

Ứng xử uốn của dầm bê tông sợi thép cấp độ bền B25: thí nghiệm và mô hình

Flexural behavior of steel fiber concrete beam specimen graded B25: experiment and model

> LÊ THANH PHONG, LÊ ANH THẮNG, NGUYỄN QUANG TÙNG

Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật Thành Phố Hồ Chí Minh

TÓM TẮT:

Thí nghiệm và mô hình mô phỏng dầm bê tông cốt sợi thép (SFRC) chịu uốn ba điểm theo EN 14651:2005 được nghiên cứu trong bài báo này. Sợi thép loại Dramix 4D có hàm lượng sợi khác nhau (0, 20, 30, và 40 kg/m³) được sử dụng cho các dầm bê tông cấp độ bền B25. Mẫu thí nghiệm có kích thước 150 x 150 x 600 mm. Kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ của dầm bê tông giảm đáng kể sau khi đạt giá trị cường độ tối đa. Trong khi đó, cường độ uốn của dầm bê tông sợi thép được cải thiện rõ rệt so với trường hợp không sợi thép. Với cùng một loại sợi, hàm lượng của sợi thép trong một khối tích bê tông được coi là một trong những yếu tố quan trọng để cải thiện độ dẻo dai khi uốn. Mô hình mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn đã cho kết quả phù hợp với thí nghiệm. Thông qua mô hình, cường độ và ứng xử của bê tông SFRC đã được phân tích và thảo luận thêm.

Từ khóa: bê tông sợi, sợi thép, mô phỏng bê tông sợi, ứng xử cơ học

ABSTRACT:

Experiments and simulation models of steel fiber reinforced concrete beams (SFRC) subjected to three-point bending according to EN 14651: 2005 are studied in this paper. Dramix 4D steel fibers with different fiber content (0, 20, 30, and 40 kg / m³) are used for concrete beams of B25 grade. The test sample is 150 x 150 x 600 mm. Experimental results show that the flexural strength of concrete beams decreases significantly after reaching the maximum strength value. Meanwhile, the flexural strength of steel fiber concrete beams is significantly improved compared to the case without steel fibers. With the same fiber type, the content of the steel fiber in a concrete volume is considered one of the important factors for improving the flexural toughness. Simulation model by finite element method has given results consistent with the experiment. Through modeling, flexural strength and the behavior of SFRC concrete were further analyzed and discussed.

Key word: fiber concrete, steel fiber, fiber concrete simulation, mechanical behavior

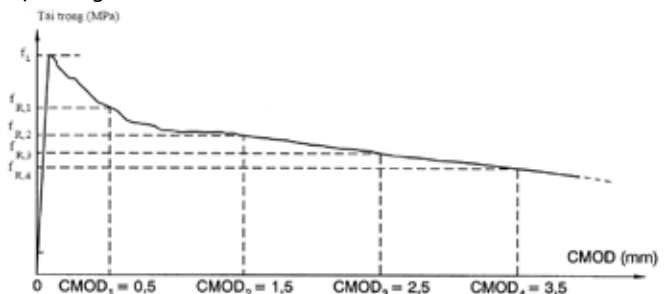
1. Đặt vấn đề

Bê tông là vật liệu giòn. Gia cố bê tông bằng các sợi ngắn, phân bố ngẫu nhiên, có thể giúp tăng được độ dẻo dai của bê tông. Sợi có thể giúp bê tông nền gốc xi măng ngăn chặn, kiểm soát sự hình thành và lan truyền các vết nứt [1]. Kết cấu bê tông có gia cường sợi thép được gọi là kết cấu bê tông sợi thép (SFRC). SFRC được ứng dụng rất đa dạng. Sau đây là một số ứng dụng bê tông sợi thép [2]:

- Lợp phủ hoặc lợp kết cấu cho sân bay, đường cao tốc: SFRC giúp giảm độ dày của tấm.
- Sàn công nghiệp: sàn chống va đập.
- Bê tông chịu lửa: sử dụng xi măng có hàm lượng nhôm cao.
- Bần mặt cầu: SFRC là lợp phủ hoặc lợp mặt cầu, lợp liên tục nhịp, hỗ trợ cho lợp kết cấu chính, bần mặt cầu bê tông cốt thép bên dưới.
- Lợp lót: lợp chạy ngầm trong hầm mỏ và đường hầm.
- Lợp phủ: lợp phủ trên bề mặt mái dốc đất hoặc đá.
- Kết cấu vỏ mỏng: kết cấu vòm.
- Kết cấu chống cháy nổ: sợi thép được kết hợp với các thép thanh trong bê tông cốt thép.
- Kết cấu chống động đất.

Với nhiều ứng dụng như kể ở trên, bê tông sợi thép cần được nghiên cứu thực nghiệm nhiều hơn ở Việt Nam. Để thấy được ứng xử dẻo dai của SFRC sau khi đạt giá trị cường độ giới hạn (f_t), SFRC có thể được thử nghiệm theo EN 14651:2005 [3]. Bài báo này đã thực hiện nghiên cứu theo EN 14651:2005 cho bê tông sợi thép loại Dramix 4D và bê tông cấp độ bền B25.

Theo EN 14651:2005, ứng xử dẻo dai của SFRC được đánh giá thông qua các giá trị cường độ dư (f_R) như trong Hình 1. Các giá trị này được xác định tương ứng với CMOD lần lượt bằng 0,5 mm; 1,5 mm; 2,5 mm; và 3,5 mm. Giá trị cường độ giới hạn (f_t) cũng được thể hiện trong Hình 1.



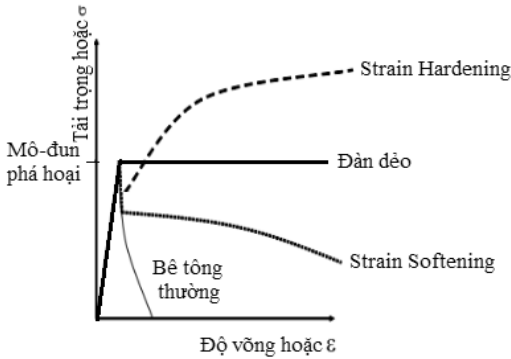
Hình 1. Biểu đồ cường độ và CMOD

Trong phần thực nghiệm, các giá trị cường độ giới hạn (f_t) và giá trị cường độ dư (f_R) sẽ được xác định cho các hàm lượng sợi khác nhau. Sự phân bố sợi thép trên mặt cắt của mẫu thí nghiệm và đặc tính của sợi sẽ quyết định dạng ứng xử dẻo sau khi đạt cường độ giới hạn của mẫu [4]. Ứng xử trong quá trình phát triển vết nứt

của mẫu có thể được thể hiện thông qua mối liên hệ giữa tải trọng và độ võng, hay mối liên hệ giữa cường độ kéo uốn (f) và độ mở rộng miệng vết nứt (CMOD).

Hình 2 cho thấy cường độ chịu kéo-uốn của dầm bê tông không sợi thép giảm nhanh chóng sau khi đạt giá trị giới hạn (f_L), khi tăng độ võng dầm (hay tăng CMOD). Tuy nhiên, xu hướng này giảm và phẳng hơn đối với dầm sợi thép. Trong SFRC, sợi chủ yếu ảnh hưởng đến giai đoạn thay đổi cường độ sau khi đạt được cường độ giới hạn (cường độ đỉnh f_L) của SFRC. Sợi sẽ duy trì cường độ bằng cách ngăn cản sự mở rộng vết nứt vĩ. Do đó, năng lượng uốn của bê tông sợi thép sẽ cao hơn nhiều so với bê tông không có sợi thép.

Hình 2 cũng thể hiện các dạng ứng xử có thể có của bê tông sợi thép sau khi đạt đến giá trị tải giới hạn, vị trí mô-đun độ cứng thay đổi một cách rõ ràng (Modulus of Rupture). Ta có thể thấy có ba trường hợp ứng xử cụ thể. Trường hợp 1 là trường hợp tải bền “Strain Hardening”, đường cong mối quan hệ giữa tải trọng và độ võng đi lên. Trường hợp 2 là trường hợp đàn dẻo “Elasto-Plastic”, đường cong mối quan hệ giữa tải trọng và độ võng có khuynh hướng được duy trì. Trường hợp 3 là trường hợp “Strain Softening”, đường cong mối quan hệ giữa tải trọng và độ võng có bước nhảy và dẫn đi xuống.



Hình 2. Ứng xử điển hình của bê tông sợi thép

Mô phỏng số được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn trên môi trường ABAQUS [5]. Ta có hai cách tiếp cận để mô hình hóa ứng xử của kết cấu SFRC sau khi đạt cường độ giới hạn. Mô hình dựa trên mối liên hệ giữa ứng suất-biến dạng, và giữa ứng suất và độ mở rộng vết nứt ($\sigma - CMOD$). Quá trình mô phỏng ứng xử thực tế có được từ thực nghiệm là quá trình tính toán ngược. Mối quan hệ $\sigma - CMOD$ sau khi mẫu đạt giá trị đỉnh f_L , được đề xuất bởi RILEM TC 162-TDF [6], sẽ được bình luận và phân tích.

2. Thí nghiệm

Tất cả các mẫu thí nghiệm đều được tạo bằng xi măng poóc lăng thông thường, PC40. Đá dăm có kích thước lớn nhất là 20 mm, trọng lượng riêng là 2,70 T/m³, được sử dụng làm cốt liệu thô. Cát sử dụng là cát sông có trọng lượng riêng 2,65 T/m³, được sử dụng làm cốt liệu mịn. Cấp độ bền của bê tông thiết kế là B25. Cấp độ bền này được chọn cho nghiên cứu vì yếu tố kinh tế, dễ áp dụng vào thực tế trong điều kiện ở Việt Nam.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của sợi thép

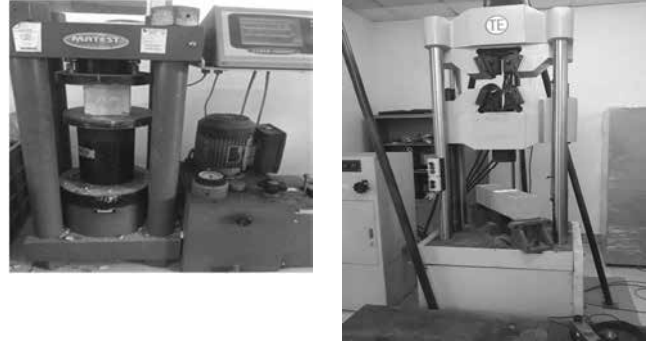
TT	Thông số kỹ thuật của sợi thép	Loại sợi thép
		Dramix 4D 65/60BG
1	Hình dạng sợi, tiết diện ngang của sợi	Sợi tròn 2 đầu neo
2	Số lượng sợi (sợi /kg)	8.600
3	Chiều dài sợi (mm)	60
4	Đường kính sợi, đường kính tương đương (mm)	0.92
5	Tỷ lệ hướng sợi	50
6	Cường độ chịu kéo (daN/cm ²)	>10.000

Sợi thép dùng trong thí nghiệm sử dụng sợi thép ký hiệu Dramix 4D 65/60BG (Hình 3), đường kính sợi 0,92mm, chiều dài sợi 60mm, cường độ lớn hơn 1000Mpa. Sợi thép đáp ứng yêu cầu của tiêu chuẩn EN 14889-1. Thông số kỹ thuật của sợi thép được thể hiện tóm tắt ở trong Bảng 1.



Hình 3. Sợi thép 4D Dramix

Trong nghiên cứu này, bê tông sử dụng các hàm lượng sợi thép khác nhau, lần lượt là 0, 20, 30, và 40 kg/m³. Mỗi hàm lượng sợi đúc 6 dầm. Thiết bị thí nghiệm mẫu bê tông là loại 3000 kN – Matest, được sử dụng để kiểm tra mẫu bê tông nền. Thiết bị thử kéo uốn của mẫu dầm là máy kéo nén đa năng loại TE như ở Hình 4. Bề rộng khe nứt (CMOD) được ghi nhận bởi “TML PI-2-50 Crack Meter”. Dữ liệu về sự mở rộng tại miệng vết nứt (CMOD) được đồng bộ với tải trọng thông qua một dụng cụ gọi là Datalogger.



Hình 4. Thiết bị thí nghiệm

3. Kết quả thí nghiệm

Bảng 2 tóm tắt kết quả thí nghiệm của bê tông cấp độ bền B25 cho các trường hợp không có sợi thép và có sợi thép ở các hàm lượng sợi khác nhau. Cường độ chịu nén của các mẫu thử có hoặc không có sợi thép đều đạt hơn 30 MPa. Trong Bảng 2, ($f_{R,3}$) là cường độ chịu kéo dư của bê tông SFRC ứng với bề rộng vết nứt là 2,5mm (theo EN 14651:2005). (f_L) là cường độ giới hạn của SFRC khi vết nứt bắt đầu phát triển và mô-đun của mẫu bắt đầu thay đổi mạnh.

Chúng ta có thể thấy rõ rằng cường độ chịu kéo dư ($f_{R,3}$) của bê tông sợi lớn hơn của bê tông không có sợi (Hình 5). Hơn nữa, ứng xử sau cường độ giới hạn (f_L) của SFRC phụ thuộc nhiều vào hình dạng (Dramix 4D) và hàm lượng của sợi thêm vào bê tông. Cùng một loại sợi và cùng một cấp độ bền của bê tông nền, ứng xử sau khi nứt của SFRC có cả hai dạng rõ rệt là “Strain Hardening” và “Strain Softening”. Trường hợp “Strain Hardening” là tương ứng với hàm lượng sợi từ 30 kg/m³ trở lên. Trường hợp “Strain Softening” là tương ứng với hàm lượng sợi 20 kg/m³.

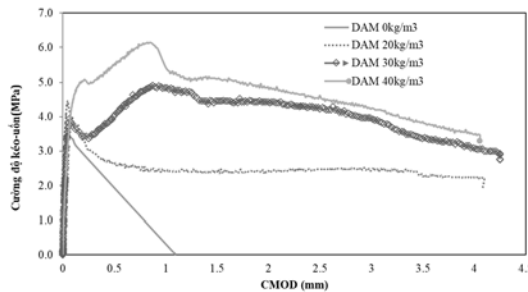
Bảng 2 thể hiện cường độ chịu tải uốn (f_L) và cường độ chịu tải dư (f_R) đều tăng theo sự gia tăng của hàm lượng sợi. (f_L) là (3,48 MPa), (4,22 MPa), (4,62 MPa) và (5,24 MPa) tương ứng với hàm lượng sợi thép lần lượt là 0 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³ và 40 kg/m³. Trong khi đó, khả năng chịu lực uốn ứng với CMOD = 2,5mm ($f_{R,3}$) lần lượt là (0 MPa), (2,73 MPa), (4,13 MPa) và (4,85 MPa) cho hàm lượng sợi lần lượt là 0 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³ và 40 kg/m³.

Đặc biệt Hình 5 và Bảng 2 cho thấy khả năng duy trì cường độ dư (tỷ số $f_{R,3}/f_L$) là cao hơn 60% (khoảng 60% - 90% giá trị (f_L), ứng với bề rộng vết nứt là 2,5mm). Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng sợi thép đã giúp cải thiện đáng kể độ dẻo của bê tông truyền thống. Cường độ uốn dư có thể được

duy trì đến khi bề rộng vết nứt phát triển quá giá trị 3,5 mm, với 3,5 mm là giá trị giới hạn của thí nghiệm, quy định trong EN 14651:2005 [3].

Bảng 2. kết quả thí nghiệm nén, uốn dầm

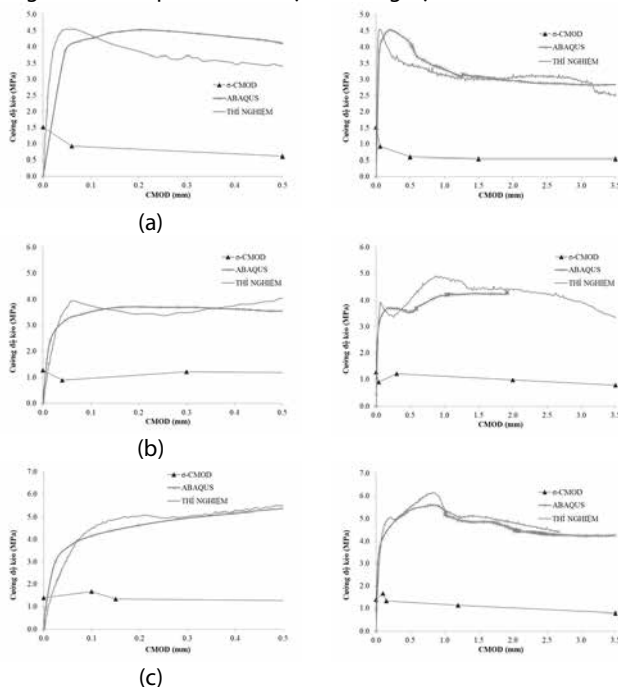
	Hàm lượng sợi(kg/m ³)			
	0	20	30	40
Cường độ nén mẫu	32	31	33	33
$f_{R,3}$ (MPa)	-	2.73	4.13	4.85
f_L (MPa)	3.48	4.22	4.62	5.24
$f_{R,3} / f_L$ (%)	0	65	89	93



Hình 5. Mối quan hệ giữa cường độ kéo và CMOD

3. Kết quả mô phỏng

Hình 6 thể hiện kết quả so sánh giữa thí nghiệm và mô phỏng bằng mô hình. Đường cong thể hiện mối quan hệ của cường độ uốn và CMOD được thể hiện khoảng 0–0,5 mm và 0–3,5 mm. Hình 6 cũng đồng thời thể hiện mối quan hệ giữa ứng suất kéo trong mô hình và CMOD. Mối quan hệ này có được từ việc tính toán ngược thông qua mô hình mô phỏng. Nhìn chung, chúng ta có thể thấy được sự phù hợp về kết quả giữa mô hình phần tử hữu hạn và thí nghiệm.



Hình 6. So sánh cường độ kéo và CMOD giữa thí nghiệm và mô phỏng, mối liên hệ giữa ứng suất kéo uốn và CMOD: (a) 20 kg/m³, (b) 30 kg/m³, (c) 40 kg/m³.

Đường cong thể hiện mối quan hệ giữa cường độ kéo uốn và CMOD có thể được chia thành bốn giai đoạn. Giai đoạn 1 là giai đoạn đàn hồi tính, lúc bắt đầu gia tải đến khi xuất hiện vết nứt đầu tiên, độ cứng không đổi. Giai đoạn 2 là giai đoạn phát triển vết nứt đầu tiên. Độ cứng của dầm giảm từ từ, khi tải trọng tăng, cho đến khi chiều dài vết nứt đạt khoảng 40% chiều cao dầm. Giai đoạn 3 là giai đoạn phát triển vết nứt thứ hai. Độ cứng giảm một cách đáng kể, khi

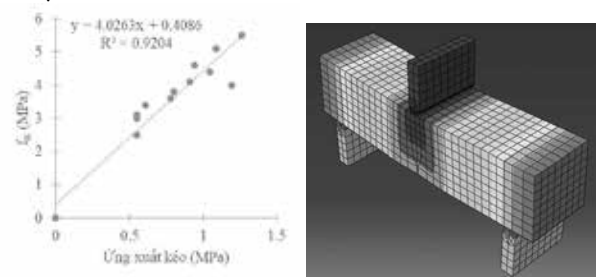
tiếp tục tăng tải trọng, cho đến khi tải trọng đạt giá trị tải trọng đỉnh (tương ứng với f_L), độ cứng bằng không. Giai đoạn 4 là giai đoạn khả năng chịu tải bắt đầu giảm, với độ cứng âm.

Kết quả được thể hiện trong khoảng 0–0,5 mm cho thấy mô hình đã có thể sắp xỉ gần đúng kết quả thực nghiệm ở cả ba hàm lượng sợi khác nhau. Giá trị f_L đạt được khi CMOD nằm trong khoảng từ 0,025 đến 0,25 mm tùy theo hàm lượng sợi.

Đường cong mối quan hệ giữa cường độ kéo uốn và CMOD, thể hiện trong khoảng 0–3,5 mm, được mô phỏng khá tốt. Đặc biệt là giai đoạn cường độ chịu kéo dư, giai đoạn sau giá trị đỉnh (f_L) kết quả mô phỏng ôm sát với đường thực nghiệm.

Hình 6 cũng cho thấy mô hình mô phỏng có thể đáp ứng tốt được các ứng xử có thể có của SFRC, bao gồm cả ứng xử "Strain Hardening" và "Strain Softening". Chúng ta cũng có thể thấy sự biến thiên của cường độ chịu kéo dư (f_R) theo CMOD là khá tương đồng với sự biến thiên của ứng suất kéo uốn theo CMOD.

Hình 7 thể hiện mối liên hệ giữa cường độ kéo dư (f_R) và ứng suất kéo uốn có được từ quá trình mô phỏng. Hệ số của phương trình hồi quy R^2 đạt lớn hơn 0,9. Điều này cho thấy có mối quan hệ giữa cường độ kéo dư (f_R) và ứng suất kéo uốn, tương ứng theo các giá trị của CMOD. Mối liên hệ này không phụ thuộc vào hàm lượng sợi mà sẽ phụ thuộc vào kích thước mẫu và cách mô hình.



Hình 7. Mối liên hệ giữa khả năng chịu tải dư f_R và ứng suất kéo.

4. Kết luận

Kết quả thí nghiệm độ bền uốn (thử nghiệm uốn ba điểm trên mẫu dầm có vết nứt được tạo trước ở giữa dầm) cho thấy ứng xử của bê tông thay đổi nhiều khi có sợi thép; cường độ chịu kéo uốn được tăng lên cùng với sự gia tăng của hàm lượng sợi thép.

Chúng ta có thể mô phỏng tốt được kết quả thực nghiệm bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Sử dụng mối quan hệ giữa ứng suất kéo uốn và CMOD, chúng ta có thể mô phỏng được mọi dạng ứng xử uốn trong thí nghiệm uốn ba điểm của dầm SFRC.

Chúng ta có thể thấy rằng giữa cường độ chịu kéo dư (f_R) và ứng suất kéo, tương ứng với các giá trị CMOD (quy định theo EN 14651:2005), là có sự phụ thuộc nhau. Mối liên hệ này không phụ thuộc vào hàm lượng sợi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bentur, A., & Mindess, S. (2006). "Fibre reinforced cementitious composites". CRC Press.
- [2] ACI 544.3R-93. (1998). "Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete".
- [3] EN 14651:2005 E (2005). "Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)".
- [4] ACI 544.1R-96. (2002). "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete".
- [5] ABAQUS 6.12 "Abaqus/CAE User's Manual". (2011). Internet Manual. Simulia. Retrieved.
- [6] Vandewalle, L., Nemegeer, D., Balazs, L., Barr, B., Barros, J., Bartos, P., ... & Walraven, J. (2003). "RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete -sigma-epsilon-design method-Final Recommendation." Materials and Structures, 36(262), 560-567.