MÔ PHỎNG SỐ ẢNH HƯỞNG CỦA VẬT LIỆU KỸ THUẬT GỐC XI MĂNG (ECC) LÊN ỨNG XỬ CHỊU UỐN CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC) ON THE FLEXURAL BEHAVIOUR OF RC BEAMS

NGUYĒN CÔNG LUYÉN^{a,*}, NGUYĒN HÒNG ÂN^b, NGUYĒN TÁN KHOA^c ^aKhoa Xây dựng Công trình thủy, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng ^bKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG TP. Hồ Chí Minh ^cKhoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng *Tác giả đại diện: *Email:* ncluyen@dut.udn.vn, ĐT: 0935072227 *Ngày nhận 12/02/2025, Ngày sửa 26/03/2025, Chấp nhận 29/03/2025* https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol1-7

Tóm tắt: Vật liệu kỹ thuật gốc xi măng (Engineered Cementitious Composites (ECC)) đã và đang được sử dụng phổ biến hiện nay trong các kết cấu công trình, từ kết cấu dân dụng và công nghiệp đến kết cấu cầu đường, thủy lợi. Khả năng chịu kéo tốt của ECC giúp giảm vết nứt trong kết cấu, từ đó giảm xâm thực của tác nhân môi trường lên kết cấu và giúp tăng độ bền, tuổi thọ của kết cấu, đặc biệt là các kết cấu chịu uốn như dầm. Vì dầm chịu uốn, trong đó thớ dưới của dầm chịu kéo và vì vậy việc thay thế bê tông vốn có khả năng chịu kéo kém bằng ECC trong việc chế tạo dầm trở nên hợp lý. Tuy nhiên, chưa có nhiều nghiên cứu về việc ứng dụng ECC thay thế bê tông trong kết cấu dầm. Trong nghiên cứu này, bằng cách xây dựng mô hình số và sau đó kiếm chứng mô hình số với kết quả thí nghiệm, tác giả đã phân tích ảnh hưởng của vật liệu ECC và ảnh hưởng của các lớp vật liệu khác nhau lên ứng xử chịu uốn của dầm. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng sử dụng ECC để thay thể bê tông trong dầm chịu uốn giúp tăng khả năng chịu lực của dầm. Tuy nhiên tính dẻo của dầm dùng ECC thấp hơn so với dầm bê tông.

Từ khóa: Vật liệu composite kỹ thuật gốc xi măng (ECC), dầm bê tông cốt thép, ứng xử chịu uốn, khả năng chịu uốn, mô phỏng số.

Abstract: Engineered Cementitious Composites (ECC) is an advanced cement-based material that has been applying extensively in various structural components, ranging from buildings to bridges/dams and so on. Superior tensile strain capacity that ECC possess can help reduce crack opening and crack width in structures, subsequently eliminating the penetration of environmental agents into the structure. As a results, this could increase the durability and longevity of the structures, particularly structures subjected to bending like reinforced concrete (RC) beam. As the beam is normally subjected to bending load, in which the bottom layer of the beam is subjected to tensile stress; therefore, the replacement of concrete which is weak in resisting tensile load by ECC is reasonably demanded. However, there is a few studies conducted to investigate the structural behaviour of ECC beam. In this paper, by developing a numerical model and then validating it with experiment reported in the literature, the authors have investigated the effects of ECC as well as the arrangement of different material layers on the bending behaviour of the beam including strength capacity and load-displacement relationship. The numerical results showed that ECC beam exhibited higher flexural capacity but less ductility than those of the RC counterpart.

Keywords: Engineered Cementitious Composites (ECC), reinforced concrete beam, flexural behaviour, flexural capacity, numerical model.

1. Giới thiệu

Ngày nay, ứng dụng tiến bộ khoa học kỹ thuật, đặc biệt là các vật liệu mới đang ngày càng trở nên phổ biến trong kết cấu xây dựng. Vật liệu composite kỹ thuật gốc xi măng (Engineered Cementitious Composites (ECC)), với thành phần cốt liêu chủ yếu là xi măng, cát, tro bay, silica fume và sợi, có khả năng chịu biến dạng kéo vượt trội lên đến hơn 2% [1] và khả năng chịu biến dạng uốn lớn bằng cách hình thành các vết nứt nhỏ trên bề mặt kết cấu [2]. Ngoài khả năng chịu biến dạng kéo và uốn vượt trội, khả năng chịu biến dạng nén của ECC cũng cao hơn đáng kế so với bê tông thông thường [3-5]. Vì vậy, ECC tỏ ra vươt trôi so với bê tông trong các công trình chịu va đập, chịu tải trọng ngang, động đất. Khả năng chịu biến dạng nén cao hơn hắn bê tông thường giúp ECC dễ dàng làm việc với thép cường độ cao để tạo ra kết cấu có khả năng chịu lực và chuyển vị lớn [3, 5]. Hiện nay ECC đã và đang được

ứng dụng rất phổ biến trong các công trình dân dụng, cầu đường, thủy lợi trên thế giới, đơn cử như sử dụng ECC trong cải tạo các công trình đê đập, cầu đường và dân dụng [2]. Về mặt môi trường, thành phần cấp phối của ECC sử dụng một lượng lớn sản phẩm thải loại của quá trình sản xuất thép (tro bay, silicafume) để thay thế một phần xi măng, giúp giảm lượng lớn khí thải gây hiệu ứng nhà kính, làm cho vật liệu này trở nên thân thiện với môi trường. Một thành phần không thể thiếu để sản xuất ECC là cốt liệu sợi, ví dụ sợi tổng hợp (polyethylene (PE), polyvinyl alcohol (PVA)) [6-10], trong đó ECC dùng sợi PE thường cho đặc tính kỹ thuật tốt hơn ECC dùng PVA. Sự có mặt của thành phần sợi giúp cho ECC có những tính năng ưu việt kể trên so với bê tông thông thường. Một thành phần khác có trong thành phần cấp phối khi sản xuất ECC là cát silica, tuy nhiên hiện nay loại cát này có thể được thay thế bằng cát địa phương vốn có giá thành rẻ hơn nhưng không làm mất đi đặc tính vốn có của ECC [4].

Với kết cấu dầm nhịp lớn, độ võng luôn là mối quan tâm hàng đầu của kỹ sư thiết kế. Khi độ võng trong dầm lớn, biến dạng do kéo trong bê tông ở thớ dưới dầm sẽ vượt quá khả năng chịu biến dạng kéo của nó, gây nứt cho dầm. Khi vết nứt ngày càng mở rộng, các tác nhân môi trường, ví dụ như ion clorua,... sẽ xâm nhập vào cốt thép bên trong, gây ra phản ứng hóa học và làm gỉ cốt thép. Điều này dẫn tới giảm tuổi thọ của kết cấu cũng như tăng chi phí sửa chữa, bảo dưỡng kết cấu công trình. Với những đặc tính ưu việt kể trên, đặc biệt là khả năng chịu kéo cao, ECC trở thành vật liệu có thể thay thế tốt bê tông trong dầm. Khả năng chịu kéo tốt của ECC sẽ giúp hạn chế sự hình thành và mở rộng vết nứt ở thớ dưới dầm, làm tăng độ bền của kết cấu dầm. Ngoài ra, thớ chịu nén ở phía trên khi thay bằng ECC sẽ tốt hơn vì ECC có khả năng chịu biến dạng nén tốt hơn bê tông [5]. Tuy nhiên, các nghiên cứu về ứng dụng ECC thay thế cho bê tông trong kết cấu dầm bê tông cốt thép ở trong và ngoài nước chưa nhiều. Các nghiên cứu chủ yếu sử dụng cho dầm thép hình vốn phổ biến trong nhà thép lắp ghép [3, 9, 11]. Trong nghiên cứu này, tác giả tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng dầm ECC sử dụng phần mềm thương mại ABAQUS dựa trên các mô hình vật liệu vốn đã được chứng minh tính đúng đắn. Đầu tiên, mô hình được kiểm chứng với kết quả thí nghiệm đã được công bố bởi các tác giả trên thế giới, sau đó mô hình được sử dụng để phân tích ảnh hưởng của vật liệu ECC và sự sắp xếp của các lớp vật liệu lên ứng xử chịu uốn của dầm.

2. Mô hình số mô phỏng ứng xử chịu uốn của dầm

2.1 Xây dựng mô hình

Trong bài báo này, các số liệu của dầm CB trong nghiên cứu của Qasim và cộng sự [12], dầm RC của Zhang và cộng sự [13] được sử dụng để xây dựng, hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình số. Số liệu và kích thước dầm CB [12] và dầm RC [13] được mô tả trong Hình 1. Với sự phố biến cũng như khả năng tính toán mạnh mẽ, phần mềm ABAQUS dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để xây dựng mô hình. Trong mô hình số của các dầm khảo sát, các phần tử khối (C3D8R) được sử dụng để mô phỏng vật liệu bê tông trong dầm, trong khi đó cốt thép được mô phỏng bằng phần tử dàn (T3D2). Kích cỡ phần tử C3D8R được chọn nằm trong khoảng 20 ÷ 50 mm trong khi kích cỡ của phần tử T3D2 được chọn bằng 50 mm. Ứng xử của các vật liệu bê tông và cốt thép được biểu thị thông qua các biểu đồ thể hiện mối quan hệ ứng suất và biến dạng khi kéo và nén của vật liệu. Cụ thể, đối với vật liệu bê tông, mô hình phá hoại dẻo (CDP) được sử dụng, trong đó các giá trị bao gồm góc giãn nở, độ lệch tâm e, hệ số Kc, hệ số fb0/fc', và hệ số nhớt được cho một cách tuần tự là 30°; 0,1; 0,6667; 1,16 và 0,0001. Mô hình đề xuất bởi Carreira và Chu [14] được sử dụng để mô hình ứng xử của bê tông khi chịu nén, được biểu thị trên Hình 2(a) và bằng công thức sau:

$$\sigma_{c} = \frac{f_{c}^{'} \gamma(\varepsilon_{c} / \varepsilon_{c}^{'})}{\gamma - 1 + (\varepsilon_{c} / \varepsilon_{c}^{'})^{\gamma}}$$
(1)

trong đó: σ_c là ứng suất nén trong bê tông, ε_c là biến dạng nén trong bê tông, f'_c là cường độ chịu nén của mẫu trụ bê tông, ε'_c là biến dạng khi bê tông đạt cường độ chịu nén. Giá trị γ được tính như sau:

$$\gamma = (\frac{f_c}{32,4})^3 + 1,55 \tag{2}$$

Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong bê tông được xem tuyến tính cho đến khi bê tông đạt 40 % cường độ chịu nén f'_c , vượt qua giá trị này đường ứng suất – biến dạng tuân theo công thức (2). Các giá trị thể hiện trên biểu đồ Hình 2(a) được cho trong Bảng 1.

Cường độ chịu kéo của bê tông (f_t) được lấy bằng 0,1 f'_c . Đường quan hệ giữa ứng suất và biến dạng khi kéo của bê tông được cho trong hình 2 và được xem

là tuyến tính cho đến khi bê tông đạt cường độ chịu kéo [15]. Vượt qua giai đoạn này, đường cong quan hệ giữa ứng suất và biến dạng khi chịu kéo trong bê tông được biểu thị trong công thức (3): $\sigma = f_t e^{-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cr}}{0,00035}\right)^{0,85}}$

đạt cường độ chịu kéo
$$f_t$$
. Biến dạng của bê tông tại
thời điểm phá hoại do kéo ε_{ft} được lấy bằng $25\varepsilon_{cr}$
[15]. Với cốt thép, biểu đồ hai đoạn thẳng được sử
dụng [3], như thể hiện trên Hình 3. Các thông số vật
liệu của bê tông và cốt thép được cho trong Bảng 1
và 2.

trong đó: ε_{cr} là biến dạng tại thời điểm bê tông



(3)

Bảng 1. Thông số vật liệu của bê tông

Nguồn	E _c (MPa)	$\sigma_{0.4}$ (MPa)	$\varepsilon_{0.4}(\%)$	<i>f</i> _c'(MPa)	$\varepsilon_c'(\%)$	$\varepsilon_{cu}(\%)$	f _t (MPa)	$\varepsilon_{cr}(\%)$	$\varepsilon_{ft}(\%)$
Ref [12]	25742	12	0,046	30	0,32	9,0	2,90	0,08	0,2
Ref [13]	30740	16.6	0,054	41,5	0,32	9,3	3,51	0,085	0,2

Bảng 2. Thông số vật liệu của cốt thép								
Nguồn	E _s (MPa)	$\varepsilon_y(\%)$	<i>f_y</i> (MPa)	$\varepsilon_u(\%)$	f _u (MPa)			
Ref [12]	200000	0,286	590	11,4	680			
Ref [13]	210000	0.21	445	10,2	615			

2.2 Hiệu chỉnh và kiểm chứng mô hình

Để xem xét ảnh hưởng của kích cỡ phần tử khối C3D8R lên ứng xử của dầm, ba dầm với kích thước phần tử C3D8R khác nhau gồm 20 mm, 35 mm và 50 mm được phân tích và kết quả biểu đồ lực chuyển vị của những dầm này so sánh với kết quả thí nghiệm của dầm CB [12] được cho trong Hình 4. Từ biểu đồ Hình 4, có thể thấy rằng ba dầm này có ứng xử trước điểm chảy khá giống nhau (biểu đồ lực - chuyển vị gần như trùng nhau). Tuy nhiên, trong giai đoạn sau điểm chảy, dầm có kích thước phần tử C3D8R là 50 mm có giá trị lực lớn hơn so với hai đường còn lại. Đường biểu đồ lực – chuyển vị sau điểm chảy của dầm có kích thước phần tử khối là 35 mm gần tiệm cận với dầm có kích thước phần tử khối là 20 mm, trong đó dầm với 35 mm kích thước phần tử khối gần sát với kết quả thí nghiệm nhất.

Kết quả hình dạng vết nứt của ba dầm gồm dầm có kích thước phần tử khối C3D8R là 50 mm, 35 mm và 20 mm so sánh với kết quả thí nghiệm [12] được cho trên Hình 5. Kết quả cho thấy rằng dầm có kích thước phần tử khối là 35 mm và 20 mm có hình dạng vết nứt phân bố giữa dầm và độ rộng của chúng gần giống với kết quả thí nghiệm. Như vậy, để tiết kiệm thời gian phân tích và bộ nhớ máy tính nhưng vẫn đảm bảo kết quả chính xác, dầm có kích thước phần tử khối 35 mm được sử dụng trong các phân tích sau này. Biểu đồ lực - độ võng so sánh giữa mô hình và thí nghiệm của dầm CB [12] và dầm RC [13] được cho trong Hình 6. Hình 6 cho thấy rằng kết quả mô phỏng và thí nghiệm khá tương đồng nhau về độ cứng dầm, điểm chảy và khả năng chịu lực của dầm.



Hình 4. Đường cong lực – chuyển vị của dầm CB so sánh giữa mô hình số với các kích thước phần tử C3D8R khác nhau và thí nghiệm [12]



a) Kích thước phần tử C3D8R 20 mm



d) Thí nghiệm [12] Hình 5. Hình dáng vết nứt trong dầm CB so sánh giữa mô hình số với các kích thước phần tử C3D8R khác nhau so với thí nghiệm [12]



Hình 6. Đường cong lực – chuyển vị của dầm so sánh giữa mô hình số và thí nghiệm

Mô hình hóa ảnh hưởng của ECC lên ứng xử chịu uốn của dầm

3.1 Mô hình dầm

Để nghiên cứu ảnh hưởng của ECC lên khả năng chịu lực và ứng xử của dầm chịu uốn, hai loại dầm có kích thước, hình dáng và sự phân bố cốt thép dọc và ngang hoàn toàn giống với dầm CB được mô phỏng, trong đó một dầm được thay thế toàn bộ bê tông bằng ECC (dầm ECC), dầm còn lại chỉ thay thế một phần bê tông ở thớ dưới bằng lớp ECC dày 50 mm (dầm bê tông – ECC). Hai dầm này được mô tả như Hình 7(a) và (b).

-0.02





3.2 Mô hình vật liệu của ECC

Đế nghiên cứu ảnh hưởng của ECC lên ứng xử của dầm chịu uốn, mô hình ứng xử vật liệu bê tông được thay thế bằng vật liệu ECC. Trong nghiên cứu này, mô hình ứng suất – biến dạng của Meng và cộng sự [4] được sử dụng cho ứng xử của ECC khi chịu nén, được biểu thị như Hình 8(a), trong đó mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trước khi bị phá hủy được biểu thị bằng công thức sau:

$$\sigma = \begin{cases} E_0 \varepsilon & (0 < \varepsilon < \varepsilon_{0,4}) \\ E_0 \varepsilon (1 - \alpha) & (\varepsilon_{0,4} < \varepsilon < \varepsilon_0) \end{cases}$$
(4)

trong đó: E₀ là mô đun đàn hồi, $\varepsilon_{0.4}$ là biến dạng tại điểm có ứng suất đạt 40% cường độ chịu nén của ECC, ε_0 là biến dạng khi ECC đạt đến cường độ chịu nén, α là hệ số giảm mô đun đàn hồi sau khi ECC đạt đến 40% cường độ chịu nén, và α được xác định như sau:

$$\alpha = a \frac{\varepsilon E_0}{f_{cr}} - b \tag{5}$$

trong đó: f_{cr} là cường độ chịu nén của ECC, *a* và *b* là hệ số và theo thứ tự được lấy bằng 0,46 và 0,33.

Sau khi đạt cường độ chịu nén, mối quan hệ ứng suất và biến dạng của ECC được biểu thị bằng công thức sau:

$$\sigma = \begin{cases} m(\varepsilon - \varepsilon_0) + f_{cr}^{\prime} & (\varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_l) \\ n(\varepsilon - \varepsilon_l) + \sigma_l & (\varepsilon_l < \varepsilon < \varepsilon_{\max}) \end{cases}$$
(6)

trong đó: *m* và *n* là độ dốc của đường bậc hai, lấy theo thứ tự bằng -14190,01 và -389,60. ε_l lấy bằng 1,5 ε_0 . Các thông số vật liệu của ECC được cho trong Bảng 3.

Mô hình ứng xử chịu kéo của ECC được đề xuất bởi Yuan và cộng sự [16] và được mô tả như Hình 8(b). Trong mô hình này, ứng xử chịu kéo của ECC được giả thiết tuyến tính cho đến khi ECC đạt cường độ chịu kéo, và được mô tả trong công thức sau:

$$\sigma_{t} = \begin{cases} E_{0}\varepsilon & (0 < \varepsilon < \varepsilon_{t0}) \\ \sigma_{t0} + (\sigma_{tp} - \sigma_{t0})(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{t0}}{\varepsilon_{tp} - \varepsilon_{t0}}) & (\varepsilon_{t0} < \varepsilon < \varepsilon_{tp}) \\ \sigma_{tp}(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{tp}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tp}}) & (\varepsilon_{tp} < \varepsilon < \varepsilon_{tu}) \end{cases}$$

$$(7)$$

trong đó: σ_{t0} và ε_{t0} là ứng suất và biến dạng khi vết nứt đầu tiên xảy ra, σ_{tp} và ε_{tp} là ứng suất và

biến dạng lớn nhất, ε_{tu} là biến dạng tại điểm phá hủy.





								<u> </u>							
Vật liệu	^E ₀ (MPa)	σ _{0.4} (MPa)	ε _{0.4} (%)	f′r (MPa)	ε _ο (%)	σ _l (MPa)	ε _ι (%)	σ _{cu} (MPa)	ε _{cu} (%)	f _t (%)	ε _{to} (%)	σ_{tp} (MPa)	ε _{tp} (%)	σ _{tu} (MPa)	ε _{tu} (%)
ECC	14130	12	0,085	30	0,53	25	1,00	21	3,1	4,0	0,03	4,7	1,5	0,2	3,02

Bảng 3. Thông số vật liệu của ECC

3.3 Mô phỏng liên kết giữa bê tông và ECC

Đối với dầm bê tông – ECC, mô phỏng chính xác liên kết giữa bề mặt hai lớp vật liệu này là cần thiết để mô hình đúng ứng xử của dầm. Nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng, có sự trượt lên nhau của hai lớp vật liệu [12] và vì vậy, liên kết surface-to-surface dựa trên mô hình kéo-tách (traction-separation constitutive model) được sử dụng trong nghiên cứu này để mô phỏng liên kết giữa bê tông và ECC. Trong mô hình này, đường đàn hồi tuyến tính biểu thị mối quan hệ giữa sự kéo – tách cho đến khi bắt đầu xảy ra phá hoại. Tại điểm bắt đầu xảy ra phá hoại, sự tiến

triển của quá trình phá hoại tại bề mặt hai lớp vật liệu được biểu thị bằng công thức sau:

$$\begin{cases} t_n \\ t_s \\ t_t \end{cases} = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{cases} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{cases}$$
(8)

trong đó: K_n , K_s , K_t là độ cứng tại bề mặt tiếp xúc; t_n , t_s , t_t biểu thị sự kéo tương ứng với sự tách δ_n , δ_s , δ_t . Các kí tự n, s, t lần lượt là hướng pháp tuyến, tiếp tuyến thứ nhất và thứ hai. Các giá trị này được sử dụng trong mô hình và biểu thị ở Bảng 4.

Bảng 4. Các thông số sử dụng trong mô phỏng liên kết giữa bê tông và ECC										
		Hệ số phá hủy								
Hệ số ma sát, μ	<i>K</i> _n , <i>K</i> _s , <i>K</i> _t (N/mm ³)	δ^o_n , δ^o_s , δ^o_t (mm)	$\delta^{\max}_m - \delta^o_m$ (mm)	Hệ số nhớt						
0,7	40	0,03	0,001	0,001						

4. Kết quả và thảo luận

Kết quả mô phỏng số của ba dầm: dầm bê tông, dầm ECC và dầm bê tông - ECC được biểu thị trên Hình 9. Khác với dầm bê tông, dầm ECC hầu như không thay đổi độ dốc của đường cong lực - chuyển vị cho đến khi cốt thép dọc trong dầm bắt đầu bị chảy. Điều này có thể lý giải là do khả năng chịu biến dạng kéo tốt của ECC, chỉ những vết nứt nhỏ xuất hiện ở bề mặt dưới dầm, tuy nhiên những vết nứt này không làm giảm khả năng chịu kéo của ECC ở bề mặt dưới dầm nếu biến dạng trong ECC vẫn chưa vượt quá biến dạng giới hạn, kết quả là không có sự thay đối ở độ dốc của đường cong – chuyển vị của dầm ECC này. Một điều có thể thấy là dầm ECC tuy có độ cứng bé hơn dầm bê tông ở giai đoạn ban đầu (do ECC có mô đun đàn hồi thấp hơn bê tông), nhưng dầm ECC có khả năng chịu lực lớn hơn gần 30 % so với dầm bê tông (224 kN so với 173 kN). Có được điều này là do độ cứng ở giai đoạn sau đàn hồi của dầm ECC tốt hơn so với dầm bê tông, kết quả là giúp cho trục trung hòa trong tiết diện dầm ECC được giữ ở vị trí gần trọng tâm tiết diện dầm hơn so với sự dịch chuyển lên phía trên của trục trung hòa trong dầm bê tông (Hình 10). Điều này cộng hưởng với khả năng chịu

biến dạng nén cao của ECC (0,5% so với 0,3% của bê tông) làm cho dầm ECC có khả năng chịu lực tốt hơn dầm bê tông. Tuy nhiên, do trục trung hòa đặt vị trí thấp làm cho biến dạng nén ở mặt trên cùng của ECC tăng cao, và sự tăng nhanh này gây ra sự giảm đột ngột khả năng chịu lực của dầm sau khi ECC ở lớp trên đạt đến khả năng chịu biến dạng nén của nó. Trong trường hợp này, dầm ECC có tính dẻo kém hơn so với dầm bê tông.

Đối với dầm bê tông - ECC, khi giá trị lực đạt đến 68 kN, dầm có sự giảm đột ngột về khả năng chịu lực, sau đó giá trị lực tăng trở lại nhưng với độ dốc thấp hơn so với ban đầu. Lý giải cho sự giảm đột ngột về khả năng chịu lực của dầm này là do có sự giảm liên kết tại bề mặt của hai lớp: ECC và bê tông (hiện tượng tách thớ), biểu thị như Hình 11. Sự giảm liên kết của hai lớp vật liệu làm giảm độ cứng của dầm, nhưng sau đó khả năng chịu lực của dầm này tăng đến giá trị lớn hơn 10% so với dầm bê tông. Ứng xử sau khi đạt đỉnh của dầm này tương tự dầm bê tông với tính dẻo khá cao, đường biểu đồ lực – chuyển vị đi ngang. Hiện tượng tách thớ trong dầm bê tông – ECC có thể quan sát trong thí nghiệm thực hiện bởi Qasim và cộng sự [12].



Hình 9. Đường cong lực – chuyển vị của các dầm khảo sát



a) Trục trung hòa trong dầm bê tông

b) Trục trung hòa trong dầm ECC





5. Kết luận

Bài báo này trình bày nghiên cứu ứng xử của dầm chịu uốn sử dụng vật liệu composite kỹ thuật gốc xi măng (ECC) để thay thế một phần hay hoàn toàn cho bê tông. Mô hình số được xây dựng dựa trên phần mềm thương mại ABAQUS trong đó bê tông/ECC được mô phỏng bằng các phần tử khối C3D8R, cốt thép được mô phỏng bằng phần tử dàn T3D2, liên kết giữa các mặt tiếp xúc ECC và bê tông sử dụng liên kết surface to surface. Các mô hình vật liệu của bê tông, ECC và cốt thép được nhập vào mô hình. Mô hình được kiểm chứng với kết quả thí nghiệm được thực hiện bởi các tác giả khác và sau đó dùng để phân tích ảnh hưởng của ECC lên ứng xử chịu uốn của dầm. Một số kết luận có thể rút ra từ nghiên cứu này.

- Dầm ECC tuy có độ cứng bé hơn dầm bê tông ở giai đoạn đàn hồi (do ECC có mô đun đàn hồi thấp hơn bê tông), nhưng dầm ECC có khả năng chịu lực lớn hơn gần 30% so với dầm bê tông (224 kN so với 173 kN). Có được điều này là do độ cứng ở giai đoạn sau đàn hồi của dầm ECC tốt hơn so với dầm bê tông (do ECC vẫn còn khả năng chịu lực sau khi nứt), kết quả là giúp cho trục trung hòa trong tiết diện dầm ECC được giữ ở vị trí gần trọng tâm tiết diện dầm hơn so với sự dịch chuyển lên phía trên của trục trung hòa trong dầm bê tông. Điều này cộng hưởng với khả năng chịu biến dạng nén cao của ECC (0,5% so với 0,3% của bê tông) làm cho dầm ECC có khả năng chịu lực tốt hơn dầm bê tông;

 Dầm ECC có tính dẻo kém hơn so với dầm bê tông do trục trung hòa đặt vị trí thấp làm cho biến dạng nén ở bề mặt trên cùng của ECC tăng cao, và sự tăng nhanh này gây ra sự giảm đột ngột khả năng chịu lực của dầm sau khi ECC ở lớp trên đạt đến khả năng chịu biến dạng nén của nó;

Hiện tượng tách thớ xảy ra trong dầm bê tông –
 ECC làm cho khả năng chịu lực bị suy giảm đột ngột,
 tuy nhiên sau đó khả năng chịu lực vẫn tăng và lớn
 hơn 10% so với dầm bê tông.

Lời cảm ơn

Bài báo này được tài trợ bởi Quỹ Murata và Trường Đại học Bách khoa – ĐHĐN với đề tài có mã số: T2024-02-10MSF.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] V. C. Li (1993). From micromechanics to structural engineering the design of cementitious composites for civil engineering applications. Doboku Gakkai Ronbunshu, vol. 471, pp. 1-12.
- [2] V. C. Li (2019). Engineered cementitious composites (ECC): bendable concrete for sustainable and resilient infrastructure. Springer.
- [3] M. I. Kabir, C. K. Lee, M. M. Rana and Y. X. Zhang (2019). Flexural and bond-slip behaviours of engineered cementitious composites encased steel composite beams. Journal of constructional steel research, vol. 157, pp. 229-244.
- [4] D. Meng, T. Huang, Y. X. Zhang, C. K. Lee (2017). Mechanical behaviour of a polyvinyl alcohol fibre reinforced engineered cementitious composite (PVA-ECC) using local ingredients. Construction and Building Materials, vol 141, pp. 259-270.

- [5] C.-L. Nguyen and C.-K. Lee (2021). Flexural behaviours of Engineered Cementitious Composites–High strength steel composite beams. Engineering Structures, vol. 249, 113324.
- [6] J. C. Liu and K. H. Tan (2018). Fire resistance of ultrahigh performance strain hardening cementitious composite: Residual mechanical properties and spalling resistance. Cement and Concrete Composites, vol. 89, pp. 62-75.
- [7] A. Kamal, M. Kunieda, N. Ueda, and H. Nakamura (2008). Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior. Cement and Concrete Composites, vol. 30(10), pp. 863-871.
- [8] J. I. Choi, K. I. Song, J. K. Song, and B. Y. Lee (2016). Composite properties of high-strength polyethylene fiber-reinforced cement and cementless composites. Composite Structures, vol. 138, pp. 116-121.
- [9] M. M. Rana, C. K. Lee, S. Al-Deen, and Y. X. Zhang (2018). Flexural behaviour of steel composite beams encased by engineered cementitious composites. Journal of constructional steel research, vol. 143, pp. 279-290.
- [10] M. K. I. Khan, M. M. Rana, Y. X. Zhang, and C. K. Lee (2020). Behaviour of engineered cementitious composite-encased stub concrete columns under axial compression. Magazine of Concrete Research, vol. 72(19), pp. 984-1005.
- [11] M. I. Kabir, C. K. Lee, M. M. Rana, and Y. X. Zhang (2020). Flexural behaviour of ECC-LWC encased slender high strength steel composite beams. Journal of Constructional Steel Research, vol. 173, 106253.
- [12] M. Qasim, C. K. Lee, and Y. X. Zhang (2023). Flexural strengthening of reinforced concrete beams using hybrid fibre reinforced engineered cementitious composite. Engineering Structures, vol. 284, 115992.
- [13] P. Zhang, Y. Su, J. Shang, Z. Xu, T. Hao, C. Wu, S. A. Sheikh (2024). Flexural behavior of RC beams strengthened with CFRP sheets and ECC material. Structures, March, Vol. 61, p. 106015.
- [14] D. J. Carreira and K. H. & Chu (1985). Stress-strain relationship for plain concrete in compression. In Journal proceedings, November, vol. 82, no. 6, pp. 797-804.
- [15] M. K. Hassan (2016). Behaviour of hybrid stainlesscarbon steel composite beam-column joints. Western Sydney University (Australia).
- [16] F. Yuan, J. Pan, and C. K. Y. Leung (2013). Flexural behaviors of ECC and concrete/ECC composite beams reinforced with basalt fiber-reinforced polymer. Journal of Composites for Construction, vol. 17(5), pp. 591-602.