



EXPERIMENTAL DETERMINATION OF LONGITUDINAL ELASTIC MODULUS AND MAJOR POISSON'S RATIO OF GFRP MATERIAL

Nguyen Tien Thuy*, Nguyen Tuan Anh

Ho Chi Minh city University of Transport, No. 2, Vo Oanh Street, Ward 25, Binh Thanh District, Ho Chi Minh city, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 24/11/2022

Revised: 04/1/2023

Accepted: 11/1/2023

Published online: 15/02/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.2.5>

* *Corresponding author*

Email: thuy.nguyen@ut.edu.vn

Abstract. The Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) shape and systems have been using commercially since 1970 and is increasingly applying in construction. The design standard for GFRP materials is gradually being developed and improved to meet the increasing demand from manufacturers and designers. The preparation of a design standard would require sufficient numbers of experimental data, both on material properties and structural behavior under difference boundary and loading conditions to propose design equations and factors. Longitudinal elastic modulus and major poisson's ratio are those important values that being used frequently in design. This paper presents experimental work to determine those values. It is found that the elastic modulus of flanges and the web can be significantly different when comparing together. It is also found that they are 27-43% higher than that provided by the manufacturer in the design manual. For Major Poisson's ratio, the measured value is very close to that of design manual.

Keywords: tensile test, elastic modulus, Poisson's ratio

© 2023 University of Transport and Communications



THÍ NGHIỆM XÁC ĐỊNH MODUN ĐÀN HỒI THEO PHƯƠNG DỌC VÀ HỆ SỐ NỖ NGANG CỦA VẬT LIỆU POLYME GIA CƯỜNG SỢI THỦY TINH (GFRP)

Nguyễn Tiên Thủy*, Nguyễn Tuấn Anh

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, Số 2, Đường Võ Oanh, Phường 25, Quận Bình Thạnh, TP.HCM, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 24/11/2022

Ngày nhận bài sửa: 04/1/2023

Ngày chấp nhận đăng: 11/1/2023

Ngày xuất bản Online: 15/02/2023

<https://doi.org/10.47869/tcsj.74.2.5>

* Tác giả liên hệ

Email: thuy.nguyen@ut.edu.vn

Tóm tắt. Vật liệu polyme gia cường sợi thủy tinh (GFRP) là vật liệu mới được sử dụng thương mại từ 1970 và ngày càng xuất hiện nhiều trong công trình xây dựng. Tiêu chuẩn thiết kế cho GFRP đang được hoàn thiện để đáp ứng nhu cầu sử dụng ngày càng cao. Việc hoàn thiện tiêu chuẩn thiết kế cần nhiều số liệu thực nghiệm về tính chất vật liệu, ứng xử kết cấu dưới các điều kiện tải trọng để đề xuất các công thức và hệ số thiết kế phù hợp và an toàn. Modun đàn hồi và hệ số nở ngang là các giá trị quan trọng, sử dụng thường xuyên trong thiết kế. Bài báo này trình bày thí nghiệm xác định modun đàn hồi theo phương dọc và hệ số nở ngang bằng phương pháp thực nghiệm. Kết quả cho thấy modun đàn hồi trên bản cánh và bản bụng là không giống nhau và có khác biệt tương đối lớn. Ngoài ra, các giá trị thực nghiệm đều lớn hơn từ 27-43% so với modun đàn hồi theo đề xuất của nhà sản xuất. Với hệ số nở ngang, giá trị thực nghiệm tìm được tiệm cận với giá trị của nhà sản xuất cung cấp.

Từ khóa: thí nghiệm kéo, modun đàn hồi, hệ số nở ngang.

© 2023 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. GIỚI THIỆU

Vật liệu polyme gia cường sợi thủy tinh - Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) là vật liệu composite có hai thành phần chính là sợi thủy tinh và keo (thường là keo polyester, vinyl ester hoặc epoxy...). Các tiết diện GFRP thường được sản xuất bằng phương pháp đúc kéo (pultrusion). Đây là quy trình sản xuất composite liên tục, trong đó các kết cấu sợi (bao gồm các tấm sợi đơn hướng hoặc các thảm sợi có các sợi thủy tinh đan vuông góc) được kéo qua

khuôn đúc theo một kiến trúc sợi (bố trí các lớp sợi) nhất định, đồng thời keo được gia nhiệt và đổ vào khuôn tạo nên các hình dạng tiết diện mong muốn [1]. Với nhiều tính chất và ứng xử vượt trội so với các vật liệu truyền thống như thép, bê tông, vật liệu GFRP ngày càng được sử dụng nhiều trong công trình giao thông nhờ những ưu điểm như: khả năng chống ăn mòn tốt; chi phí nhân công thấp (do trọng lượng nhẹ $=1/4$ thép); tốc độ thi công nhanh; chi phí duy tu bảo dưỡng dài hạn và bảo trì thấp. Ngoài ra vật liệu GFRP còn có khả năng cách từ, cách nhiệt, cách điện, là những ưu điểm giúp vật liệu GFRP được sử dụng trong các loại công trình đặc biệt cần các tính chất này [1]. Những thập niên gần đây, với công nghệ sản xuất hiện đại, các nhà máy có thể chế tạo nhiều loại tiết diện GFRP sử dụng vào các mục đích khác nhau. Hiện nay, GFRP có thể được sử dụng để chế tạo các cấu kiện chịu lực chính trong kết cấu cầu (kết cấu dầm) như trên Hình 1 hoặc sử dụng vào kết cấu truyền tải trọng như bản mặt cầu trên Hình 2.



Hình 1. Cầu đường bộ sử dụng dầm GFRP [2].



Hình 2. Bản mặt cầu bằng vật liệu GFRP [3].

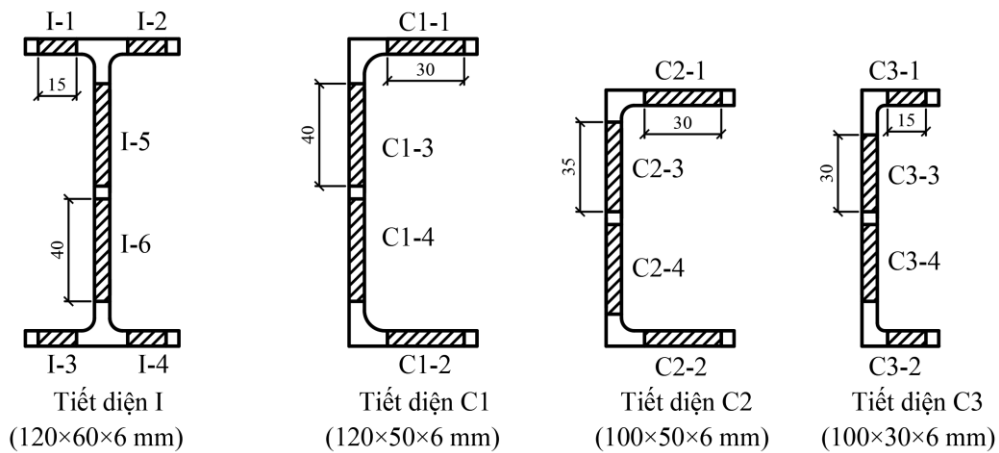
Là vật liệu tương đối mới, xuất hiện thương mại từ năm 1970, cho đến thời điểm hiện nay, chưa có quy trình thiết kế chính thức cho vật liệu GFRP sản xuất bằng phương pháp đúc kéo. Năm 2010, ASCE [4] cho ra mắt quy trình thiết kế theo hệ số tải trọng và sức kháng ở dạng quy trình thử nghiệm (pre-standard). Năm 2018, Mottram và Henderson [5] xuất bản hướng dẫn thiết kế cầu FRP trong đó trình bày một số công thức thiết kế cầu FRP theo Eurocode. Hiện nay quy trình thiết kế chính thức của FRP theo Eurocode vẫn đang trong quá trình chuẩn bị dự thảo. Ngoài các tiêu chuẩn thiết kế chính thức, các nhà sản xuất lớn như Fiberline (Đan Mạch) hay Strongwell (Mỹ) cung cấp sổ tay thiết kế do dòng sản phẩm riêng của họ. Như vậy có thể thấy hiện nay chưa có các tiêu chuẩn thiết kế cho GFRP được chính thức ban hành. Lý do chính là sự thiếu hụt số lượng các thí nghiệm vật liệu, thí nghiệm kết cấu cần thiết để đảm bảo độ tin cậy cho các công thức cũng như hệ số thiết kế bán thực nghiệm.

Trong các giá trị về tính chất vật liệu thì modun uốn E và modun cắt G là rất quan trọng, được sử dụng nhiều trong thiết kế. Với đặc thù là vật liệu composite, GFRP có tính chất cơ lý theo các phương khác nhau là khác nhau. Về cơ bản, GFRP được coi là vật liệu trục hướng [1]. Trong mô phỏng vật liệu GFRP bằng phương pháp phần tử hữu hạn cần 9 tham số vật liệu cho 3 hướng vuông góc. Mỗi hướng cần giá trị của modun uốn, modun cắt và hệ số nở ngang (major poisson's ratio). Trong đó 4 tham số quan trọng nhất [6] là modun uốn theo phương dọc E_L , modun uốn theo phương ngang E_T , Modun cắt G_{LT} và hệ số nở ngang ν_{LT} . Trong đó L là “Longitudinal” – phương dọc; T là “Transverse” – phương ngang.

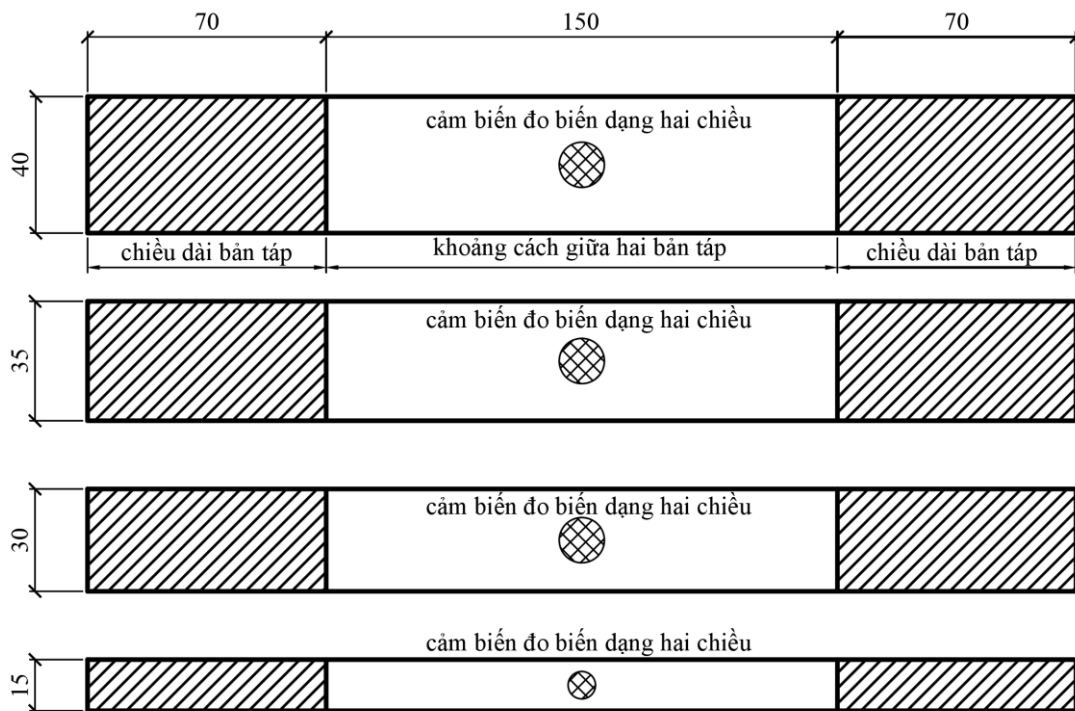
Bài báo này trình bày phương pháp, quy trình thí nghiệm và phân tích kết quả xác định modun uốn theo phương dọc E_L và hệ số nở ngang ν_{LT} trên 54 mẫu thí nghiệm.

2. PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

Để xác định E_L , tác giả chuẩn bị mẫu thí nghiệm theo tiêu chuẩn BS EN ISO 527-1 [7] và BS EN ISO 527-4 [8] dùng để xác định đặc tính kéo của vật liệu polyme. Phương pháp này cũng giúp xác định cường độ chịu kéo tối đa. Tiêu chuẩn tương tự áp dụng tại Mỹ là ASTM D638 [9], sử dụng mẫu thí nghiệm hình xương chó (dog bone). Theo quan điểm của tác giả, các mẫu kiểu này không phù hợp với vật liệu GFRP vì sợi thủy tinh mất đi tính liên tục (do bị cắt thành hình xương chó có tiết diện 2 đầu ngàm lớn hơn phần thân), dẫn đến hình thành ứng suất tập trung ở phần sợi đứt đoạn, loại mẫu thí nghiệm này có thể bị phá hủy sớm khi chưa đạt cường độ. Một quy trình khác cũng phổ biến tại Mỹ để xác định tính chất kéo của vật liệu GFRP là ASTM D3039/D3039M-17 [10]. Trong nghiên cứu này tác giả chuẩn bị mẫu thí nghiệm theo quy trình của tiêu chuẩn BS EN ISO. Việc xác định E_L và ν_{LT} sẽ sử dụng cả hai tiêu chuẩn BS EN ISO 527 và ASTM D3039 để so sánh sự khác biệt. Các mẫu thí nghiệm hình chữ nhật được cắt từ bản cánh và bản bụng ở các vị trí như trên hình 3 ở phần gạch chéo của tiết diện chữ I và chữ C với các tên gọi của mẫu được ghi trên các tiết diện. Với tiết diện chữ I, chúng ta có 4 mẫu ở bản cánh (đặt tên là I-1; I-2; I-3 và I-4) và 2 mẫu ở bản bụng (đặt tên I-5 và I-6). Với các tiết diện chữ C, bản cánh có 2 mẫu và bản bụng có 2 mẫu. Các mẫu trên chữ C được đặt với chữ đầu là tên tiết diện (ví dụ: C1), sau đó là vị trí lấy mẫu (ví dụ vị trí 1 là bản cánh trên, ta có mẫu C1-1). Về kiến trúc sợi, thông thường các bản cánh sẽ có kiến trúc giống nhau, trong khi đó bản bụng thường được bố trí nhiều thảm sợi nhiều hơn để tăng sức kháng cắt.



Hình 3. Vị trí lấy mẫu và bề rộng mẫu thí nghiệm (gạch chéo): mm.



Hình 4. Kích thước mẫu thí nghiệm (mm).

Khi nghiên cứu dầm chữ I kích thước 101,6×50,8×6,35 mm của Strongwell (Mỹ), Stoddard [4] nhận thấy modun đàn hồi trên các bản cánh (bản cánh trên và bản cánh dưới) cùng phía so với trục bản bụng có giá trị khác nhau từ 5-10%, trong khi khác biệt này là 20% khi so sánh giá trị của các bản cánh khác phía so với trục bản bụng. Dựa theo nghiên cứu của Stoddard, tác giả quyết định, với bản cánh các mẫu vật liệu ở cùng phía với trục bản bụng được xem là cùng loại. Như vậy tiết diện I có 3 nhóm vật liệu và tiết diện C có 2 nhóm vật liệu. BS EN ISO 527-4 [8] quy định số lượng mẫu tối thiểu của mỗi nhóm là 5 mẫu. Nghiên cứu này sử dụng 6 mẫu cho mỗi nhóm. Với tiết diện I, tác giả chuẩn bị 18 mẫu cho 3 nhóm vật liệu (I-1 và I-3 là nhóm 1; I-2 và I-4 là nhóm 2; I-5 và I-6 là nhóm 3). Với mỗi tiết diện C, chúng ta có 12 mẫu vật liệu (cho 2 nhóm vật liệu bản cánh và bản bụng). Như vậy tổng cộng có 54 mẫu thí nghiệm cho 4 tiết diện.

Chiều dài của mẫu là 290 mm với 2 đầu được dán keo cứng với bản tấp bằng nhôm (bản nhôm dài 70 mm, dày 2 mm) để tránh phá hoại cục bộ xảy ra trong quá trình kéo. Bề rộng mẫu thí nghiệm được thể hiện trên Hình 3 và 4. Trên Hình 4 còn thể hiện vị trí cảm biến đo biến dạng hai hướng (hoặc một hướng). Trên mỗi mẫu thí nghiệm, một cặp cảm biến được đặt đối xứng qua mặt còn lại để triệt tiêu ảnh hưởng của biến dạng uốn có thể xảy ra trong quá trình kéo mẫu. Trong 54 mẫu thí nghiệm, có 36 mẫu sử dụng cảm biến một hướng và 18 mẫu sử dụng cảm biến hai hướng. Cảm biến hai hướng đo được biến dạng theo phương dọc và phương ngang, được sử dụng để xác định hệ số nở ngang $\nu_{LT} = -\epsilon_L / \epsilon_T$. Trong đó ϵ_L là biến dạng theo phương dọc và ϵ_T là biến dạng theo phương ngang.

Trước khi làm thí nghiệm, các mẫu được đo 5 lần bằng thước kẹp kỹ thuật số. Kết quả đo thể hiện trên bảng 1 cho dầm I và C1 và ở bảng 2 cho dầm C2 và C3. Các mẫu có đánh số “1” ở cuối là mẫu sử dụng cảm biến biến dạng hai hướng. Từ bảng 1 và 2 có thể thấy rằng bề dày trung bình của các bản của dầm I, C1, C2 và C3 lần lượt là 6,04, 6,02, 6,02 và 5,96 mm với hệ số biến thiên (CV) dao động từ 0,6-1,5% là rất nhỏ và không đáng kể.

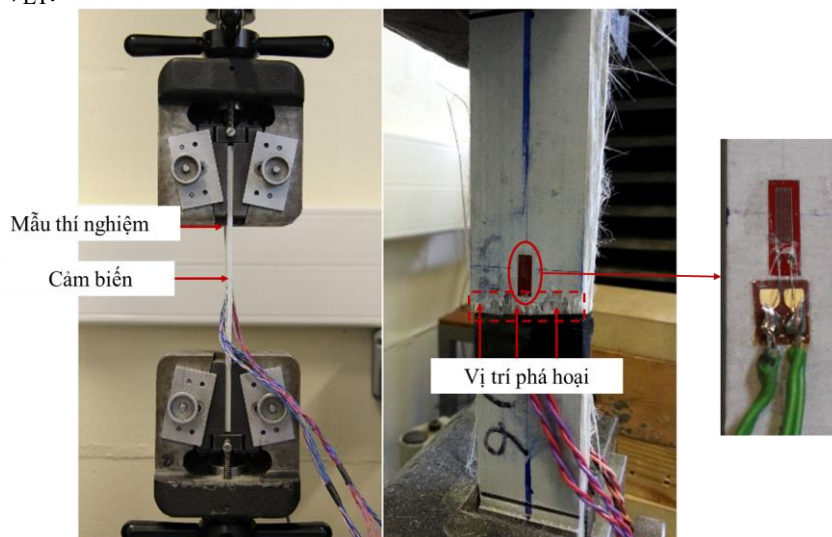
Bảng 1. Kích thước mẫu thí nghiệm của dầm I và C1.

Tên mẫu	Bề rộng trung bình (mm)	Bề dày trung bình (mm)	Tên mẫu	Bề rộng trung bình (mm)	Bề dày trung bình (mm)
I-1-1	14,98	6,10	C1-1-1	29,93	6,14
I-1-2	15,03	6,04	C1-1-2	30,05	6,02
I-1-3	15,05	5,99	C1-1-3	29,95	6,13
I-2-1	15,01	6,08	C1-2-1	30,05	6,09
I-2-2	14,98	6,15	C1-2-2	29,94	6,10
I-2-3	14,98	6,02	C1-2-3	30,02	6,08
I-3-1	14,99	5,99	C1-3-1	40,04	5,96
I-3-2	15,03	6,11	C1-3-2	39,83	5,89
I-3-3	15,00	6,05	C1-3-3	39,85	6,01
I-4-1	15,07	6,01	C1-4-1	39,95	5,89
I-4-2	15,05	6,03	C1-4-2	40,21	5,98
I-4-3	14,83	5,89	C1-4-3	39,96	5,91
I-5-1	40,02	6,07	Độ dày trung bình của bản (mm)		6,02
I-5-2	40,00	6,03	Độ lệch chuẩn (SD) (mm)		0,09
I-5-3	39,94	6,09	Hệ số biến thiên (CV) %		1,5
I-6-1	39,95	6,04			
I-6-2	39,93	6,02			
I-6-3	39,65	6,05			
Bề dày trung bình của bản (mm)		6,04			
Độ lệch chuẩn (SD) (mm)		0,55			
Hệ số biến thiên (CV)%		0,9			

Bảng 2. Kích thước mẫu thí nghiệm của dầm C2 và C3.

Tên mẫu	Bề rộng trung bình (mm)	Bề dày trung bình (mm)	Tên mẫu	Bề rộng trung bình (mm)	Bề dày trung bình (mm)
C2-1-1	29,99	6,00	C3-1-1	15,06	5,95
C2-1-2	29,96	6,07	C3-1-2	15,01	5,93
C2-1-3	29,95	5,96	C3-1-3	14,99	6,01
C2-2-1	29,80	6,03	C3-2-1	15,04	5,99
C2-2-2	29,79	6,03	C3-2-2	15,02	5,89
C2-2-3	29,89	6,01	C3-2-3	14,97	5,95
C2-3-1	35,01	5,97	C3-3-1	35,14	5,96
C2-3-2	34,92	5,97	C3-3-2	34,98	5,97
C2-3-3	35,05	6,04	C3-3-3	35,03	5,92
C2-4-1	34,95	6,04	C3-4-1	35,09	5,96
C2-4-2	34,96	5,92	C3-4-2	34,94	5,94
C2-4-3	35,30	6,16	C3-4-3	35,05	6,01
Bề dày trung bình của bản (mm)		6,02	Bề dày trung bình của bản (mm)		5,96
Độ lệch chuẩn (SD) (mm)		0,06	Độ lệch chuẩn (SD) (mm)		0,03
Hệ số biến thiên (CV)%		1,0	Hệ số biến thiên (CV)%		0,6

Trong thí nghiệm, mẫu được ngàm chặt hai đầu vào bản nhôm như trên Hình 5. Tốc độ gia tải là 1mm/phút. Tải trọng và biến dạng được ghi nhận bởi máy Orion data logger. Lực kéo được gia tăng cho tới khi mẫu bắt đầu phát ra tiếng động nhỏ do sự đứt gãy từng phần của các sợi thủy tinh và kéo theo sự phá hủy toàn phần của mẫu thí nghiệm (Hình 5 bên phải). Thông thường các phá hủy xảy ra khi biến dạng vượt quá 1% theo phương kéo. Trong quá trình thí nghiệm, tác giả nhận thấy một số trường hợp bản tấp nhôm bị tuột trước khi mẫu bị phá hoại. Khi hiện tượng này xảy ra thường dẫn đến mẫu bị phá hoại cục bộ sớm hoặc không phá hoại, tuy nhiên hiện tượng này không ảnh hưởng đến việc xác định modun đàn hồi E_L hay hệ số nở ngang ν_{LT} .

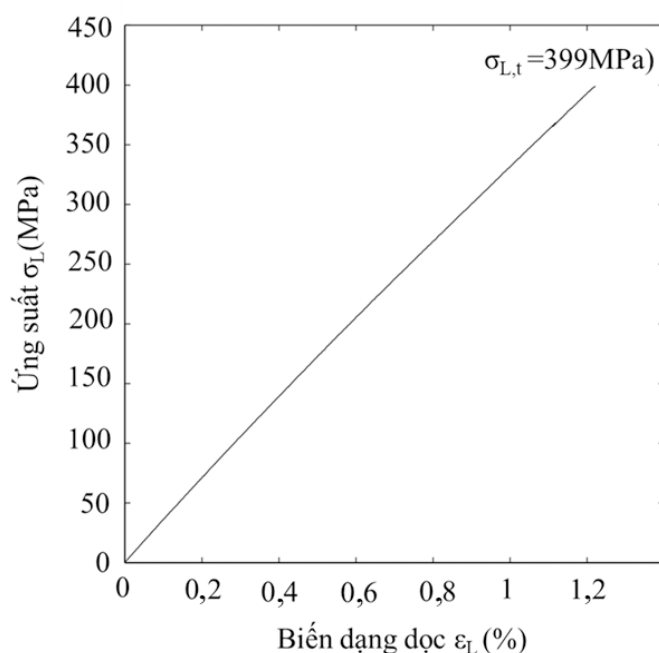


Hình 5. Thí nghiệm kéo mẫu vật liệu tới phá hoại.

BS EN 527-1 [7] đề xuất sử dụng giá trị biến dạng trong khoảng 0,05% đến 0,25% khi xác định E_L của vật liệu nhựa không gia cố (unreinforced plastics). Với số liệu trong khoảng này, tác giả quyết định sử dụng đường xu hướng bình phương nhỏ nhất, từ đó xác định E_L . Lưu ý rằng khoảng đề xuất biến dạng tương đối thấp 0,05% đến 0,25% như trong tiêu chuẩn là phù hợp với vật liệu nhựa không gia cố, khi mà ứng xử phi tuyến của loại vật liệu này xảy ra rất sớm trong quá trình thí nghiệm. Đối với vật liệu GFRP ứng xử tuyến tính theo phương dọc thường được duy trì cho đến khi mẫu bị phá hoại [11]. Do đó nghiên cứu này sẽ sử dụng hai vùng giá trị của biến dạng để kiểm tra xem việc xác định modun cắt theo hai vùng khác nhau có cho kết quả khác biệt hay không. Tác giả lựa chọn vùng biến dạng từ 0,05% tới 0,25% (theo BS EN ISO 527-1) và 0,1% đến 0,5% (tác giả đề xuất). ASTM D3039 [10] đề xuất xác định modun đàn hồi E_L trong vùng biến dạng từ 0,1% đến 0,3%. Với hệ số nở ngang ν_{LT} , BS EN 527-1 [7] đề xuất sử dụng số liệu đo biến dạng từ 0,3% đến ε_y (biến dạng tại điểm chảy). Do vật liệu GFRP thường phá hoại giòn, nghĩa là biến dạng chảy chính là biến dạng tại thời điểm phá hủy và thường $>1\%$. Tác giả quyết định sử dụng vùng biến dạng từ 0,3% đến 0,5% cho BS EN 527-1. ASTM D3039 [10] đề xuất sử dụng vùng biến dạng cách nhau 0,1%, 0,2% hoặc 0,5%. Tác giả quyết định sử dụng vùng biến dạng 0,1% đến 0,3% cho ASTM D3039 (vùng biến dạng cách nhau 0,2%).

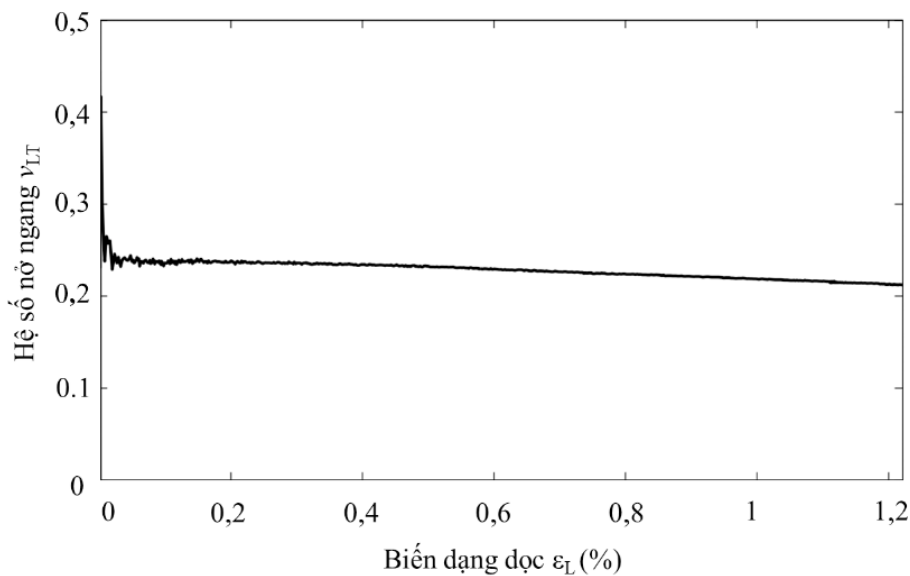
3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

Hình 6 là đồ thị mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong thí nghiệm kéo mẫu I-1-1. Có thể thấy rằng quan hệ ứng suất – biến dạng của vật liệu GFRP là gần như tuyến tính cho đến phá hoại cuối cùng của mẫu. Qua quan sát, tác giả nhận thấy phá hoại xảy ra đột ngột với tiếng nổ lớn từ việc đứt gãy sợi thủy tinh. Với mẫu trong Hình 6, mẫu phá hoại tại $\varepsilon_L = 1,2\%$, cường độ kéo đạt 399 MPa. Lưu ý rằng, mẫu phá hoại ở ứng suất 399 Mpa là tương đối cao và có thể so sánh với cường độ chảy của thép sử dụng trong kết cấu.



Hình 6. Mối quan hệ ứng suất – biến dạng.

Hình 7 là đồ thị thể hiện quan hệ giữa biến dạng theo phương dọc và hệ số nở ngang ($\nu_{LT} = -\epsilon_L / \epsilon_T$) cho cùng mẫu thí nghiệm I-1-1 (của Hình 6). Từ đồ thị, ta thấy rằng hệ số nở ngang giảm khi biến dạng theo phương dọc tăng. Theo đánh giá của tác giả, khi xét biến dạng theo hai phương dọc và ngang, thì rõ ràng phương ngang là phương yếu (không có các sợi thủy tinh đơn hướng), nên sự đóng góp của keo (matrix) vào độ cứng tổng thể của phương ngang là nhiều hơn so với phương dọc. Và từ Hình 6 mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng, rõ ràng biến dạng theo phương dọc bao gồm biến dạng của sợi thủy tinh và keo, trong đó sợi có mối quan hệ ứng suất, biến dạng là tuyến tính, còn của keo là phi tuyến [9]. Như vậy khi tải trọng tăng lên, biến dạng theo phương ngang ϵ_T tăng với tốc độ chậm hơn sự thay đổi của biến dạng theo phương dọc ϵ_L , nghĩa là hệ số nở ngang ν_{LT} sẽ giảm. Ngoài ra các vết vi nứt, hình thành trong quá trình gia tải có thể đóng góp vào sự suy giảm của hệ số nở ngang, tuy nhiên tác giả không có quan sát vật lý nào để xác nhận giả thiết này.



Hình 7. Mối quan hệ giữa biến dạng dọc với hệ số nở ngang.

Bảng 3-4 là kết quả của 54 thí nghiệm với các mẫu thí nghiệm được đánh mã số như trên bảng 1 và 2. Bảng 3-4 thể hiện giá trị trung bình, độ lệch chuẩn (SD), hệ số biến thiên (CV) của modun đàn hồi dọc E_L và hệ số nở ngang ν_{LT} tính toán theo hai tiêu chuẩn BS EN ISO và ASTM. E_L được xác định sử dụng hai vùng biến dạng là 0,05% - 0,25% và 0,1% - 0,5%. Kết quả khi sử dụng vùng biến dạng thấp (0,05-0,25%) cho giá trị E_L cao hơn từ 1 - 4%, và là không đáng kể. Ngoài ra E_L xác định bằng ASTM cũng cao hơn từ 1 - 3% so với xác định bằng BS EN ISO. Với ν_{LT} , thì giá trị này là 0,21 và 0,25 khi xác định bằng BS EN và là 0,21 - 0,26 với ASTM. Từ kết quả thí nghiệm, có thể thấy rằng sử dụng phương pháp của hai tiêu chuẩn BS EN ISO và ASTM cho kết quả tương đối gần nhau với chênh lệch không đáng kể. Ngoài ra sử dụng các vùng giá trị biến dạng khác nhau để xác định modun đàn hồi cho các kết quả với khác biệt rất nhỏ và có thể bỏ qua.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm xác định modun đàn hồi E_L của các mẫu trên dầm I và C1.

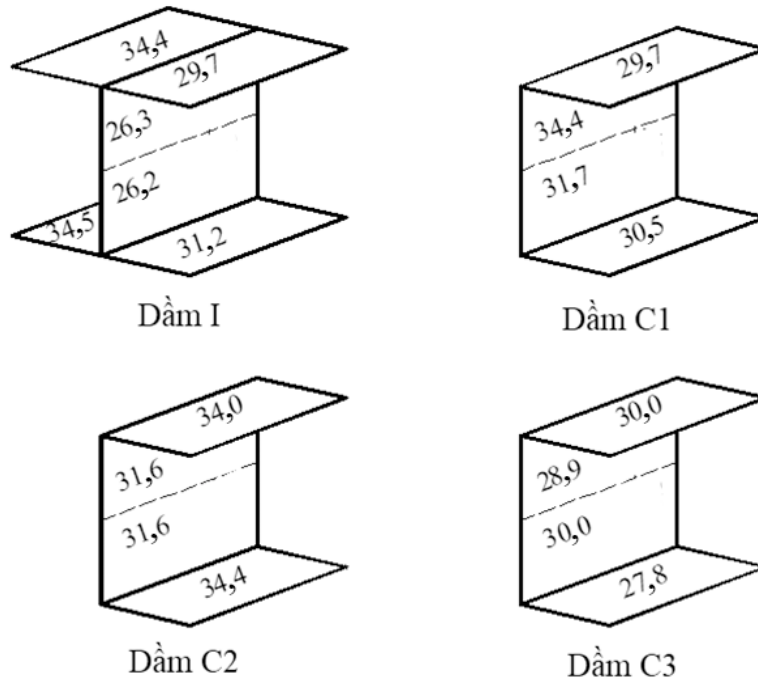
Tổ hợp mẫu		Dầm I			Dầm C1	
		I-1; I-3	I-2; I-4	I-5; I-6	C1-1; C-1-2	C1-3; C1-4
E_L (GPa)	Trung bình (GPa)	35,6	31,3	27,0	31,2	33,9
BS EN 527-1 (0,05%-0,25%)	Độ lệch chuẩn (GPa)	1,1	1,3	0,3	0,4	1,7
	Hệ số biến thiên (%)	3,1	4,1	1,2	1,1	5,1
E_L (GPa)	Trung bình (GPa)	34,5	30,5	26,3	30,1	33,1
BS EN 527-1 (0,1%-0,5%)	Độ lệch chuẩn (GPa)	0,7	1,0	0,4	0,6	1,6
	Hệ số biến thiên (%)	1,9	3,3	1,3	2,2	4,8
E_L (GPa)	Trung bình (GPa)	35,2	31,1	26,8	30,9	33,5
ASTM D3039 (0,1%-0,3%)	Độ lệch chuẩn (GPa)	0,9	1,1	0,4	0,4	1,7
	Hệ số biến thiên (%)	2,4	3,5	1,4	1,2	4,9

Bảng 4. Kết quả thí nghiệm xác định modun đàn hồi E_L của các mẫu trên dầm I và C1.

Tổ hợp mẫu		Dầm C2		Dầm C3	
		C2-1; C2-2	C2-3; C2-4	C3-1; C3-2	C3-3; C3-4
E_L (GPa)	Trung bình (GPa)	35,2	32,5	29,3	30,1
BS EN 527-1 (0,05%-0,25%)	Độ lệch chuẩn (GPa)	0,7	0,7	1,6	0,8
	Hệ số biến thiên (%)	1,9	2,2	5,5	2,6
E_L (GPa)	Trung bình (GPa)	34,2	31,6	28,9	29,4
BS EN 527-1 (0,1%-0,5%)	Độ lệch chuẩn (GPa)	0,5	0,7	1,5	0,7
	Hệ số biến thiên (%)	1,5	2,2	5,0	2,5
E_L (GPa)	Trung bình (GPa)	34,9	32,2	29,2	29,9
ASTM D3039 (0,1%-0,3%)	Độ lệch chuẩn (GPa)	0,6	0,7	1,5	0,7
	Hệ số biến thiên (%)	1,8	2,1	5,3	2,4

Sử dụng vùng biến dạng 0,1% - 0,5% và so sánh các giá trị modun đàn hồi trên bản cánh và bản bụng, có thể kết luận rằng bản cánh và bản bụng dầm có kiến trúc sợi khác nhau. Từ bảng 3, giá trị E_L trung bình của nhóm bản cánh I-1 và I-3 là 34,5 GPa trong khi đó E_L trung bình của nhóm bản cánh I-2 và I-4 là 30,5 GPa và của nhóm bản bụng I-5 và I-6 là 26,3 GPa. Như vậy không chỉ E_L của bản cánh và bản bụng có giá trị khác nhau rất lớn, mà trên thực tế giá trị E_L của bản cánh về khác phía so với trục bản bụng cũng khác nhau. Nguyên nhân sự khác biệt của E_L trên các bản cánh (về lý thuyết là có cùng kiến trúc sợi) theo tác giả là do quá trình sản xuất vật liệu GFRP. Nguyên nhân sai số do lỗi thí nghiệm được loại trừ do 6 mẫu thí nghiệm ở cùng một nhóm cho kết quả rất gần nhau. Đối với các dầm chữ C, tác giả nhận thấy khác biệt giữa bản cánh và bản bụng là ít hơn so với dầm I, với khác biệt là 10%, 8% và 2% tương ứng cho dầm C1, C2 và C3. Về lý thuyết, để thuận lợi cho việc đúc cấu kiện thì kiến trúc sợi của bản cánh và bản bụng dầm C là giống nhau. Sổ tay thiết kế của nhà sản xuất [10] cung cấp giá trị modun đàn hồi của vật liệu này là 23 GPa, thấp hơn nhiều so với giá trị thí

thí nghiệm (từ 27 - 43%). Hình 8 tổng hợp các giá trị đo modun đàn hồi theo phương dọc trên các bản cánh, bản bụng của các dầm I, C1, C2 và C3.



Hình 8. Modun đàn hồi theo phương dọc của dầm I, C1, C2 và C3.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày chi tiết phương pháp và kết quả xác định modun đàn hồi theo phương dọc E_L và hệ số nở ngang ν_{LT} theo tiêu chuẩn Anh và Châu Âu (BS EN ISO) và tiêu chuẩn Mỹ (ASTM). Các kết luận và kiến nghị được rút ra như sau:

- Kết quả thí nghiệm cho giá trị modun đàn hồi cao hơn nhiều so với giá trị đề xuất bởi nhà sản xuất (từ 27-43%). Việc này là dễ hiểu và phù hợp, đặc biệt là đảm bảo sự an toàn và độ tin cậy khi sử dụng modun đàn hồi với giá trị thấp hơn thực tế vào thiết kế.
- Cả tiêu chuẩn BS EN ISO và ASTM đều cho kết quả modun đàn hồi và hệ số nở ngang tương đối gần nhau. Việc sử dụng vùng giá trị biến dạng khác nhau (0,05% - 0,25% và 0,1% - 0,5%) cũng không mang lại nhiều khác biệt về giá trị xác định được. Tác giả đề xuất sử dụng vùng giá trị biến dạng thấp hơn (0,05% - 0,25%) khi xác định modun đàn hồi và hệ số nở ngang khi phân tích ứng xử mất ổn định (tổng thể hoặc cục bộ) do ứng xử này thường xảy ra ở vùng biến dạng thấp.
- Với dầm I giá trị E_L ở các vùng bản cánh đối xứng nhau qua trục bản bụng là khác nhau tương đối lớn, lên đến 13,3%. Lý do lỗi thí nghiệm được loại trừ, do kết quả trên 6 mẫu cùng phía chỉ khác nhau chưa đến 3%. Kết quả này có thể là phổ biến đối với vật liệu GFRP do quá trình sản xuất.
- Hệ số nở ngang xác định từ thí nghiệm là từ 0,225 – 0,237 là gần bằng hệ số nở ngang 0,23 theo đề xuất của nhà sản xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. C. Bank, Composites for Construction. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006. <https://doi.org/10.1002/9780470121429>
- [2] FRP Beam used in Vehicular Bridge Superstructure, Strongwell, <https://www.strongwell.com/case-study-frp-beam-used-in-vehicular-bridge-superstructure/>), truy cập ngày 10 tháng 10 năm 2022.
- [3] FRP Reinforcement for Concrete Bridge Decks, Strongwell, <https://www.strongwell.com/markets/infrastructure/>), truy cập ngày 10 tháng 10 năm 2022.
- [4] ASCE, Pre-standard for load and resistance factor design (LRFD) of pultruded fiber reinforced polymer (FRP) structures, Arlington, VA, USA, 2010.
- [5] J. T. Mottram, J. Henderson, FRP Bridges - Guidance for Designers. London: CÍRIA, 2018.
- [6] T. T. Nguyen, T. M. Chan, J. T. Mottram, Influence of boundary conditions and geometric imperfections on lateral-torsional buckling resistance of a pultruded FRP I-beam by FEA, Compos Struct, 100 (2013) 233–242. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2012.12.023>
- [7] ISO 527-1, Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles, 2019.
- [8] ISO 527-4, Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions of tensile properties. 2021.
- [9] ASTM, Standard test method for tensile properties of plastics D638, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2014.
- [10] ASTM, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials D3039/D3039M-17, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.
- [11] W. P. Stoddard, Lateral-torsional buckling behavior of polymer composite I-shaped members, Georgia Institute of Technology, USA, 1997.
- [12] Anon, Fiberline Design Manual, Middelfart, Denmark, 2014.
- [13] Anon, Strongwell design manual, Bristol, VA, USA, Strongwell Corp, 2014.