ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG CHỊU CẮT CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP THEO "LÝ THUYẾT MIỀN NÉN CẢI TIẾN ĐƠN GIẢN"

(EVALUATION THE SHEAR CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE BEAM ACCORDING TO SIMPLIFIED MODIFIED COMPRESSION FIELD THEORY)

Đặng Hồng Long- *Khoa Xây dựng, honglongx1c@gmail.com*

Phạm Phú Anh Huy *– Khoa Xây dựng, Anhhuy2006@gmail.com*

Tóm tắt: *Đánh giá khả năng chịu cắt của dầm bê tông cốt thép (BTCT) là vấn đề phức tạp đã và đang được nghiên cứu trên thế giới. Mô hình đánh giá khả năng chịu cắt của dầm BTCT tùy thuộc vào quan điểm cụ thể. Tuy nhiên trong nhưng năm gần đây, việc đánh giá khả năng chịu cắt của dầm BTCT theo mô hình Lý thuyết miền nén cải tiến (Modified Compression Field Theory-MCFT) đang cho thấy nhiều ưu điểm, và thực tế là được được nghiên cứu và đưa vào tiêu chuẩn của một số quốc gia như Mỹ, Canada...Phương pháp đánh giá khả năng chịu cắt của dầm BTCT theo MCFT là một quy trình lặp khá phức tạp, đồng thời cần có một số số liệu thực nghiệm để tính toán, vì vậy cần đến sự hỗ trợ của phần mềm chuyên dụng. Do vậy rất khó can thiệp số liệu và kiểm soát kết quả tính. Trong bài báo này, nhóm tác giả muốn giới thiệu một phương pháp thực hành đơn giản hơn được dựa trên mô hình đánh giá khả năng chịu cắt theo MCFT gọi là "Simplified MCFT". Một số ví dụ tính toán theo Simplified MCFT để làm rõ quy trình tính toán.*

Abstract: Evaluation of the shear capacity of RC beam is very complex problem and being studied in the world. The model for the evaluation of the shear capacity of RC beam depends on the view of each nation, and particular condition. However, in recent years, evaluation of the shear capacity of RC beam according to Modified Compression Field Theory (MCFT) shows various advantages, MCFT has studied and applied to the standard of some nations as America, Canada... Evaluation of the shear capacity of RC beam according to MCFT is a complex repeated progress and needs the help from computer software. This paper introduces a practical method that simpler based on MCFT to evaluate the shear capacity of RC beam, denoted "simplified MCFT". Some of examples are conducted to make clearly procedure of evaluation.

Từ khóa: khả năng chịu cắt, miền nén cải tiến, miền nén cải tiến đơn giản, dầm bê tông cốt thép, cốt đai.

Key words: shear capacity; modified compression field theory; simplified modified compression field; RC beam; stirrup

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhiều nghiên cứu [2],[3],[4] đã chỉ ra khả năng chịu cắt của dầm BTCT trên tiết diện nghiêng là sự đóng góp của các thành phần sau:

V_{cz} : lực cắt tại vùng bê tông chịu nén chưa xuất hiện vết nứt.

$V_i = V_{ix} + V_{iy}$: lực liên kết tại tại bề mặt khe nứt thông qua sự cài chặt cốt liệu, được xác định thông qua thí nghiệm, có giá trị bằng khoảng 1/3 tổng giá trị lực cắt [5].

V_d : lực ngang qua cốt thép chịu kéo (phụ thuộc vào chiều dày lớp bê tông bảo vệ cốt dọc).

$V_s = nA_v f_v$: tổng lực cắt trong cốt đai cắt qua vết nứt nghiêng.

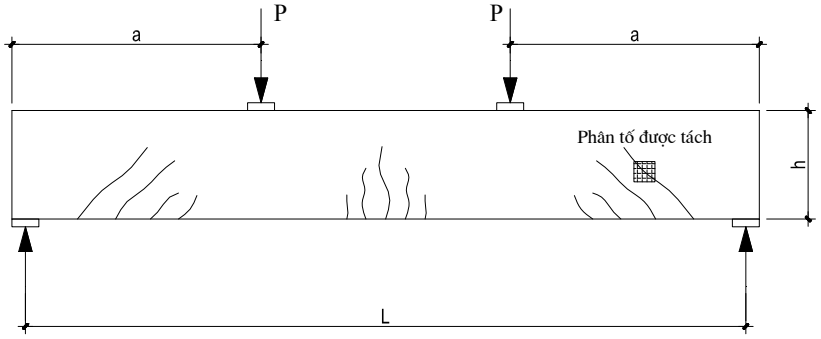
Như vậy, thực tế có nhiều yếu tố tham gia đóng góp vào khả năng chịu cắt của dầm.Vấn đề xây dựng các công thức xác định khả năng chịu cắt của dầm BTCT tùy thuộc vào quan điểm sử dụng mô hình tính toán của từng quốc gia. Trong những năm gần đây, mô hình *Miền nén cải tiến (MCFT)* xây dựng trên cơ sở lý thuyết- thực nghiệm do Collins và Vechio phát triển năm 1986 cho kết quả dự báo gần với thực tế [4]. Ngoài các yếu tố truyền thống ảnh hưởng đến khả năng chịu cắt, mô hình MCFT còn xét đến ảnh hưởng của ứng suất kéo trong vùng bê tông bị nứt. Khi nứt, ứng suất cắt truyền qua vết nứt thông qua cốt thép liên kết vết nứt, miễn là cốt thép không chảy, bê tông giữa các vết nứt xem là có hiệu quả sau đó. Các kết quả thực nghiệm được tiến hành ở ba quốc gia (Mỹ, Canada, Nhật) trong suốt gần 20 năm cho thấy MCFT dự đoán khả năng chịu cắt của dầm BTCT với mức độ sai lệch rất khả quan là dưới 12,2% so với thực tế [5]. Mặc dù vậy, quy trình đánh giá khả năng chịu cắt của dầm theo MCFT là khá phức tạp và phải sử dụng phần mềm chuyên dụng *Response2000* do nhóm tác giả của Đại học Toronto (Canada) phát triển. Trong bài báo này, tác giả giới thiệu sử dụng phương pháp *Simplified MCFT* do chính tác giả của MCFT là Bentz, Collins và Vechio đề xuất [5] và cho kết quả sai lệch so với MCFT là không quá 10%. Simplified MCFT thực chất là một quá trình tính lặp, sơ đồ khối quy trình đánh giá theo Simpliffied MCFT được trình bày ở mục tiếp theo và quy trình lặp được tác giả lập trình trên phần mềm Maple 13.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

a. Lý thuyết miền nén cải tiến

Lý thuyết miền nén cải tiến (MCFT) được đưa ra bởi Vecchio và Collins [4],[5],[6]. Khác với các mô hình truyền thống, MCFT có kể tới ảnh hưởng của ứng suất kéo trong vùng bê tông bị nứt. Khi nứt, ứng suất cắt truyền qua vết nứt thông qua cốt thép liên kết vết nứt, miễn là cốt thép không chảy. Bê tông giữa vết nứt được coi là có hiệu quả sau đó. Người ta nhận thấy là ứng suất cục bộ trong cả bê tông và cốt thép sẽ khác biệt từ điểm này đến điểm khác trong vùng bê tông bị nứt, với ứng suất cốt thép cao nhưng ứng suất kéo của bê tông thấp tại các điểm nứt. Khi xác định giá trị góc của vết nứt nghiêng θ từ phương trình của Wagner, các điều kiện tương thích liên hệ biến dạng trong vùng bê tông bị nứt đối với biến dạng trong cốt thép được mô tả theo biến dạng trung bình, trong đó biến dạng được đo dọc theo chiều dài cơ sở lớn hơn chiều rộng của vết nứt.

Xét một dầm BTCT như hình vẽ 1, với phân tố được xét như các hình vẽ 2,3 và 4.



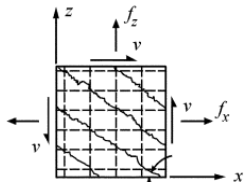
Hình 1: Mô hình dầm thí nghiệm

Lý thuyết MCFT được thể hệ thông qua hệ thống phương trình sau:

Các phương trình cân bằng

Ứng suất trung bình

$$f_x = \rho_x f_{sx} + f_1 - v\cot\theta \qquad (1)$$



$$f_z = \rho_z f_{sz} + f_1 - v\tan\theta \quad (2)$$

$$v = (f_1 + f_2)/(\tan\theta + \cot\theta) \quad (3)$$

Ứng suất tại vết nứt:

$$f_{sxcr} = (f_x + v\cot\theta + v_{ci}\cot\theta)/\rho_x \quad (4)$$

$$f_{szcr} = (f_z + v\tan\theta - v_{ci}\tan\theta)/\rho_z \quad (5)$$

Điều kiện cân bằng hình học:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_z + \varepsilon_2 \quad (6)$$

$$\gamma_{xz} = 2(\varepsilon_x + \varepsilon_2)\cot\theta \quad (7)$$

Bề rộng vết nứt:

$$w = s_\theta \varepsilon_1 \quad (8)$$

$$s_\theta = 1/\left(\frac{\sin\theta}{s_x} + \frac{\cos\theta}{s_z}\right) \quad (9)$$

$$\tan^2\theta = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_2}{\varepsilon_z + \varepsilon_2} \quad (10)$$

Quan hệ giữa ứng suất và biến dạng:

$$f_{sx} = E_s\varepsilon_x \le f_{yx} \quad (11)$$

$$f_{sz} = E_s\varepsilon_z \le f_{yz} \quad (12)$$

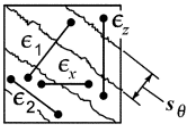
$$f_2 = \frac{f_c'}{0,8 + 170\varepsilon_1}\left[2\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c'} - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c'}\right)^2\right] \quad (13)$$

$$f_1 = 0,33\sqrt{f_c'}/(1 + \sqrt{500\varepsilon_1})Mpa \quad (14)$$

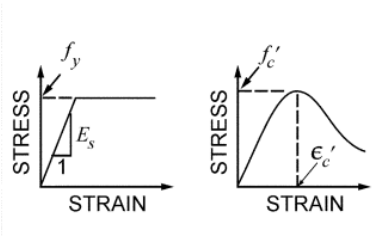
Ứng suất cắt tại vết nứt:

$$v_{ci} = \frac{0,18\sqrt{f_c'}}{0,31 + \frac{24w}{a_g + 16}} \quad (15)$$

Hình 1: Ứng suất của phân tố tại vị trí nứt



Hình 2: Các biến dạng tại vết nứt



Hình 3: Đồ thị quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của thép và bê tông

Giải thích các đại lượng từ phương trình (1) đến (15)

Trục x của hệ trục tọa độ được lấy theo phương dọc trục của cấu kiện.

f_x, f_{yx}, f_{yz}: ứng suất kéo tổng cộng trong cốt thép dọc, giới hạn chảy của cốt thép dọc và cốt đai

$f_{sx}, f_{sz},$: ứng suất kéo trong mỗi thanh cốt dọc, cốt đai;

f_{sxcr}, f_{szcr}: ứng suất kéo trong cốt dọc, cốt đai tại thời điểm phá hoại;

ρ_x, ρ_z : hàm lượng cốt thép dọc, hàm lượng cốt đai;

v : ứng suất cắt;

θ : góc nghiêng của vết nứt;

f_1, f_2 : ứng suất kéo và nén của dải bê tông giữa các vết nứt nghiêng

$\varepsilon_x, \varepsilon_z, \varepsilon_c^{'}$: biến dạng kéo của thép dọc, cốt đai, và biến dạng nén của bê tông

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ biến dạng kéo, biến dạng nén của dải bê tông giữa các vết nứt nghiêng

v_{ci} : ứng suất cắt trung bình;

w : bề rộng của vết nứt;

a_g : độ lớn của cốt liệu;

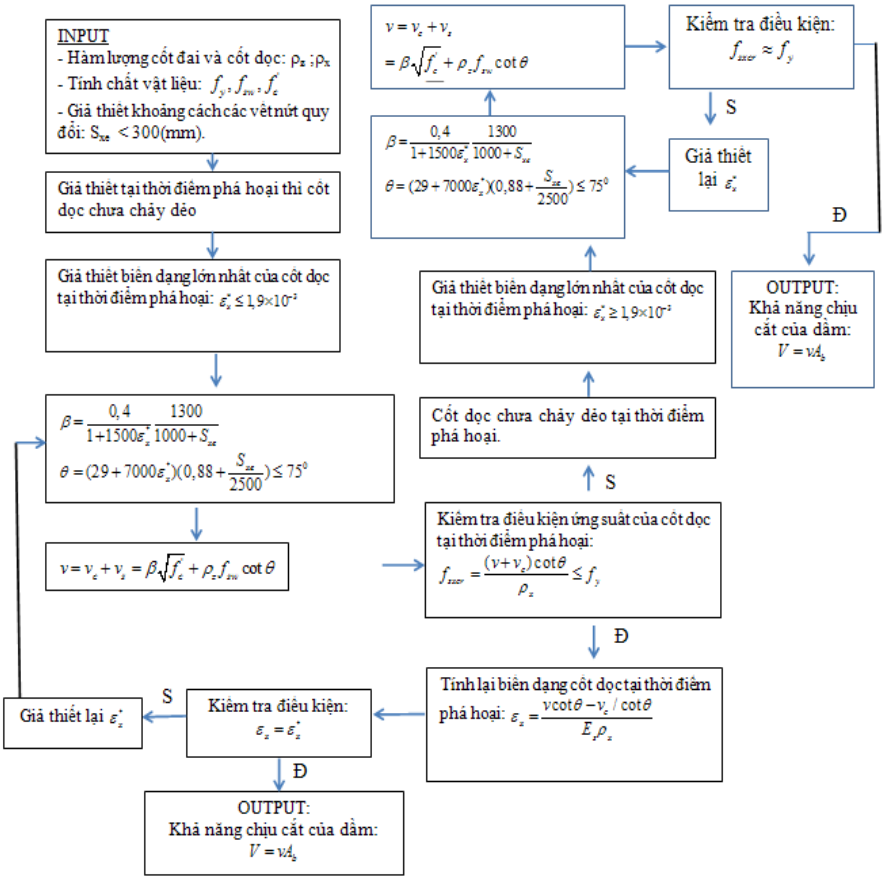
$E_s, f_c^{'}$: mô-đun đàn hồi của thép; cường độ chịu nén của bê tông;

s_x, s_z, s_θ : khoảng cách giữa các vết nứt nghiêng;

Qua các kết quả thí nghiệm và so sánh với lý thuyết, MCFT đưa ra những điểm tiến bộ hơn và một dự báo tin cậy về khả năng kháng cắt của cấu kiện.

b. Phương pháp Simplified MCFT

Simplified MCFT là phương pháp đánh giá khả năng chịu cắt của dầm BTCT dựa trên mô hình lý thuyết miền nén cải tiến được đề xuất bởi chính nhóm tác giả của MCFT. Thực chất Simplified MCFT là một quá trình tính lặp. Việc giả thiết các điều kiện ban đầu cho bài toán lặp theo Simplified MCFT là rất quan trọng, đặc biệt là giả thiết về biến dạng tỷ đối cực đại của cốt thép dọc (maximum longitudinal strain) tại thời điểm phá hoại sẽ ảnh hưởng đến số bước lặp. Quy trình tính lặp theo Simplified MCFT được tác giả trình bày thành sơ đồ khối như *hình 5* và lập trình tính toán trên phần mềm Maple 13.



Hình 5. Quy trình đánh giá khả năng chịu cắt của dầm theo Simplified MCFT

Quy trình đánh giá khả năng chịu cắt của dầm theo Simplified MCFT sẽ được trình bày rõ hơn qua các ví dụ số thực hiện ở mục 3.

3. BÀI TOÁN NGHIÊN CỨU

Đánh giá khả năng chịu cắt của dầm theo Simplified MCFT với các dữ kiện ban đầu như sau:

- Tiết diện dầm: $b\times h=250\times500(mm)$; Chiều dày lớp bê tông bảo vệ là 30mm, khoảng cách trung bình từ trọng tâm cốt dọc đến mép xa nhất vùng bê tông chịu nén lấy là h_0=450mm.
- Bê tông cấp độ bền B25: $f_c'=18,5MPa$;
- Cốt thép dọc chịu lực sử dụng nhóm AII có cường độ chịu kéo tiêu chuẩn $f_y=295MPa$;
- Cốt thép đai sử dụng nhóm thép AI có $f_{sw}=235MPa; E_s=2100MPa$; bố trí cốt đai đường kính $\phi8(a_{sw}=50,3mm^2)$, đai 2 nhánh (n=2), bố trí đều trên toàn dầm, suy ra hàm lượng cốt đai là $\rho_z=\frac{na_{sw}}{bh}\times100\%=\frac{2\times50,3}{250\times500}\times100\%=0,0805\%$
- Trong điều kiện vật liệu Việt Nam, biến dạng tỷ đối của cốt thép dọc ở trạng thái chảy dẻo là $\varepsilon_x\approx0,002$.

a. Trường hợp hàm lượng cốt dọc $\rho_x=0,5\%$

- Giả thiết trước là tại thời điểm xảy ra phá hoại thì cốt thép dọc chưa chảy dẻo, và biến dạng tỷ đối trong thép dọc lớnn nhất là $\varepsilon_x^*=1,0\times10^{-3}$;

- Giả thiết khoảng cách giữa các vết nứt nghiêng quy đổi là S_{xe} = 150mm.
- Tính các hệ số θ và β:

$$\beta = \frac{0.4}{1+1500\times\varepsilon_x^*}\times\frac{1300}{1000+S_{xe}} \approx 0,18087$$

$$\theta = (29+7000\times\varepsilon_x^*)\times(0,88+\frac{S_{xe}}{2500}) \approx 33,84^0$$

- Tính giá trị ứng suất cắt tại thời điểm phá hoại:

$$\upsilon = \beta\sqrt{f_c^{'}} + \rho_z f_{sw}\cot\theta \approx 1,06MPa$$

- Tính giá trị ứng suất kéo trong cốt dọc tại thời điểm phá hoại:

$$f_{sxcr} = \frac{(\upsilon+\beta\sqrt{f_c^{'}})\cot\theta}{\rho_x} \approx 548,28MPa > f_y = 295MPa$$

Như vậy giả thiết ban đầu là tại thời điểm phá hoại cốt dọc chưa chảy dẻo là không chính xác. Do đó cần phải giả thiết lại giá trị $\varepsilon_x^* \geq 1,9\times10^{-3}$, chọn $\varepsilon_x^* = 1,9\times10^{-3}$.

- Tính lại tương tự các giá lần lượt là: $\beta \approx 0,1175; \theta \approx 39,762^0; \upsilon \approx 0,73247MPa;$
- Tính lại giá trị ứng suất kéo trong cốt dọc:

$$f_{sxcr} = \frac{(\upsilon+\beta\sqrt{f_c^{'}})\cot\theta}{\rho_x} \approx 297,49MPa > f_y = 295MPa$$

Lặp lại quá trình tính toán một cách tương tự bằng cách tăng ε_x^*, kết quả chỉ dừng lại khi $f_{sxcr} \approx f_y$, lúc này tương ứng với giá trị
$\varepsilon_x^* = 1,914\times10^{-3}; \beta \approx 0,11681; \theta \approx 39,854^0; \upsilon \approx 0,72898MPa;$

Khả năng chịu cắt của dầm là: $V = \upsilon.b.h_0 = 82,011kN$.

b.Trường hợp hàm lượng cốt dọc $\rho_x = 2,5\%$

- Giả thiết trước là tại thời điểm xảy ra phá hoại thì cốt thép dọc chưa chảy dẻo, và biến dạng tỷ đối trong thép dọc lớnn nhất là $\varepsilon_x^* = 1,0\times10^{-3}$;
- Giả thiết khoảng cách giữa các vết nứt nghiêng quy đổi là S_{xe} = 150mm.
- Tính các hệ số θ và β:

$$\beta = \frac{0,4}{1+1500\varepsilon_x^*}\times\frac{1300}{1000+S_{xe}} \approx 0,18087$$

$$\theta = (29+7000\varepsilon_x^*)\times(0,88+\frac{S_{xe}}{2500}) \approx 33,84^0$$

- Tính giá trị ứng suất cắt tại thời điểm phá hoại:

$$\upsilon = \beta.\sqrt{f_c^{'}} + \rho_z \times f_{sw}\times\cot\theta \approx 1,06MPa$$

- Tính giá trị ứng suất kéo trong cốt dọc tại thời điểm phá hoại:

$$f_{sxcr} = \frac{(\upsilon+\beta\sqrt{f_c^{'}})\cot\theta}{\rho_x} \approx 109,657MPa < f_y = 295MPa$$

Như vậy giả thiết ban đầu là đúng, tiến hành kiểm tra lại biến dạng trong cốt dọc:

$\varepsilon_x = \dfrac{\upsilon \cot\theta - \dfrac{\beta\sqrt{f_c'}}{\cot\theta}}{E_s\rho_x} \approx 0,202\times10^{-3} \neq \varepsilon_x^*$; Cần giả thiết lại ε_x^*. Quá trình được lặp lại đến khi $\varepsilon_x^* \approx \varepsilon_x = 0,3849\times10^{-3}; f_{sxcr} \approx 194,96MPa < f_y$. Giá trị khả năng chịu cắt của dầm thu được là $V = \upsilon b h_0 \approx 175,613kN$.

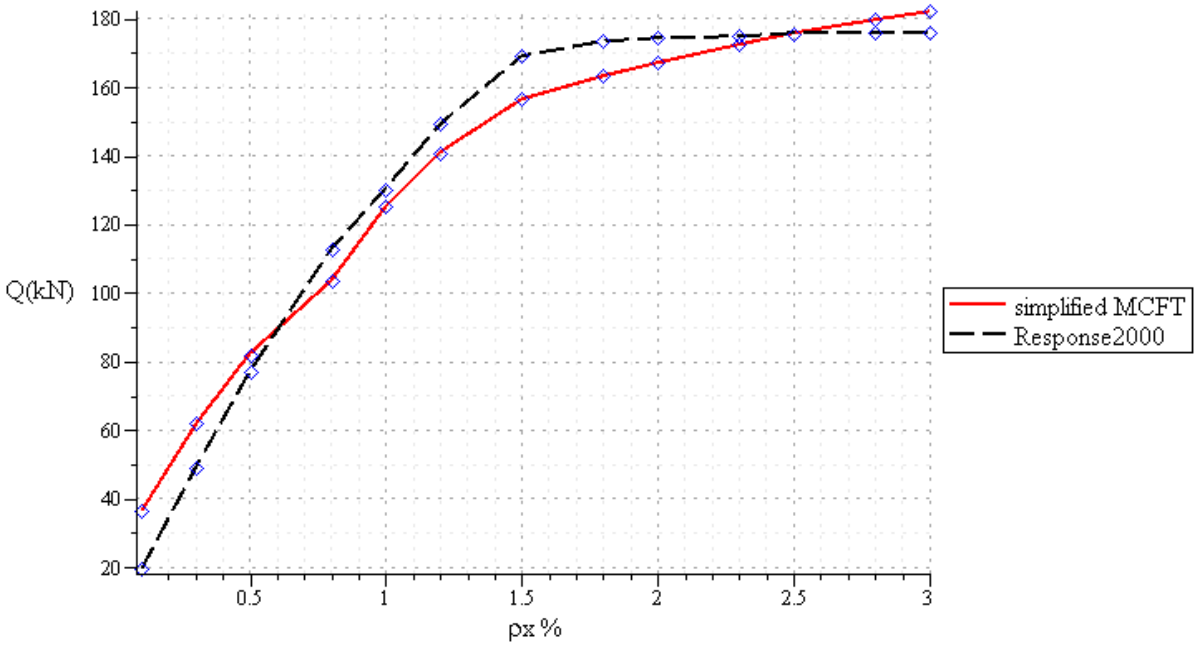
Với các hàm lượng cốt dọc ρ_x thay đổi từ 0,1% đến 2,5%, quá trình thực hiện được tiến hành tương tự. Quá trình tính toán được tác giả lập trình trên phần mềm Maple 13, kết quả tổng hợp theo *bảng 1.* Kết quả tính theo Simplified MCFT được so sánh với kết quả tính khi sử dụng phần mềm Response 2000 được trình bày ở *bảng 2.*

Bảng 1. Kết quả tính khả năng chịu cắt của dầm theo Simplified MCFT

Kết quả tính	**Hàm lượng cốt dọc $\rho_x(\%)$**												
	0,1	**0,3**	**0,5**	**0,8**	**1,0**	**1,2**	**1,5**	**1,8**	**2,0**	**2,3**	**2,5**	**2,8**	**3,0**
$\varepsilon_x\times10^{-3}$	5,206	2,856	1,914	1,300	0,917	0,705	0,537	0,478	0,447	0,407	0,384	0,356	0,339
β	0,051	0,086	0,117	0,153	0,191	0,220	0,250	0,263	0,270	0,280	0,286	0,294	0,300
θ^0	61,52	46,05	39,85	35,81	33,29	31,90	30,81	30,42	30,21	29,95	29,81	29,61	29,51
υ(Mpa	0,3234	0,5503	0,7289	0,9214	1,1069	1,2489	1,3921	1,4512	1,4878	1,5337	1,5610	1,5977	1,620
V(kN)	36,38	61,92	82,01	103,66	125,06	140,93	156,61	163,26	167,37	172,55	175,61	179,75	182,24

Bảng 2. Kết quả so sánh khả năng chịu cắt tính theo Simplified MCFT và theo phần mềm Response2000

Phương pháp tính	Khả năng chịu cắt (kN) theo các % hàm lượng cốt dọc												
	0,1	**0,3**	**0,5**	**0,8**	**1,0**	**1,2**	**1,5**	**1,8**	**2,0**	**2,3**	**2,5**	**2,8**	**3,0**
Simplified MCFT	36,4	61,9	82,0	103.7	125,1	140,9	156,6	163,3	167,4	172,5	175,6	179,7	182,2
Response 2000	19,6	49,2	77,0	112,6	130,3	149,2	169,3	173,4	174,8	175,0	175,7	175,8	176,0



Hình 6. So sánh kết quả tính theo Simplified MCFT và Response 2000

Từ kết quả khảo sát bài toán với trường hợp thay đổi hàm lượng cốt dọc, rút ra một số nhận xét sau:

- Phương pháp Simplified MCFT dựa trên mô hình lý thuyết miền nén cải tiến có xét ảnh hưởng của hàm lượng cốt dọc đến khả năng chịu cắt của dầm.
- Hàm lượng cốt dọc tăng thì khả năng chịu cắt của dầm tăng, tuy nhiên khi hàm lượng cốt dọc $\rho_x > 2\%$ thì ảnh hưởng của hảm lượng cốt dọc đến khả năng chịu cắt của dầm giảm dần, điều này phù hợp với thực tế vì tại thời điểm xảy ra phá hoại thì sự nén vỡ vùng bê tông chịu nén có khả năng xảy ra trước khi cốt dọc chảy dẻo.
- Với hàm lượng cốt dọc trong khoảng từ 0,5% đến 2,5% thì kết quả tính simplified MCFT thấp hơn kết quả tính khi sử dụng phần mềm Response2000 (phần mềm xây dựng dựa trên MCFT), mức độ chênh lệch nhỏ hơn 8% và thiên về an toàn.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Đánh giá khả năng chịu cắt của dầm BTCT theo mô hình lý thuyết miền nén cải tiến là xu hướng được áp dụng nhiều trong những năm gần đây vì cho kết quả phù hợp với thực nghiệm. Việc sử dụng phương pháp Simplified MCFT dựa trên mô hình MCFT để đánh giá khả năng chịu cắt của dầm là một hướng còn khá mới mẻ trong nước . Bài báo trình bày thuật

toán tính lặp Simplified MCFT đồng thời tích hợp lập trình để đánh giá khả năng chịu cắt của dầm BTCT khi thay đổi hàm lượng cốt dọc từ [0.1 ÷3.0]% . Khi hàm lượng cốt dọc thay đổi trong khoảng phổ biến từ 0,5% đến 2,5% thì kết quả tính theo Simplified MCFT khá sát với kết quả thực nghiệm (kết quả tính thông qua Response2000) với mức độ chênh lệch là chấp nhận được và thiên về an toàn. Bên cạnh đó, tư duy vòng lặp khiến phương pháp dễ dàng tích hợp với lập trình tin học để mở ra nhiều hướng nghiên cứu mới nhằm thuận lợi trong thực hành tính toán về khả năng chịu cắt của dầm BTCT.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] ACI Committee 318 (2008), Building Code Requirementsfor Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (318R-08). Farmington Hills: American Concrete Institute.

[2] Abdul Ghaffar (2010), *Development of shear capacity equations for rectangular reinforced concrete beam*, Pak. J. Engg. & Appl. Sci. Vol 6, Jan, 2010 (p1-8)

[3] Bentz, E.C., Vecchio, F.J., & Collins, M.P. (2006). *Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements,* ACI Structural Journal, v.103, n.4, pp.614-624

[4] Collins, M.P., & Vecchio, F.J. (1986). *The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear,* ACI Journal, v.83, n.2, pp.219-231.

[5] Evan C. Bentz, Frank J. Vecchio, and Michael P. Collins (2006), *Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements*, ACI structure journal, August2006 (p614-p624)

[6] Frank J. Vecchio and Michael P. Collins (1986), *The modified compression field theory for reinoforced concrete elements subjected to shear*, ACI journal, March 1986

[7] Ibrahim M. Metwally (2012), Evaluate the capability and accuracy of response-2000 program in prediction of the shearcapacities of reinforced and prestressed concrete members, HBRC Journal (2012) 8, p99-106.