 2. Các sức kháng mô-men của các Giải pháp 2 dựa trên dạng phá hoại GFRP. Lúc này, mặt cắt thép chưa chày dẻo hoàn toàn. Khi so với các sức kháng mô-men của dầm gốc, các sức kháng mô-men của các giải pháp gia cường 2 cao hơn là 25,9%. Ta quan sát thấy dạng phá hoại của dầm gốc khi các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và ứng suất dư không được xem xét chủ yếu dựa trên hiện tượng mất ổn định cục bộ của bản cánh. Các dầm gia cường với hai tấm GFRP dán vào các cánh dầm trong các giải pháp gia cường 2 có các sức kháng mô-men cao vì chúng có thể làm suy giảm sự mất ổn định của bản cánh. Điều này chỉ ra rằng, các lời giải gia cường bằng cách sử dụng các tấm GFRP là có hiệu quả.

Khi các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và các ứng suất được xem xét (trong lời giải số FEA2), ta lại quan sát thấy một bức tranh khác biệt. Ta thấy rằng, các sức kháng mô-men của các giải pháp gia cường số 1 (các giải pháp có sử dụng sườn tăng cường bản bụng ở giữa dầm) là cao hơn so với các sức kháng của dầm gốc và của giải pháp gia cường số 2. Dạng phá hoại của dầm gốc và của Giải pháp số 2 là dựa trên sự mất ổn định cục bộ bản bụng. Trái lại, dạng phá hoại của Giải pháp 1 không bị kiểm soát bởi ổn định bản bụng. Cụ thể, dạng phá hoại của Giải pháp 1 là sát với một dạng phá hoại mặt cắt chày dẻo hoàn toàn. Mặc dù vậy, ta cũng quan sát thấy rằng giải pháp gia cường 2 cũng ít nhiều làm tăng sức kháng mô-men của hệ.



Hình 3. Mối quan hệ sức kháng mô-men phi tuyến và độ võng giữa nhịp của a) - Dầm gốc và b) - Giải pháp gia cường số 2

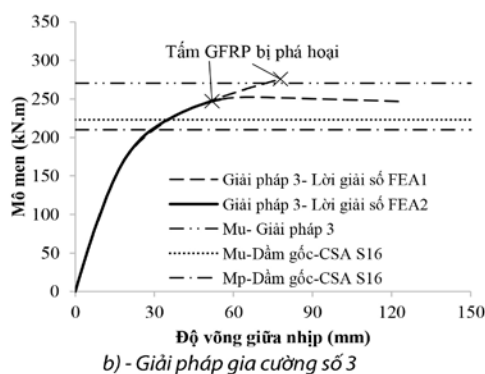
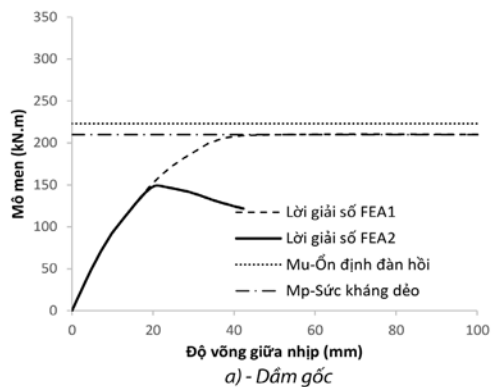
#### 5. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ CHI TIẾT TÁC DỤNG CỦA GIẢI PHÁP SỬ DỤNG SƯỜN TĂNG CƯỜNG BẢN BỤNG VÀ TẤM DÁN DẪN BẢN CÁN

Các Hình 4a, 4b trình bày mối quan hệ giữa sức kháng mô-men phi tuyến và độ võng giữa nhịp của dầm gốc và các dầm gia cường theo Giải pháp 3 khi chiều dài nhịp dầm là L=4,0 m. Các kết quả, trong đó các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và ứng suất dư không được xem xét, được thực hiện trong lời giải số FEA1. Còn các kết quả, trong đó các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và ứng suất dư có được xem xét, được thực hiện trong lời giải số FEA2. Các mô-men dẻo của mặt cắt chày hoàn toàn  $M_p$  và mô-men ổn định

đàn hồi  $M_u$  của dầm gốc xác định theo Tiêu chuẩn CSA S16 [15]. Sức kháng mô-men ổn định tổng thể đàn hồi  $M_u$  của các dầm gia cường trong giải pháp gia cường 3 cũng được trình bày trong Hình 3.4b.

Khi các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và các ứng suất không được xem xét (trong lời giải số FEA1), các sức kháng mô-men ổn định đàn hồi và sức kháng mô-men của hệ tăng theo thứ tự: Dầm gốc, dầm gia cường theo Giải pháp 3. Sức kháng mô-men của các Giải pháp 3 dựa trên dạng phá hoại GFRP. Lúc này, mặt cắt thép chưa chảy dẻo hoàn toàn. Khi so với các sức kháng mô-men của dầm gốc, sức kháng mô-men của các giải pháp gia cường 3 cao hơn tương ứng là 28,2%. Ta quan sát thấy dạng phá hoại của dầm gốc khi các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và ứng suất dư không được xem xét chủ yếu dựa trên hiện tượng mất ổn định cục bộ của bản cánh. Do vậy, dầm gia cường với hai tấm GFRP dán vào các cánh dầm và sườn tăng cường vào bản bụng trong giải pháp gia cường 3 có các sức kháng mô-men cao nhất vì chúng có thể làm suy giảm sự mất ổn định cục bộ của cả bản cánh và bản bụng.

Khi các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và các ứng suất được xem xét (trong lời giải số FEA2), ta lại quan sát thấy một bức tranh khác biệt. Ta thấy rằng, các sức kháng mô-men của các giải pháp gia cường 3 (các giải pháp có sử dụng sườn tăng cường bản bụng ở giữa dầm) là cao hơn nhiều so với các sức kháng của dầm gốc và của các giải pháp gia cường số 1 và 2. Dạng phá hoại của Giải pháp 3 không bị kiểm soát bởi sự mất ổn định cục bộ của bản cánh hoặc bản bụng. Dạng phá hoại của các Giải pháp 3 là dựa trên dạng phá hoại kéo của tấm GFRP. Khi so sánh với sức kháng mô-men của dầm gốc, sức kháng mô-men của các Giải pháp 3 cao hơn là 67,2%, cho thấy Giải pháp 3 là giải pháp hiệu quả nhất trong ba giải pháp đề xuất.



Hình 4. Mối quan hệ sức kháng mô-men phi tuyến và độ vồng giữa nhịp của a) - Dầm gốc và b) - Giải pháp gia cường số 3

Nếu ta so sánh các sức kháng mô-men trong các giải pháp gia

cường 1 và 3 cả khi xét và khi không xét đến các ảnh hưởng của biến dạng ban đầu và ứng suất dư với mô-men mặt cắt chảy dẻo hoàn toàn của dầm gốc, ta có thể thấy rằng các sức kháng mô-men của Giải pháp 3 cao hơn nhiều, trong khi của Giải pháp 1 chỉ tiệm cận dưới đến giá trị mô-men dẻo. Điều này chỉ ra rằng, việc gia cường tấm dán GFRP đã làm tăng sức kháng mô-men của hệ. Tuy nhiên, việc áp dụng các tấm GFRP nên được kết hợp với việc bổ sung các sườn tăng cường bản bụng để tránh trường hợp mất ổn định bản bụng như đã quan sát được trong giải pháp gia cường số 2.

## 6. CÁC KẾT LUẬN KIẾN NGHỊ

- Bài báo hiện tại đề xuất 3 giải pháp để giảm ảnh hưởng của các sự mất ổn định cục bộ bản cánh và bản bụng của dầm thép dưới ảnh hưởng của ứng suất dư và biến dạng ban đầu: Giải pháp 1 là sử dụng sườn tăng cường bản bụng ở giữa nhịp. Giải pháp 2 là tăng cường bản cánh bằng hai tấm GFRP và Giải pháp 3 là tổng hợp của Giải pháp 1 và Giải pháp 2. Kết quả phân tích cho thấy, tất cả các giải pháp gia cường 1, 2, 3 đều làm tăng sức kháng mô-men của dầm thép chịu ảnh hưởng của biến dạng dư và ứng suất ban đầu. Giải pháp 3 có hiệu quả cao nhất.

- Tìm hiểu thêm các giải pháp khắc phục ảnh hưởng của ứng suất dư và biến dạng ban đầu, các tấm gia cường cánh có thể là tấm thép, tấm FRP hoặc vật liệu nào đó tương đương với chiều dày hợp lý. Sườn tăng cường được bố trí nhiều hơn (theo các quy định tiêu chuẩn) để phân tích hiệu quả các giải pháp trong việc khắc phục ảnh hưởng của ứng suất dư và biến dạng ban đầu tới sức kháng của cấu kiện kết cấu.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong Đề tài mã số T2021-CT-038.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Đào Văn Đình và Đào Sỹ Đán (2018), Giáo trình Kết cấu thép, NXB. Đại học Giao thông vận tải.
- [2]. Dibley, J. E. (1969), Lateral torsional buckling of I-sections in grade 55 steel, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 43, 499-627.
- [3]. Mupeta, H., John, G., Hirani, A. (2015), Resistance of members to flexural buckling according to Eurocode 3, focus on imperfections, Master's thesis in mechanical engineering, Linnaeus University.
- [4]. Kabir, M. I. và Bhowmick, A. K. (2016), Lateral torsional buckling of welded wide flange beams, Proceedings of the annual stability conference, Structural Stability research council, Orlando, Florida, April 12<sup>th</sup>.
- [5]. Kubo, M., và Fukomoto, Y. (1988), Lateral Torsional buckling of thin walled I beams, Journal of Structural Engineering, 114, 841-855.
- [6]. Nishino, F., Tall, L. and Okumura, T. (1968), Residual stress and torsional buckling strength of H and cruciform columns, Transaction of JSCE, 160, 75-87.
- [7]. Galambos, T. V. (1963), Inelastic lateral buckling of beams, Proc. ASCE, vol.89 (ST5), 63-20.
- [8]. Baker, K.A. và Kennedy, D., J. (1984), Resistance factors for laterally unsupported steel beams and biaxially loaded steel beam columns, Canadian Journal of Civil Engineering, 11, 1008-1019.
- [9]. Ziemian, R.D. (2010), Guide to stability design criteria for metal structures, 6<sup>th</sup> Edition, nhà xuất bản John Wiley & Sons.
- [10]. Abebe, D. Y., Jang, J., Choi, J. and Part, J.U. (2015), Study on inelastic buckling and residual strength of H-section steel column member, International Journal of Steel Structures 15, 465-374.