

XÂY DỰNG MÔ HÌNH XÁC ĐỊNH SỨC KHÁNG CẮT CỦA DẦM SANDWICH BẰNG BÊ TÔNG CỐT LƯỚI DỆT VÀ BÊ TÔNG NHẸ THEO PHƯƠNG PHÁP SƠ ĐỒ HỆ THANH

DEVELOPMENT OF AN ANALYTICAL MODEL FOR THE SHEAR STRENGTH OF SANDWICH BEAMS USING TEXTILE-REINFORCED CONCRETE AND LIGHTWEIGHT CONCRETE BASED ON THE STRUT-AND-TIE METHOD

TS. Vũ Văn Hiệp - ThS. Đặng Việt Tuấn - Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Đại học Giao thông vận tải
Tác giả liên hệ, email: dangviettu@utc.edu.vn

Tóm tắt: Việc nghiên cứu và phát triển các kết cấu nhẹ đang được ưu tiên trong ngành Xây dựng, đặc biệt là việc sử dụng kết hợp tối ưu giữa vật liệu cường độ cao và vật liệu nhẹ. Trong đó, dầm sandwich là một dạng kết cấu điển hình. Bê tông cốt lưới dệt (BTCLD), với những ưu điểm vượt trội, được phát triển làm lớp vỏ chịu lực trong kết cấu sandwich. Khi kết hợp với bê tông nhẹ (BTN-K), kết cấu sandwich có khả năng chịu lực cao, bền vững với môi trường và trọng lượng nhẹ. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng mô hình xác định sức kháng cắt cho kết cấu sandwich bằng BTCLD và bê tông nhẹ. Mô hình tính toán sức kháng cắt của dầm sandwich theo phương pháp sơ đồ hệ thanh đã phản ánh được ảnh hưởng của các yếu tố như cường độ của BTCLD, BTN-K và tính chất dính bám giữa các lớp vật liệu. Mô hình này cũng đã được kiểm chứng với kết quả thực nghiệm, cho thấy độ sai lệch dưới 9,3% so với kết quả thực tế, chứng tỏ mô hình tính toán là tin cậy và phù hợp với kết cấu sandwich sử dụng BTCLD và BTN-K.

Từ khóa: Dầm sandwich, bê tông cốt lưới dệt, BTCLD, bê tông nhẹ, sức kháng cắt, mô hình hệ thanh ...

1. GIỚI THIỆU CHUNG

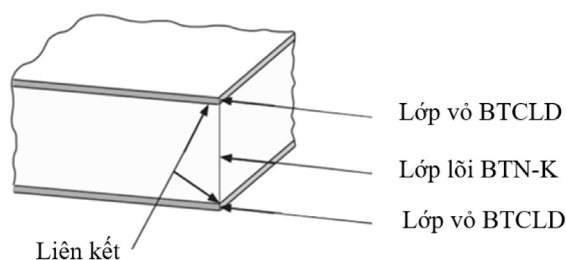
Kết cấu sandwich là dạng kết cấu có nhiều lớp, các lớp mặt được làm từ vật liệu có cường độ cao và lớp lõi thường được làm từ vật liệu nhẹ có cường độ thấp (Hình 1). Với cấu trúc dạng này, kết cấu sandwich có khả năng chịu lực cao, độ cứng lớn nhưng trọng lượng nhỏ, rất phù hợp cho các kết cấu chịu uốn. Để khai thác hiệu quả kết cấu sandwich, nhiều nghiên cứu đã phát triển loại vật liệu có cường độ cao và bền vững với môi trường làm lớp vỏ cho kết cấu sandwich. Trong đó, BTCLD là một sản phẩm đáp ứng được xu hướng phát triển này.

BTCLD là một dạng vật liệu composite được tạo thành từ hai thành phần chính là bê tông hạt mịn và cốt lưới dệt [8]. Bê tông hạt mịn (BTHM) là một loại bê tông xi măng có cốt liệu nhỏ và cốt lưới dệt là một hệ thống lưới với các bó sợi từ carbon, thủy tinh, v.v [10]. Với thành phần cốt liệu có đường kính nhỏ (dưới 1mm), BTHM có thể phát huy được thế

Abstract: The study and development of lightweight structures are prioritized in the construction industry, particularly through the optimal combination of high-strength and lightweight materials. Sandwich beams are a typical example of such a structure. Textile-reinforced concrete (TRC), with its outstanding advantages, has been developed as a load-bearing shell in sandwich structures. When combined with lightweight concrete (LC), a sandwich structure with high load-bearing capacity, environmental sustainability, and low weight is created. This paper presents the findings of research into developing a model to determine the shear strength of sandwich structures made of textile-reinforced concrete and lightweight concrete. The shear strength calculation model for sandwich beams based on the strut-and-tie method reflects the influence of the strength of TRC, LC, and the bonding properties between material layers. The model has been validated with experimental results, showing a deviation of less than 9.3%, confirming its reliability and suitability for sandwich structures using TRC and LC.

Keywords: Textile reinforced concrete, TRC, lightweight concrete, sandwich panel, shear, strut-and-tie method...

mạnh của cốt lưới dệt có cường độ rất cao. Ngoài ra, BTCLD cũng rất phù hợp sử dụng trong kết cấu có chiều dày nhỏ với yêu cầu lớp bảo vệ rất nhỏ.



Hình 1. Kết cấu sandwich có lớp vỏ bằng BTCLD và lớp lõi bằng BTN-K

Một số nghiên cứu đã cho thấy, BTCLD, khi được sử dụng làm lớp vỏ kết hợp với lớp lõi bằng vật liệu nhẹ như bọt xốp polystyrene [4], bê tông xốp [7] đã tạo ra kết cấu sandwich có trọng lượng nhỏ, có khả năng cách âm và cách nhiệt tốt. Tuy

nhiên, các dạng kết cấu sandwich này thường có khả năng chịu lực không cao do lớp lõi có cường độ và độ cứng thấp. Nhằm tăng khả năng chịu lực cho kết cấu sandwich, vật liệu lớp lõi cần có cường độ và mô đun đàn hồi tương đối lớn. Bê tông nhẹ sử dụng cốt liệu nhẹ keramzit (BTN-K) là một vật liệu có những đặc điểm phù hợp với yêu cầu của lớp lõi cho kết cấu sandwich có khả năng chịu lực lớn được sử dụng làm dầm, panel sàn và panel tường trong công trình xây dựng.

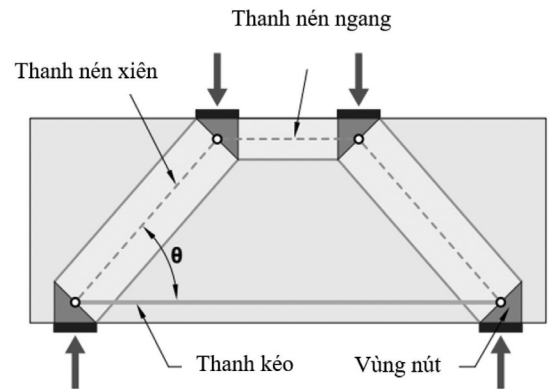
Khi nghiên cứu ứng xử chịu cắt của kết cấu sandwich, do các lớp vỏ có chiều dày khá nhỏ nên, hầu hết các nghiên cứu đều, một cách gần đúng, coi khả năng chịu cắt của kết cấu sandwich bằng khả năng chịu cắt của lớp lõi. Hiện nay, sức kháng cắt của kết cấu sandwich được tính gần đúng theo sức kháng cắt của kết cấu bê tông được chỉ dẫn trong một số tiêu chuẩn như ACI 318-19 [2], TCVN 11823-2017 [6]. Phương pháp tính toán này tương đối đơn giản nhưng độ chính xác không cao khi áp dụng cho kết cấu nhiều lớp. Nhằm tìm ra mô hình tính toán ứng xử chịu cắt của kết cấu sandwich có độ tin cậy, hướng nghiên cứu được lựa chọn ở đây là dựa trên sự phân bố các trường ứng suất trong kết cấu sandwich. Ứng xử chịu cắt của kết cấu sandwich phụ thuộc vào khả năng tiếp nhận và truyền ứng suất trong các lớp vật liệu và giữa các lớp vật liệu với nhau. Để xét đến các yếu tố này, phương pháp sơ đồ hệ thanh được đề xuất tính toán sức kháng cắt của dầm sandwich bằng BTCLD và BTN-K.

2. MÔ HÌNH HOÁ KẾT CẤU SANDWICH BẰNG BTCLD VÀ BTN-K THEO PHƯƠNG PHÁP SƠ ĐỒ HỆ THANH

2.1. Phương pháp sơ đồ hệ thanh

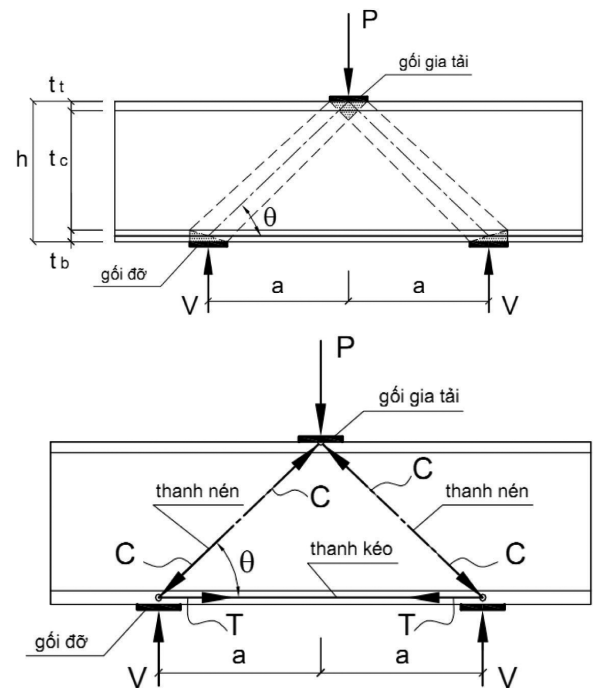
Phương pháp sơ đồ hệ thanh là phương pháp được xây dựng để tính toán các khu vực có trường ứng suất biến đổi hỗn loạn, ở đó, các lý thuyết dầm hay mặt cắt phẳng của Bernoulli không còn được áp dụng hợp lý. Tiêu chuẩn ACI-318-19 [2] đã đề xuất mô hình tính toán sức kháng cắt cho dầm ngăn theo phương pháp sơ đồ hệ thanh như Hình 2.

Đối với kết cấu bê tông cốt thép thường, các thanh nén được mô hình hóa bằng thanh bê tông chịu nén trong dầm. Tuy nhiên, với dầm sandwich có nhiều lớp vật liệu, trường ứng suất nén được truyền qua các lớp vật liệu khác nhau. Vì vậy trong dầm sandwich, thanh nén được mô hình hóa từ các thành phần vật liệu, mà ở đó, có sự truyền ứng suất nén qua. Các thanh kéo thường bỏ qua khả năng chịu kéo của bê tông nên thanh kéo đều được mô hình hóa từ cốt chịu lực. Do đó, các thanh kéo trong dầm sandwich được mô hình hóa từ cốt lưới dệt chịu kéo. Việc xây dựng mô hình kết cấu sandwich chịu cắt được xây dựng trên mô hình dầm ngăn



Hình 2. Mô hình hệ thanh của dầm ngăn theo ACI-318-19 [2]

nhằm đánh giá sự phá hoại của kết cấu do yếu tố chịu cắt là chủ yếu. Mô hình hóa kết cấu sandwich theo phương pháp sơ đồ hệ thanh được biểu diễn trên Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ hệ thanh trong kết cấu sandwich

Từ các phương trình cân bằng lực, sức kháng cắt của dầm sandwich được xác định thông qua phản lực ở gối đỡ:

$$V = \frac{P}{2} = C \sin \theta = T \tan \theta \quad (1)$$

Với T và C lần lượt là lực dọc trục trong thanh kéo và thanh nén. Sức kháng cắt của kết cấu sandwich (V) phụ thuộc vào sức kháng của thanh kéo, thanh nén, vùng nút.

2.2. Sức kháng của các thanh

2.2.1. Sức kháng của thanh kéo

Thanh kéo trong mô hình nghiên cứu này là

BTCLD. Bỏ qua sự làm việc chịu kéo của BTHM, sức kháng của thanh kéo được xác định bằng khả năng chịu kéo của cốt lưới dệt.

$$T = A_f f_f \quad (2)$$

Với A_f, f_f là diện tích và cường độ chịu kéo của cốt lưới dệt.

2.2.2. Sức kháng của thanh nén

Sức kháng của thanh nén được xác định theo đề xuất của một số nghiên cứu như sau:

* Theo tiêu chuẩn ACI 318-19 [2], sức kháng của thanh nén được tính bằng:

$$F_{ns} = 0,85 \beta_s \beta_c f'_c A_{cs} \quad (3)$$

Trong đó:

A_{cs} là diện tích của thanh nén,

f'_c là cường độ chịu nén của bê tông,

β_c là hệ số xét đến hiệu ứng kiểm chế đối với thanh nén và nút,

β_s là hệ số xét đến ảnh hưởng của sự xuất hiện vết nứt và cốt chịu lực kiểm chế nở ngang cho bê tông ở thanh nén.

* Theo Foster [3], sức kháng của thanh nén được tính bằng:

$$C_n = \nu f'_c A_{cs} / \gamma_c \quad (4)$$

$$\text{Với } \nu = 1,25 - \frac{f'_c}{500} - 0,72 \left(\frac{a}{d} \right) + 0,18 \left(\frac{a}{d} \right)^2 \quad (5)$$

Trong đó:

d là chiều cao có hiệu của mặt cắt sandwich,

a là khoảng cách từ điểm đặt tải đến gối,

γ_c là hệ số độ tin cậy,

* Theo Spetch [5], sức kháng của thanh nén được tính bằng:

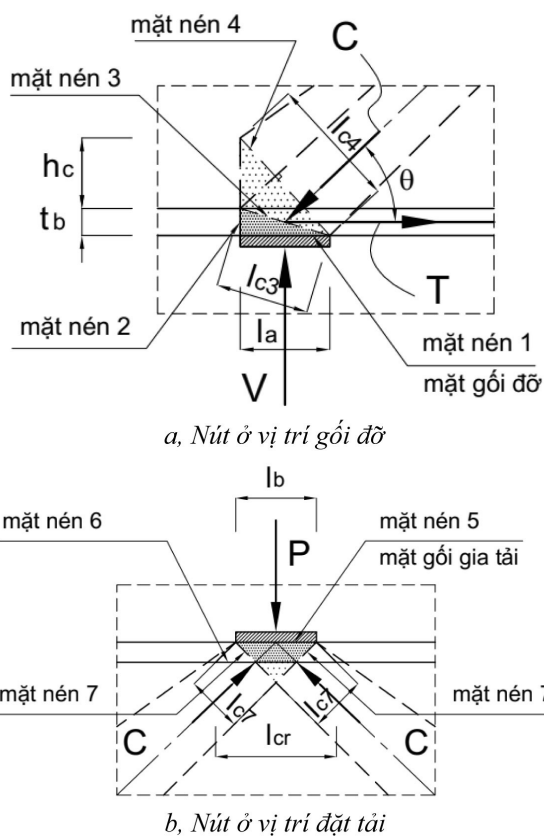
$$C_n = \beta \frac{0,85 f'_c A_{cs}}{\gamma_c} \quad (6)$$

2.3. Cấu tạo và sức kháng của vùng nút

Nút là vùng bê tông thể hiện nơi giao nhau giữa các thanh, được sử dụng để mô hình hóa các khu vực chuyển hướng của nội lực hay ứng suất. Kích thước của vùng nút được xác định trên cơ sở thỏa mãn điều kiện chịu lực của bản thân vùng nút cũng như kích thước yêu cầu của các thanh đi qua nút đó. Trong kết cấu sandwich, ở vùng nút có sự tham gia của cả BTHM và BTN-K nên vùng nút được mô hình hóa có xét đến sự tương tác giữa 2 thành phần vật liệu này. Cấu tạo của vùng nút được thể hiện trên Hình 4.

2.3.1. Nút gối

Nút tại gối là nơi giao nhau của lực kéo trong cốt lưới dệt, lực nén trong BTN-K và phản lực tại gối. Vì vậy, trong trường hợp cốt lưới dệt được neo chắc chắn vào bê tông thông qua việc đảm bảo chiều dài dính bám, nút sẽ có dạng như Hình 4a và được điều



Hình 4. Sơ đồ hệ thanh trong kết cấu sandwich

chỉnh để phù hợp với cấu tạo của kết cấu sandwich. Trong đó, kích thước của thanh kéo được lấy bằng kích thước của lớp BTCLD. Kích thước của bản gối phải đủ lớn để đảm bảo điều kiện chịu lực cục bộ do phản lực gối lên lớp BTHM, vị trí này gọi là mặt nén 1. Kích thước của thanh nén được xác định qua kích thước của bản gối đỡ và chiều cao của thanh kéo (lớp BTCLD), vị trí này gọi là mặt nén 3. Tuy nhiên, ở vị trí nút có sự truyền ứng suất qua 2 vùng bê tông khác nhau là BTN-K và BTHM nên bề rộng của thanh nén cần được xác định thêm trường hợp xét đến sự làm việc của cả 2 lớp vật liệu, vị trí này gọi là mặt nén 4. Ngoài ra, kích thước nút cũng phải đủ lớn để đảm bảo yêu cầu truyền lực trượt giữa lớp BTN-K và BTHM.

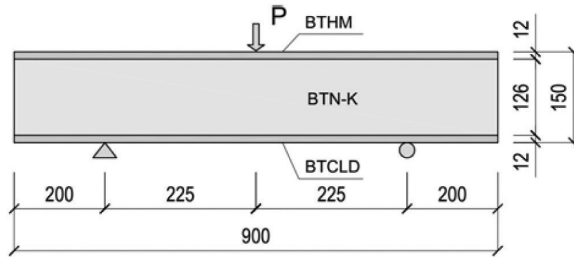
2.3.2. Nút đặt tải trọng

Tại vị trí đặt tải trọng, các lực tập trung bao gồm các thanh nén bằng BTN-K và tải trọng tác dụng. Cấu tạo của nút đặt tải được mô tả ở Hình 4b. Tại vị trí nút, kích thước của nút được xác định qua yêu cầu chịu lực cục bộ từ tám gối đặt tải xuống lớp BTHM là mặt nén 5 và từ BTHM xuống BTN-K là mặt nén 6. Kích thước của thanh nén xiên được xác định theo kích thước của bản gối đặt tải, mặt cắt của thanh nén xiên được xét qua cả lớp BTHM và BTN-K, vị trí này gọi là mặt nén 7.

3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH KHẢ NĂNG CHỊU CẮT CỦA DẪM SANDWICH BẰNG BTCLD VÀ BTN-K.

3.1. Thiết kế mô hình thí nghiệm

Thí nghiệm xác định sức kháng cắt của dầm sandwich bằng BTCLD và BTN-K được thực hiện với sơ đồ uốn 3 điểm (Hình 5). Các mẫu dầm được chia làm 2 nhóm, mỗi nhóm có 3 mẫu. Nhóm 1 (DS1) và nhóm 2 (DS2) được thí nghiệm với sơ đồ dầm có độ mảnh chịu cắt a/d lần lượt là 1 và 1,5.



Hình 5. Thiết lập thí nghiệm uốn 3 điểm

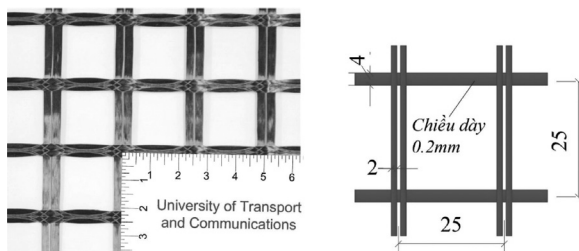
3.2. Vật liệu

3.2.1. Bê tông hạt mịn

BTHM được chế tạo từ hỗn hợp xi măng, cát quartz, bột quartz, muối silic, tro bay, phụ gia siêu dẻo và nước. BTHM có cường độ chịu nén đặc trưng là 64 MPa, cường độ chịu kéo khi uốn đặc trưng là 6,75 MPa, mô đun đàn hồi là 32 GPa.

3.2.2. Lưới sợi dệt

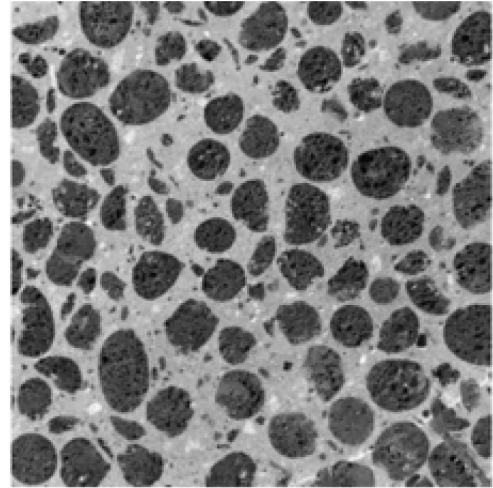
Cốt lưới dệt loại các bon được sản xuất bởi hãng V.FRAAS (Đức), có mã SITgrid004KB. Cốt lưới dệt có cường độ chịu kéo trong bê tông là 2700 MPa, mô đun đàn hồi là 225 GPa. Tổng diện tích cốt lưới dệt trong tấm BTCLD là 10,56 mm².



Hình 6. Kích thước và cấu tạo cốt lưới dệt có mã SITgrid004KB

2.1.3. Bê tông nhẹ

BTN-K có thành phần cấp phối là sỏi keramzit, cát, xi măng, phụ gia siêu dẻo và nước. BTN-K có khối lượng thể tích là 1300 kg/m³, cường độ chịu nén đặc trưng là 18,6 MPa, cường độ chịu kéo khi uốn đặc trưng là 1,47 MPa, mô đun đàn hồi là 6,8 GPa.

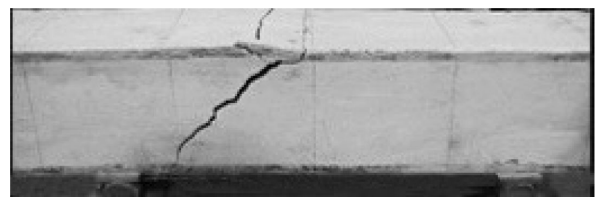


Hình 7. Bê tông nhẹ BTN-K-K

2.4. Kết quả thí nghiệm

Sau khi thí nghiệm, kết quả đo giá trị lực lớn nhất gây phá hoại cho các mẫu sandwich được thể hiện trong Bảng 1. Các dạng phá hoại chủ yếu của mẫu sandwich được thể hiện như Hình 8.

Quan sát quá trình thí nghiệm có thể thấy, các mẫu sandwich DS1 và DS2 có ứng xử điển hình của dầm bê tông cốt thép bị phá hoại trên tiết diện nghiêng. Lực tác dụng tăng dần cho đến khi các vết nứt thẳng góc xuất hiện đầu tiên ở giữa dầm. Tiếp tục tăng tải trọng, các vết nứt nghiêng do cắt xuất hiện, xuất phát từ vị trí dưới gối đặt tải, các vết nứt này phát triển nhanh theo quá trình tăng tải trọng. Sau khi vết nứt mở rộng, khả năng chịu lực của dầm giảm đột ngột và gây ra phá hoại cho dầm. Lực tác



a, Mẫu DS1



b, Mẫu DS2

Hình 8. Cấu trúc vết nứt khi phá hoại của một số dầm sandwich

dụng đạt đến giá trị cực hạn tương ứng với mức tải trọng 40,2 kN (mẫu DS1) và 32,4 kN (mẫu DS2).

Bảng 1. Lực lớn nhất của các dầm sandwich thí nghiệm (đơn vị kN)

Dầm DS	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Giá trị trung bình	Sức kháng cắt của dầm
DS1	39,5	41,0	40,2	40,2	20,1
DS2	34,1	30,2	33,0	32,4	16,2

4. SO SÁNH KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ KẾT QUẢ TÍNH TOÁN THEO MÔ HÌNH HỆ THANH

Sức kháng cắt của dầm sandwich được tính toán theo phương pháp sơ đồ hệ thanh với các thông số của mẫu thí nghiệm, kết quả được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Sức kháng cắt của dầm sandwich theo mô hình hệ thanh

Dầm	Sức kháng cắt tính theo các thành phần (kN)							Sức kháng cắt của dầm (kN)
	Thanh kéo	Thanh nén (ACI 318-19)	Thanh nén (Foster)	Thanh nén (Spetch)	Nút gối gia tải	Nút gối đỡ	Trượt giữa 2 lớp vật liệu	
DS1	31,68	20,22	29,45	18,25	68,22	71,89	31,15	18,25
DS2	21,12	16,28	18,39	14,69	42,43	57,88	31,15	14,69

Từ các kết quả tính sức kháng cắt của dầm sandwich bằng BTCLD và BTN-K theo phương pháp sơ đồ hệ thanh cho thấy, sức kháng cắt của dầm sandwich khi tính theo sức kháng của nút có giá trị lớn hơn nhiều sức kháng của dầm sandwich khi tính theo sức kháng của thanh kéo và sức kháng của thanh nén. Nghĩa là, sức kháng cắt của dầm sandwich trong trường hợp này được lấy theo sức kháng của thanh kéo hoặc sức kháng của thanh nén.

Các kết quả giá trị sức kháng cắt của dầm sandwich được xác định bằng thực nghiệm và phương pháp sơ đồ hệ thanh được tổng hợp trong Bảng 3. Có thể thấy, các kết quả thu được từ hai phương pháp là khá tương đồng (sai số khoảng 9,3 %).

Bảng 3. So sánh sức kháng cắt theo lý thuyết và thực nghiệm của dầm sandwich

Dầm	Sức kháng cắt theo lý thuyết (kN)	Sức kháng cắt theo thực nghiệm (kN)
DS1	18,25	20,1
DS2	14,69	16,2

5. KẾT LUẬN

Mô hình tính toán sức kháng cắt của dầm sandwich theo phương pháp sơ đồ hệ thanh đã phản ánh được ảnh hưởng của các yếu tố như

cường độ của BTCLD, cường độ của BTN-K và tính chất dính bám giữa các lớp vật liệu đến sức kháng cắt của dầm sandwich. Mô hình tính toán này cũng được kiểm chứng với kết quả nghiên cứu thực nghiệm. Các kết quả được so sánh cũng cho thấy, sức kháng cắt của kết cấu sandwich theo thực nghiệm khá sát với kết quả tính toán theo mô hình lý thuyết sơ đồ hệ thanh với độ sai lệch dưới 9,3 %. Như vậy, mô hình tính toán sơ đồ hệ thanh là tin cậy và phù hợp với kết cấu sandwich bằng BTCLD và BTN-K. □

Tài liệu tham khảo

- [1]. Ali Shams, Josef Hegger, Michael Horstmann: An analytical model for sandwich panels made of textile-reinforced concrete, Construction and Building Materials, Volume 64, P. 451-459, ISSN 0950-0618, 2014.
- [2]. ACI - 318 - 19, "Building code Requirements for Structural Concrete" American Concrete Institute.
- [3]. Foster, S. J.: Design of non-flexural members for shear. In: Cement and Concrete Composites 20 (1998), no. 6, p. 465-475.
- [4]. J. Hegger, M. H., & Scholzen, A. Sandwich Panels with Thin-Walled Textile-Reinforced Concrete Facings, ACI Symposium Publication. 251. doi: 10.14359/20153.
- [5]. Specht, M.; Scholz, H.; Beuth (1995), Ein durchgängiges Ingenieurmodell zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit im Bruchzustand von Bauteilen aus Stahlbeton mit und ohne Vorspannung der Festigkeitsklassen, C12 bis C115 /Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 453 - Technical Report.
- [6]. TCVN 11823:2017, Tiêu chuẩn quốc gia về thiết kế Cầu đường bộ.
- [7]. Williams Portal, N., Flansbjerg, M., Zandi, K., Wlasak, L., & Malaga, K. (2017). Bending behaviour of novel Textile Reinforced Concrete-foamed concrete (TRC-FC) sandwich elements. Composite Structures, 177, 104-118.
- [8]. Hegger, J., N. Will (2007), Textile Reinforced Concrete — A new Composite Material. Advances in Construction Materials 2007, Springer Berlin Heidelberg: 147-156.
- [9]. P. Valeri, P. Guaita, R. Baur, M. Fernández Ruiz, D. Fernández-Ordóñez, and A. Muttoni (2020), Textile reinforced concrete for sustainable structures: Future perspectives and application to a prototype pavilion. Structural Concrete, vol. 21.
- [10]. T. Brockmann (2007), Mechanical and Fracture Mechanical Properties of Fine Grained Concrete for TRC Structures. In book: Advances in Construction Materials 2007, pp. 119-129