

NGHIÊN CỨU SO SÁNH CÁC PHƯƠNG PHÁP THIẾT KẾ TĂNG CƯỜNG KHẢ NĂNG CHỊU UỐN CỦA DÀM BÊ TÔNG CỐT THÉP BẰNG VẬT LIỆU FRP DÁN GẦN BỀ MẶT THEO ACI 440.2R-08 VÀ ISIS (CANADA)

COMPARATIVE STUDY METHODS FOR FLEXURAL STRENGTHENING DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BEAM USING NSM-FRP MATERIAL APPROACH ACI 440.2R-08 AND ISIS (CANADA)

Trần Văn Huy*, Nguyễn Văn Ngôn, Lê Thanh Phong, Phạm Trường Hiếu

Trường Cao đẳng Giao thông Huế;

tvhuy.gtvthue@gmail.com, ngvngon.gtvthue@gmail.com, lthong.gtvthue@gmail.com, ptrhieug.gtvthue@gmail.com

Tóm tắt - Tăng cường khả năng chịu uốn của dầm bê tông cốt thép (BTCT) bằng phương pháp dán gần bề mặt (NSM) vật liệu FRP giải quyết được các vấn đề tồn tại của phương pháp dán ngoài (EB) do vật liệu FRP được bảo vệ tốt hơn đối với các tác động từ môi trường bên ngoài. Bài báo trình bày kết quả phân tích so sánh giữa hai hướng dẫn thiết kế tăng cường sức kháng uốn của dầm bê tông cốt thép sử dụng phương pháp NSM theo ACI 440.2R-08 (Mỹ) [3] và ISIS (Canada) [13]. Kết quả phân tích cho thấy, hướng dẫn của ACI 440.2R-08 cho sức kháng uốn sau khi tăng cường cao hơn khi tính theo ISIS khoảng 31,1% đến 42,6%. Ngoài ra, khi so sánh hiệu quả kinh tế của hai phương pháp tăng cường dán ngoài và dán gần bề mặt, theo ACI 440.2R-08, phương pháp dán gần bề mặt có chi phí thấp hơn khoảng 13,7% đến 58,2% so với phương pháp dán ngoài với sức kháng uốn tương đương.

Từ khóa - Dán gần bề mặt; pôlime cốt sợi; sức kháng uốn; tăng cường ngoài; tăng cường uốn.

Abstract - Flexural strengthening of concrete beam using near surface mounted (NSM) FRP method has solved existing problems of external bonded (EB) method because FRP materials are better protected from external environment. The article presents analysis and comparison from two design guidelines for flexural strengthening concrete beam using NSM method as ACI 440.2R-08(America) [3] and ISIS (Canada) [13]. The output analysis shows that, ACI 440.2R-08 approaches provide results of flexural resistance after strengthening higher than those by ISIS from about 31.1% to 42.6%. In addition, when comparing economic efficiency of two strengthening methods NSM-FRP and EB-FRP approach ACI 440.2R-08 guidelines, NSM-FRP method shows lower cost than EB-FRP method from about 13.7% to 58.2% with equivalent flexural strength.

Key words - Near-surface-mounted; fiber reinforced polymer; flexural resistance; external bonded; flexural strengthening.

1. Đặt vấn đề

Mặc dù đã được ứng dụng trong sửa chữa tăng cường kết cấu BTCT từ năm 2011, mang lại nhiều lợi ích [2], tuy nhiên công nghệ gia cố bằng phương pháp dán ngoài các tấm vật liệu FRP vẫn còn một số vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu khắc phục như: (1) Các tấm dán FRP dễ bị ảnh hưởng bởi các tác động va chạm từ bên ngoài; (2) Cường độ vật liệu FRP bị suy giảm theo thời gian dưới tác dụng của các điều kiện môi trường như độ ẩm, tia UV, ... Phương pháp NSM với việc đặt cốt FRP ở bên trong kết cấu, do đó vật liệu FRP sẽ được bảo vệ tốt hơn, khắc phục được các nhược điểm của phương pháp dán ngoài.

Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu được tiến hành nhằm phát triển phương pháp NSM như [4], [5], [7], [8], [9], [11], [12], [14], [15]. Ngoài ra một số nghiên cứu mới tiến hành theo phương pháp tăng cường kết hợp EB và NSM (CEBNSM) mới được thực hiện gần đây như [6], [10]. Kết quả cho thấy, hiệu quả tăng cường khả năng chịu uốn của phương pháp này vượt 77% so với mẫu không tăng cường và vượt 20% so với mẫu chỉ tăng cường bằng phương pháp NSM.

Hệ thống các tiêu chuẩn, hướng dẫn tính toán, thi công trong sửa chữa tăng cường kết cấu cũng các quốc gia, tổ chức ban hành như: ACI 440.2R-08 [3], ISIS [13], CNR-DT (Italy), Hiệp hội bê tông Châu Âu (FIB), Hiệp hội kỹ sư xây dựng Nhật Bản (JSCE), Tổ chức nghiên cứu giao thông - Cục đường bộ liên bang Mỹ (NCHRP), ...

Ở nước ta, công nghệ sửa chữa tăng cường kết cấu BTCT theo phương pháp dán sát bề mặt sử dụng cốt thanh FRP

(NSM) hiện mới có một số ít các nghiên cứu, điển hình như nghiên cứu ứng dụng cốt thanh FRP để tăng cường sức kháng cắt cho dầm BTCT. Ngoài ra, hiện chưa có nghiên cứu nào tiến hành về thiết kế tăng cường uốn cho dầm sử dụng phương pháp NSM. Đặc biệt trong điều kiện nước ta đã sản xuất được cốt thanh pôlime gia cường sợi thủy tinh (GFRP) với chi phí rẻ hơn nhiều so với vật liệu FRP dán ngoài phải nhập ngoại. Vì vậy, NSM là một phương pháp tăng cường mới có triển vọng thay thế hoặc kết hợp với phương pháp dán ngoài để nâng cao hiệu quả, giảm chi phí.

2. Nghiên cứu thiết kế tăng cường uốn

Hiện có nhiều tiêu chuẩn dùng cho việc thiết kế tăng cường kết cấu sử dụng vật liệu FRP được đề nghị bởi các quốc gia, tổ chức khác nhau trên thế giới. Hai tiêu chuẩn điển hình được lựa chọn từ các quốc gia có nhiều nghiên cứu ứng dụng đối với vật liệu FRP là ACI 440.2R-08 và ISIS. Để so sánh giữa các tiêu chuẩn, các đặc trưng sau đây sẽ được xem xét:

- Giới hạn tăng cường;
- Hệ số triết giảm do điều kiện môi trường;
- Hệ số triết giảm cường độ;
- Mô hình phá hoại;
- Biến dạng ban đầu của vật liệu FRP;
- Biến dạng hữu hiệu thiết kế.

2.1. Giới hạn tăng cường

2.1.1. Theo ACI 440.2R-08

ACI 440.2R-08 quy định kết cấu trước khi tăng cường

phải đảm bảo khả năng chịu tải thỏa mãn điều kiện (1) trong trường hợp thông thường và (2) với trường hợp hoạt tải dài hạn.

$$(\varphi R_n)_{existing} \geq (1,1S_{DL} + 0,75S_{LL})_{new} \quad (1)$$

$$(\varphi R_n)_{existing} \geq (1,1S_{DL} + 1,0S_{LL})_{new} \quad (2)$$

Trong đó, $(\varphi R_n)_{existing}$ là sức kháng tính toán của kết cấu hiện hữu, S_{DL} , S_{LL} lần lượt là hiệu ứng do tĩnh tải và hoạt tải mới dự kiến gây ra.

2.1.2. Theo ISIS - Canada

Hướng dẫn của Canada (ISIS) đề nghị kết cấu hiện tại phải đủ chịu toàn bộ phần tĩnh tải và 50% hoạt tải theo (3).

$$(\varphi R_n)_{existing} \geq (1,1S_{DL} + 0,5S_{LL})_{new} \quad (3)$$

2.2. Hệ số triết giảm do điều kiện môi trường (C_E)

2.2.1. Theo ACI 440.2R-08

ACI 440.2R-08 quy định hệ số triết giảm do điều kiện môi trường theo Bảng 1, phụ thuộc vào loại sợi và điều kiện môi trường.

Bảng 1. Hệ số triết giảm do điều kiện môi trường C_E (ACI 440.2R-08)

Điều kiện tiếp xúc	Loại sợi	C_E
Bên trong	Cac bon	0,95
	Thủy tinh	0,75
	Aramid	0,85
Bên ngoài	Cac bon	0,85
	Thủy tinh	0,65
	Aramid	0,75
Môi trường ăn mòn mạnh (công trình xử lý chất thải, hóa chất)	Cac bon	0,85
	Thủy tinh	0,50
	Aramid	0,70

2.2.2. Theo ISIS - Canada

ISIS không quy định cụ thể hệ số triết giảm do điều kiện môi trường, thay vào đó tiêu chuẩn này xét đến hệ số sức kháng của vật liệu bao gồm hệ số điều kiện môi trường cùng với các hệ số an toàn riêng khác được tổng hợp thành một hệ số. ISIS cung cấp hai hệ số, một cho công trình cầu và một cho công trình xây dựng như Bảng 2.

2.3. Hệ số triết giảm cường độ (ϕ)

2.3.1. Theo ACI 440.2R-08

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \varepsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} & \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0,005 \\ 0,65 & \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (4)$$

ACI 440.2R-08 tiếp cận theo triết lý của ACI 318-05 sử dụng hệ số triết giảm cường độ (ϕ) nhằm xác lập ứng xử dẻo cho kết cấu. Theo ACI 318-05 [3] hệ số (ϕ) được xác định theo (4).

Một hệ số triết giảm cường độ của riêng FRP được đề nghị $\Psi_f = 0,85$ và hệ số triết giảm cường độ tổng hợp đối với FRP là (ϕ, Ψ_f) .

2.3.2. Theo ISIS - Canada

Hệ số triết giảm cường độ lấy theo Bảng 2.

Bảng 2. Hệ số triết giảm cường độ theo quy định của ISIS

Vật liệu	Công trình cầu	Công trình xây dựng
Bê tông	$\phi_C = 0,75$	$\phi_C = 0,60$
Cốt thép thường	$\phi_S = 0,90$	$\phi_S = 0,85$
Cốt thanh GFRP	$\phi_{GFRP} = 0,65$	$\phi_{GFRP} = 0,75$

2.4. Mô hình phá hoại

2.4.1. Theo ACI 440.2R-08

Kết cấu dầm BTCT được tăng cường uốn theo phương pháp NSM bằng vật liệu FRP có thể phá hoại theo 4 trường hợp:

- Bê tông vùng nén bị ép vỡ, trước khi cốt thép chảy dẻo;
- Cốt thép bị chảy dẻo, tiếp theo đó bê tông vùng nén bị ép vỡ;
- Cốt thép bị chảy dẻo, tiếp theo đó cốt thanh FRP phá hoại đứt;
- Cốt thanh FRP mất dính bám với bê tông.

2.4.2. Theo ISIS - Canada

Tương tự như ACI 440.2R-08, ISIS cũng đưa ra bốn dạng phá hoại của kết cấu dầm bê tông tăng cường bằng FRP theo phương pháp NSM. Tuy nhiên tiêu chuẩn của Canada bỏ qua dạng phá hoại do mất dính bám của thanh FRP với bê tông (giả định này có thể đảm bảo trong thực tế với việc sử dụng hệ thống neo chuyên dụng).

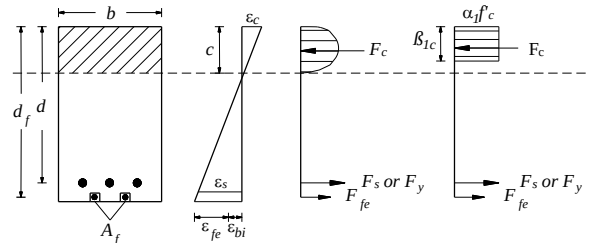
2.5. Biến dạng ban đầu (ε_{bi})

2.5.1. Theo ACI 440.2R-08

Biến dạng ban đầu của vật liệu FRP được tính toán theo sơ đồ Hình 1.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c} \quad (5)$$

Trong đó, M_{DL} là mô men tại mặt cắt do tải trọng bản thân của kết cấu, I_{cr} là mô men quán tính của mặt cắt đã nứt tính đối theo chiều cao vùng nén xác định theo (7), d_f là chiều cao hữu hiệu của cốt thanh FRP, d là chiều cao hữu hiệu của cốt thép, E_c là mô đun đàn hồi của bê tông, k là tỷ số giữa chiều cao trục trung hòa với chiều cao hữu hiệu của cốt thép xét trên mặt cắt đã nứt.



Hình 1. Mô hình tính biến dạng ban đầu của vật liệu FRP

$$k = \sqrt{2[\rho_s n_s + \rho_f n_f (d_f / d)] + (\rho_s n_s + \rho_f n_f)^2} - (\rho_s n_s + \rho_f n_f) \quad (6)$$

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + n_s A_s (d - kd)^2 \quad (7)$$

$$n_s = \frac{E_s}{E_c}; n_f = \frac{E_f}{E_c}; \rho_s = \frac{A_s}{bd}; \rho_f = \frac{A_f}{bd_f}$$

Trong đó, A_s là diện tích cốt thép thường chịu kéo.

2.5.2. Theo ISIS - Canada

Biến dạng ban đầu của vật liệu FRP xem như bằng không.

2.6. Biến dạng hữu hiệu của vật liệu FRP (ε_f)

2.6.1. Theo ACI 440.2R-08

ACI 440.2R-08 quy định giới hạn biến dạng trong vật liệu FRP để ngăn chặn sự mất dính bám do phát triển của các vết nứt. Biến dạng giới hạn trong vật liệu FRP được lấy bằng ($k_m \varepsilon_{fu}$) hoặc thấp hơn theo công thức (8).

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu} \quad (8)$$

Bảng 3. So sánh phương pháp thiết kế tăng cường uốn theo ACI 440.2R-08 và ISIS

TT	ACI 440.2R-08 [3]	ISIS [13]
1	<i>Bước 1: Xác định các tính chất của vật liệu FRP</i> - Cường độ chịu kéo giới hạn: $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ - Biến dạng kéo giới hạn: $\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$ - Mô đun đàn hồi (E_f)	<i>Bước 1: Xác định các tính chất của vật liệu FRP theo nhà cung cấp.</i> - Cường độ kéo đứt (f_{frpu}) - Biến dạng kéo giới hạn (ε_{frpu}) - Mô đun đàn hồi (E_f)
2	<i>Bước 2: Tính toán các đặc trưng của vật liệu bê tông, cốt thép, cốt thanh FRP ($E_c, \varepsilon'_c, \beta_1, \alpha_1, A_s, d, \rho_s, A_f, d_f, \rho_f$).</i> $E_c = 4700 \sqrt{f'_c}; \quad \varepsilon'_c = \frac{1,7 f'_c}{E_c}$ $\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c^2}; \quad \beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$	<i>Bước 2: Tính toán các đặc trưng của vật liệu bê tông, cốt thép, cốt thanh FRP ($E_c, \beta_1, \alpha_1, A_s, d, \rho_s, A_f, d_f, \rho_f$).</i> $E_c = 4500 \sqrt{f'_c}$ $\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 f'_c \geq 0,67$ $\beta_1 = 0,97 - 0,0025 f'_c \geq 0,67$
3	<i>Bước 3: Tính toán biến dạng ban đầu của vật liệu FRP (ε_{bi}).</i> $k = \sqrt{2[\rho_s n_s + \rho_f n_f (d_f / d)] + (\rho_s n_s + \rho_f n_f)^2}$ $I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + n_s A_s (d - kd)^2; \quad \varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr} E_c}$	<i>Bước 3: Xác định chiều cao trục trung hòa (c).</i> Giả thiết bê tông vùng nén bị phá hoại trước ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$). Xác định (c) từ phương trình cân bằng. $\phi_s A_s f_s + \phi_{frp} A_f E_f \varepsilon_f = \phi_c \alpha_1 f'_c \beta_1 bc$ $\Rightarrow \varepsilon_f = \varepsilon_{cu} (d_f - c) / c$
4	<i>Bước 4: Xác định hệ số phụ thuộc dính bám của vật liệu FRP từ nhà cung cấp (k_m).</i>	<i>Bước 4: Kiểm tra điều kiện biến dạng của FRP</i> - Nếu: $\varepsilon_f \leq \varepsilon_{frpu}$, tính toán sức kháng uốn theo bước 5. - Nếu: $\varepsilon_f > \varepsilon_{frpu}$, chuyển sang bước 6.
5	<i>Bước 5: Giả định chiều cao trục trung hòa ở trạng thái giới hạn cực hạn (c).</i>	<i>Bước 5: Tính toán sức kháng uốn</i> Kiểm tra điều kiện biến dạng của cốt thép: $\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} (d - c) / c > \varepsilon_y$, nếu không thỏa mãn cần giảm hàm lượng cốt FRP và tính lại, nếu thỏa mãn tính sức kháng uốn. $M_r = \phi_s A_s f_y (d - \beta_1 c / 2) + \phi_{frp} A_f E_f \varepsilon_f (d_f - \beta_1 c / 2)$
6	<i>Bước 6: Tính toán biến dạng hữu hiệu của vật liệu FRP (ε_f).</i> $\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} (d_f - c) / c - \varepsilon_{bi} \leq k_m \varepsilon_{fu}$	<i>Bước 6: Giả thiết lại trường hợp phá hoại do cốt FRP bị đứt trước ($\varepsilon_f = \varepsilon_{frpu}; \varepsilon_c < \varepsilon_{cu}$).</i> Xác định (c) từ phương trình. $\phi_s A_s f_y + \phi_{frp} A_f E_f \varepsilon_{frpu} = \phi_c \alpha_1 f'_c \beta_1 bc$
7	<i>Bước 7: Tính toán biến dạng của cốt thép (ε_s).</i> $\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) (d - c) / (d_f - c)$	<i>Bước 7: Kiểm tra lại giả thiết</i> $\varepsilon_c = \varepsilon_{frpu} c / (d_f - c) < \varepsilon_{cu}$

Trong đó, ε_{cu} là biến dạng cực hạn của bê tông ($\varepsilon_{cu} = 0,003$), c là chiều cao vùng nén của tiết diện dầm.

2.6.2. Theo ISIS - Canada

ISIS không quy định cụ thể như ACI 440.2R-08 mà xem xét giới hạn biến dạng trong vật liệu FRP để tránh phá hoại sớm do mất dính bám và phá hoại của neo. Giới hạn này được ISIS quy định phải xác định thông qua thực nghiệm với từng trường hợp cụ thể. Giá trị biến dạng giới hạn của bê tông được lấy bằng 0,0035.

2.7. So sánh trình tự thiết kế theo hai phương pháp ACI 440.2R-08 và ISIS

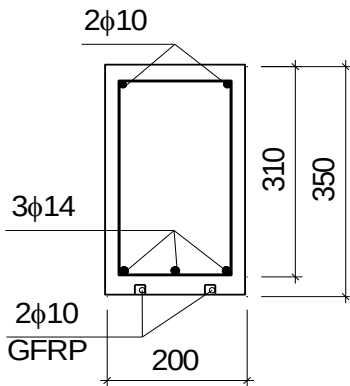
Trình tự thiết kế tăng cường uốn cho kết cấu dầm bê tông bằng vật liệu FRP theo phương pháp NSM được trình bày ở Bảng 3.

8	<i>Bước 8:</i> Tính toán ứng suất của cốt thép và cốt FRP: $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}; f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$	<i>Bước 8:</i> Tính toán sức kháng uốn $M_r = \phi_s A_s f_y (d - \beta_1 c / 2) + \phi_{frp} A_f E_f \varepsilon_{frpu} (d_f - \beta_1 c / 2)$
9	<i>Bước 9:</i> Thiết lập phương trình cân bằng và tính chiều cao vùng nén (c). $c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 \beta_1 f'_c b}$	
10	<i>Bước 10:</i> Thay đổi (c), tính lặp lại từ bước 6 đến bước 9 để đạt được điều kiện cân bằng.	
11	<i>Bước 11:</i> Tính toán sức kháng uốn (M_r). $M_r = \phi (A_s f_s (d - \beta_1 c / 2) + \Psi_f A_f f_{fe} (d_f - \beta_1 c / 2))$	

3. Kết quả và thảo luận

Nhằm so sánh kết quả tính toán theo hai phương pháp ACI 440.2R-08 và ISIS, một ví dụ cụ thể về tăng cường uốn cho kết cấu dầm bê tông cốt thép sử dụng phương pháp NSM (Hình 2) được đưa ra để phân tích, với các số liệu cụ thể sau:

- Cường độ bê tông dầm f'_c có giá trị thay đổi (20, 25, 30, 35, 40) MPa;
- Kích thước dầm: $b = 200$ mm; $h = 350$ mm;
- Cốt thép chịu kéo: 3 ϕ 14 có: $A_s = 462$ mm²; $d = 310$ mm; $f_y = 300$ MPa; $E_s = 200$ GPa;
- Thanh cốt sợi thủy tinh (GFRP) dùng để tăng cường sức kháng uốn của dầm theo phương pháp NSM: 2 ϕ 10 có: $A_f = 113$ mm²; $E_f = 45$ GPa; $f_{frpu} = 900$ MPa; $\varepsilon_{frpu} = 0,013$;
- Chiều dài nhịp dầm: $L = 4,0$ m.



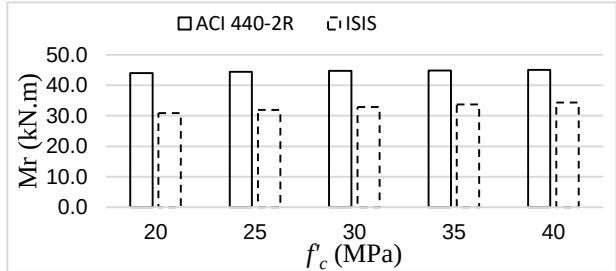
Hình 2. Mặt cắt ngang dầm

Kết quả tính toán sức kháng uốn sau khi tăng cường theo các phương pháp ACI 440.2R-08 và ISIS với các trường hợp cường độ bê tông lần lượt là 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, 35 MPa, 40 MPa, được tổng hợp và so sánh trên Bảng 4 và Hình 3. Trong phạm vi khảo sát của bài toán, tính theo phương pháp ACI 440.2R-08, sức kháng uốn sau khi tăng cường tăng tương ứng khoảng 32,2% đến 36,4%. Mức tăng cường tính theo phương pháp ISIS khoảng từ 9,6% đến 22%. Sức kháng uốn sau tăng cường tính theo phương pháp ACI 440.2R-08 lớn hơn giá trị tính theo phương pháp ISIS từ 31,1% đến 42,5%. Mức độ chênh lệch có xu hướng giảm dần khi cường độ bê tông tăng. Sự chênh lệch giá trị sức kháng uốn tính toán giữa hai tiêu chuẩn có thể được lý giải từ việc xác định chiều cao trục trung hòa (c) khác nhau,

trong khi ISIS đưa các hệ số triết giảm cường độ vật liệu vào phương trình cân bằng thì ACI 440.2R-08 không xét đến các hệ số này khi tính (c).

Bảng 4. Sức kháng uốn tính toán theo các phương pháp ACI 440.2R-08 và ISIS

f'_c (MPa)	Sức kháng uốn tính toán M_r (kN.m)		Chênh lệch (%)
	ACI 440-2R	ISIS - Canada	
20	44,027	30,882	42,6%
25	44,471	31,993	39,0%
30	44,740	32,913	35,9%
35	44,880	33,688	33,2%
40	45,060	34,378	31,1%



Hình 3. Sức kháng uốn tính toán sau khi tăng cường theo ACI 440.2R-08 và ISIS

Ngoài ra để so sánh hiệu quả tăng cường giữa hai phương pháp EB và NSM, một phân tích được tiến hành với các số liệu của kết cấu dầm như Hình 2, sử dụng lần lượt hai phương pháp NSM và EB. Kết quả tính toán cho thấy, với mức độ tăng cường khả năng chịu uốn tương đương (khoảng 30%), phương pháp EB sử dụng tấm sợi các bon (CFRP - Toray UT70-20G) có chi phí vật liệu cao hơn so với phương pháp NSM sử dụng thanh GFRP được sản xuất bởi Công ty Cổ phần Cốt sợi Polyme Việt Nam (FRP Vietnam JSC). Trong phạm vi khảo sát với cường độ bê tông (f'_c) bằng 20 MPa, 25 MPa, 30 MPa, 40 MPa, mức chênh lệch tương ứng là 58,2%, 38,4%, 38,5% và 13,7% (Bảng 5). Mức chênh lệch chi phí giảm dần khi cường độ bê tông tăng lên là do giá trị chiều cao trục trung hòa (c) tính toán theo phương pháp tăng cường bằng dán ngàì có xu hướng giảm nhanh hơn. Điều này dẫn đến sức kháng uốn tính toán sẽ có xu hướng tăng nhanh hơn (theo f'_c) so với phương pháp NSM.

Bảng 5. So sánh chi phí tăng cường theo NSM và EB

f_c (MPa)	Vật liệu FRP tăng cường		Chi phí vật liệu (VNĐ)		Chênh lệch (%)
	EB(m ²)	NSM	EB	NSM	
20	0,64	1φ16	841280	531861	58,2%
25	0,56	1φ16	736120	531861	38,4%
30	0,52	1φ16	683540	531861	28,5%
40	0,46	1φ16	604670	531861	13,7%

(Đơn giá lấy theo báo giá được cung cấp bởi các đơn vị FRP Vietnam JSC và Jvtek)

4. Kết luận

Sức kháng uốn sau khi tăng cường theo phương pháp NSM sử dụng vật liệu FRP tính theo các phương pháp ACI 440.2R-08 và ISIS có sự chênh lệch khá lớn, giá trị tính theo ACI 440.2R-08 cao hơn so với tính theo ISIS (khoảng 30% - 40%). Để lựa chọn phương pháp thiết kế tăng cường uốn phù hợp cần có thêm các nghiên cứu thực nghiệm.

Chi phí vật liệu khi tăng cường theo phương pháp dán ngoài sử dụng vật liệu FRP cao hơn khoảng từ 13,7% đến 58,2% so với phương pháp NSM. Kết quả phân tích này có thể được tham khảo khi lựa chọn phương án tăng cường khả năng chịu uốn của kết cấu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] ACI Committee 318, Building code requirements for reinforced concrete, ACI 318-05, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2005, p.479.
- [2] <http://cucqlxd.gov.vn/tang-nang-luc-cau-yeu-bang-tam-soi-frp-1539.html> (truy cập ngày 25/7/2018).
- [3] ACI (American Concrete Institute), Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R-08, Farmington Hills, MI, USA, 2008, p. 80.
- [4] Ahmed K., Nasr-Eddine C., and Habib A.M., "Numerical modeling of reinforced concrete beams strengthened by NSM-CFRP technique", *Int'l Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engg. (IJRCMCE)* Vol. 3, Issue 2, ISSN 2349-1442 EISSN 2349-1450, 2016, pp 226-230.
- [5] Bhunga M.M., "Comparative study of ER-FRP laminated beam design using ACI 440 2R-08 and ISIS Canada method", *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, Vol. I/ Issue III/April-June, 2012, pp 200-203.
- [6] Chennareddy R. and Taha M.M.R., "Effect of combining near-surface-mounted and U-wrap fiber-reinforced polymer strengthening techniques", *ACI Structural Journal*/May-June 2017, pp 721-730.
- [7] Coelho M., Neves L., Sena-Cruz J., "Designing NSM FRP systems in concrete using partial safety factors", *Composites Part B*, 2017, pp 12-23.
- [8] D'Antino T., Pisani M.A., "Evaluation of the effectiveness of current guidelines in determining the strength of RC beams retrofitted by means of NSM reinforcement", *Composite Structures*, 167, 2017, pp 166-177.
- [9] Daghash S.M., Ozbulut O.E., "Flexural performance evaluation of NSM basalt FRP-strengthened concrete beams using digital image correlation system", *Composite Structures*, 176, 2017, pp 748-756.
- [10] Darain K.M., Jumaat M.Z., Shukri A.A., Obaydullah M., Huda M.N., Hosen M.A., and Hoque N., "Strengthening of RC Beams Using Externally Bonded Reinforcement Combined with Near-Surface Mounted Technique", *Polymers*, 8, 2016, pp261.
- [11] El-Gamal S.E., Al-Nuaimi A., Al-Saidy A., Al-Lawati A., "Efficiency of near surface mounted technique using fiber reinforced polymers for the flexural strengthening of RC beams", *Construction and Building Materials*, 118, 2016, pp 52-62.
- [12] Gopinath S., Murthy A.R., Patrawala H., "Near surface mounted strengthening of RC beams using basalt fiber reinforced polymer bars", *Construction and Building Materials* 111, 2016, pp 1-8.
- [13] ISIS, Strengthening reinforced concrete structures with externally-bonded fibre reinforced polymers, ISIS Canada Design Manuals, Winnipeg, Manitoba, 2001.
- [14] Rezazadeh M., Barros J.A.O., Ramezansefat H., "End concrete cover separation in RC structures strengthened in flexure with NSM FRP: Analytical design approach", *Engineering Structures*, 128, 2016, pp 415-427.
- [15] Sharaky I.A., Reda R.M., Ghanemd M., Seleemb M.H., Sallam H.E.M., "Experimental and numerical study of RC beams strengthened with bottom and side NSM GFRP bars having different end conditions", *Construction and Building Materials*, 149, 2017, pp 882-903.

(BBT nhận bài: 04/10/2018, hoàn tất thủ tục phản biện: 15/11/2018)