

DỰ BÁO ĐỘ VỒNG CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP CHỊU TẢI TRỌNG DÀI HẠN

TS. ĐẶNG VŨ HIỆP

Trường đại học Kiến trúc Hà Nội

Tóm tắt: *Phương pháp dự báo độ võng của dầm bê tông cốt thép kể đến ảnh hưởng của từ biến kết hợp với sự xuất hiện vết nứt trong bê tông dựa trên tiêu chuẩn châu Âu Eurocode 2 (EC2) được sử dụng. Kết quả tính toán sau đó được so sánh với kết quả phân tích bằng phần mềm LIRA-SAPR 2013 cũng như một số kết quả thực nghiệm đã được công bố trong các tài liệu [3, 5, 6]. Kết quả cho thấy dự báo độ võng cuối cùng khi sử dụng tiêu chuẩn Eurocode 2 khá an toàn, trong khi dự báo bằng phần mềm LIRA-SAPR 2013 kém thận trọng hơn so với kết quả thí nghiệm.*

Từ khóa: *từ biến, dầm bê tông cốt thép, nứt, độ võng.*

Abstracts: *The method of deflection prediction for RC beams taking into account creep effects in conjunction with cracks of concrete based on Eurocode 2 (EC2) is used. The computed results are compared to results analyzed from LIRA-SAPR 2013 software as well as several test data reported in the literature [3, 5, 6]. The results show that the total deflection using the Eurocode 2 produces somewhat safe predictions; on the other hand, the prediction using LIRA-SAPR 2013 software produces lack consistency against test data.*

Keywords: *creep, reinforced concrete beams, cracks, deflection.*

1. Giới thiệu

Cấu kiện bê tông cốt thép ngày nay sử dụng vật liệu có cường độ càng cao nên có xu hướng giảm tiết diện, hơn nữa chúng vượt nhịp và chịu tải trọng tương đối lớn, do đó tính toán chính xác độ võng trở thành vấn đề quan trọng trong thiết kế. Đối với các kết cấu bên trong nhà độ võng quá mức có thể gây hư hại các lớp hoàn thiện, gây rò rỉ ống nước, làm ảnh hưởng đến sự vận hành của thiết bị, máy móc,... Đối với các kết cấu ngoài trời độ võng quá mức có thể gây đọng nước, làm thấm nước,... Việc phân tích chính xác độ võng cần xem xét tới nhiều yếu tố khác nhau như sự xuất hiện của vết nứt, hiệu

ứng tension stiffening, co ngót, từ biến. Trong đó các yếu tố co ngót, từ biến là yếu tố phụ thuộc thời gian. Lịch sử tác dụng của tải trọng cũng là một nhân tố quan trọng vì nó thay đổi (tăng dần) trong quá trình thi công công trình để đạt tới giá trị thiết kế.

Vết nứt trong dầm bê tông cốt thép nói chung xuất hiện dưới tải trọng sử dụng do đó độ võng của dầm theo thời gian càng bị ảnh hưởng. Một phương pháp truyền thống là tính toán độ cong tại các vị trí dọc theo trục dầm sau đó tích phân trên toàn bộ chiều dài để thu được độ võng. Tuy nhiên phương pháp này đôi khi phức tạp, khó vận dụng thực hành cho các kỹ sư thiết kế. Các tiêu chuẩn hiện đại trên thế giới (ACI 318-2005, Eurocode 2) đều cho phép tính toán thực hành độ võng theo thời gian của dầm bê tông cốt thép. Theo đó hai nhóm phương pháp chính thường được sử dụng là: (1) phương pháp hệ số (ACI 318-2005) độ võng phụ thuộc thời gian dự báo bằng cách nhân hệ số khuếch đại thực nghiệm với độ võng tức thời; (2) phương pháp mô đun đàn hồi hiệu quả điều chỉnh theo thời gian (Eurocode 2) mô đun đàn hồi thực của bê tông được thay thế bằng mô đun đàn hồi hiệu quả có xem xét đến từ biến và co ngót thay đổi theo thời gian. Phương pháp này được nhiều tác giả trên thế giới sử dụng.

Bài báo giới thiệu và tính toán cụ thể độ võng theo thời gian của dầm bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn Eurocode 2 có xem xét sự xuất hiện của vết nứt và tuổi bê tông t_0 tại thời điểm chịu tải trọng. Các kết quả tính toán được so sánh với một số kết quả thực nghiệm trên thế giới và kết quả phân tích bằng phần mềm LIRA-SAPR 2013. Ảnh hưởng của co ngót không được xem xét vì các kết quả thí nghiệm và phần mềm LIRA-SAPR 2013 chỉ xem xét ảnh hưởng của từ biến.

2. Phương pháp dự báo độ võng của dầm

2.1 Phương pháp thiết kế tiêu chuẩn Eurocode 2 [2]

2.1.1 Mô đun đàn hồi hiệu quả của bê tông

Để xét đến ảnh hưởng của từ biến, khi tính toán độ võng của dầm bê tông cốt thép chịu tác dụng tải trọng dài hạn thì mô đun đàn hồi thực của bê tông

được thay thế bằng mô đun đàn hồi hiệu quả $E_{c,eff}$ có xem xét đến hệ số từ biến $\varphi(t, t_0)$:

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}(t)}{(1 + \varphi(t, t_0))} \quad (1)$$

Trong đó: $E_{cm}(t)$ – mô đun đàn hồi thay đổi theo thời gian;

$$E_{cm}(t) = \left(f_{cm}(t) / f_{cm} \right)^{0.3} E_{cm} \quad (2)$$

f_{cm} – cường độ chịu nén trung bình của bê tông tuổi 28 ngày;

$f_{cm}(t)$ – cường độ chịu nén trung bình của bê tông ở tuổi t ngày;

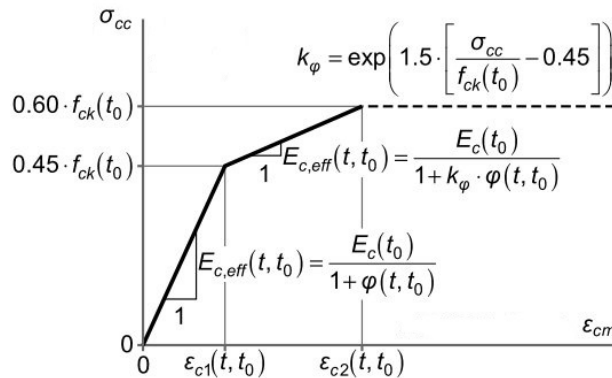
$\varphi(t, t_0)$ – hệ số từ biến phụ thuộc vào tuổi của bê tông và thời gian tác dụng tải trọng (xác định theo hướng dẫn ở phụ lục B của EC2);

t_0 – tuổi của bê tông tại thời điểm gia tải (ngày).

$\varphi(t, t_0)$ không những phụ thuộc vào thời gian mà còn phụ thuộc vào độ lớn của ứng suất trong bê tông vùng nén tại thời điểm gia tải. Theo Eurocode2 thì hệ số $\varphi(t, t_0)$ được xác định theo hai trường hợp như sau:

- Khi ứng suất nén trung bình trong bê tông $\sigma_{cc} < 0.45 f_{ck}(t_0)$ (từ biến tuyến tính);
- Khi ứng suất nén trung bình trong bê tông $0.45 f_{ck}(t_0) \leq \sigma_{cc} \leq 0.6 f_{ck}(t_0)$ (từ biến phi tuyến).

Dưới tác dụng của tải trọng sử dụng, nói chung, ứng suất nén trong bê tông xem như không vượt quá giá trị $0.6 f_{ck}(t_0)$. Minh họa cho hai trường hợp xác định $\varphi(t, t_0)$ như hình 1.



Hình 1. Quan hệ ứng suất-biến dạng của bê tông dưới tải trọng dài hạn

2.1.2 Tính toán độ cong của dầm

Eurocode 2 dự báo độ võng dưới tác dụng của tải trọng dài hạn dựa trên độ cong trung bình của hai giai đoạn: giai đoạn I chưa xuất hiện vết nứt trong bê tông vùng kéo; giai đoạn II vết nứt đã xuất hiện hoàn toàn trong vùng kéo.

- Độ cong của tiết diện không có khe nứt trong vùng kéo;

Khi cấu kiện không nứt, bê tông và cốt thép đều làm việc trong miền đàn hồi. Độ cong của dầm được xác định theo lý thuyết đàn hồi.

$$\varphi_{uc} = \left(\frac{1}{r} \right)_{uc} = \frac{M}{E_{c,eff} I_{uc}} \quad (3)$$

- Độ cong của tiết diện bị nứt hoàn toàn trong vùng kéo.

Trong giai đoạn này bỏ qua sự làm việc của bê tông vùng kéo, cốt thép chịu toàn bộ ứng suất kéo.

$$\varphi_{cr} = \left(\frac{1}{r} \right)_{cr} = \frac{M}{E_{c,eff} I_{cr}} \quad (4)$$

- Độ cong của dầm có xét đến vết nứt vùng kéo.

Theo EC2 độ cong của cấu kiện có khe nứt trong vùng kéo được tính toán như là độ cong “trung bình” của độ cong tại tiết diện có khe nứt trong vùng kéo và tiết diện không bị nứt trong vùng kéo.

$$\varphi = \xi \varphi_{cr} + (1 - \xi) \varphi_{uc} \quad (5)$$

Trong các công thức từ (3) đến (5):

$E_{c,eff}$ – mô đun đàn hồi hiệu quả của bê tông có xét đến ảnh hưởng của từ biến;

I_{uc} – mô men quán tính của tiết diện khi không bị nứt;

I_{cr} – mô men quán tính của tiết diện đã nứt;

φ_{uc} – độ cong của cầu kiện tương ứng với tiết diện không bị nứt;

φ_{cr} – độ cong của cầu kiện tương ứng với tiết diện bị nứt;

ξ – hệ số xét đến sự làm việc của bê tông vùng kéo giữa các vết nứt;

Đối với các cầu kiện chỉ chịu uốn đơn, hệ số ξ xác định như sau:

$$\xi = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_s} \right)^2 = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2 \quad (6)$$

β – hệ số xét đến tác dụng dài hạn của tải trọng:

$\beta = 1$ – tải trọng tác dụng ngắn hạn;

$= 0.5$ – tải trọng tác dụng dài hạn hoặc lặp;

σ_{cr} – ứng suất trong cốt thép chịu kéo tại tiết diện có mô men bằng mô men kháng nứt;

σ_s – ứng suất trong cốt thép chịu kéo tại tiết diện có khe nứt;

M_{cr} – khả năng kháng nứt của tiết diện;

M – mô men uốn do tải trọng tiêu chuẩn gây ra.

2.1.3 Tính toán độ võng của dầm

Sau khi xác định được độ cong thì việc xác định độ võng tại giữa nhịp của dầm có thể dùng công thức:

$$f = kL^2\varphi \quad (7)$$

Trong đó:

f – độ võng của dầm;

φ – độ cong “trung bình” tại giữa nhịp hoặc tại gối tựa của dầm công xôn;

L – nhịp dầm;

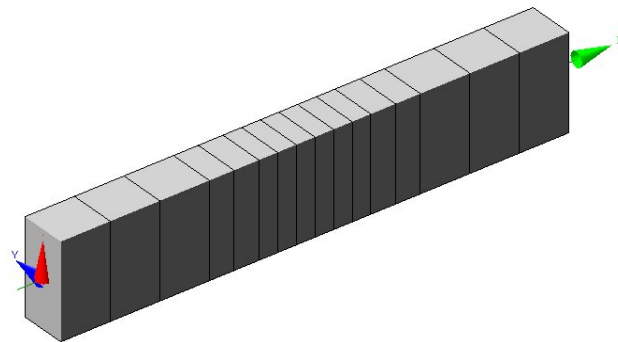
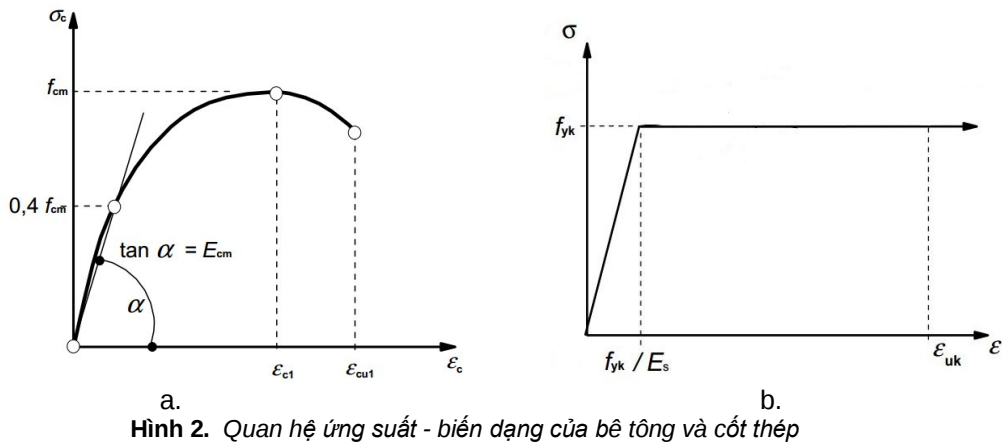
k – hệ số phụ thuộc vào dạng của biểu đồ mô men uốn.

2.2. Phương pháp phần tử hữu hạn-phần mềm LIRA-SAPR 2013 [4]

Phân tích phần tử hữu hạn của mỗi dầm được thực hiện trong phần mềm *LIRA-SAPR 2013*, phát triển bởi LIRALAND, Ukraine. Phần mềm có thể phân tích ứng xử uốn dưới tác dụng của tải ngắn hạn và tải dài hạn của dầm bê tông cốt thép khi chịu tải trọng sử dụng. Chương trình có khả năng mô phỏng sự làm việc của vật liệu bê tông và cốt thép ở giai đoạn ngoài đàn hồi. Đặc biệt phần mềm có thể mô phỏng ứng xử phụ thuộc vào thời gian của cầu kiện bê tông cốt thép.

Quy luật ứng xử của vật liệu bê tông sử dụng trong mô hình được giới thiệu ở hình 2a [2]. Các giá trị $\varepsilon_{c1}, \varepsilon_{cu1}, E_{cm}$ tùy thuộc vào giá trị f_{cm} và được tra trong [2]. Ở đây giá trị biến dạng cực hạn của bê tông chịu nén - uốn $\varepsilon_{cu1} = 3.5 \times 10^{-3}$ cho các cấp bê tông có $f_{cm} \leq 55 \text{ MPa}$. Quy luật ứng xử của vật liệu cốt thép được cho trên hình 2b [2]. Giá trị ε_{uk} được lấy bằng 2.5×10^{-2} và $E_s = 200000 \text{ MPa}$. Ngoài các thông số vật liệu nêu trên, để tính đến ảnh hưởng của tải trọng dài hạn (từ biến) các hệ số từ biến biểu kiến φ_o và hệ số phụ thuộc vào độ ẩm, kích thước biểu kiến của cầu kiện β_H được tính toán từ theo phụ lục B của tài liệu [2] được đưa vào phần mềm thông qua hộp thoại Nonlinear parameters. Ảnh hưởng của co ngót và thay đổi nhiệt độ không được xem xét trong *LIRA-SAPR 2013* [4].

Mô hình một dầm bê tông cốt thép trong *LIRA-SAPR 2013* được thể hiện trên hình 3. Lưới phần tử được chia đơn giản theo chiều cao tiết diện. Tại nơi có tải trọng tập trung gần giữa dầm lưới phần tử được chia dày hơn.



Hình 3. Chia lưới phần tử cho dầm chịu tải tập trung

3. Kết quả và bình luận

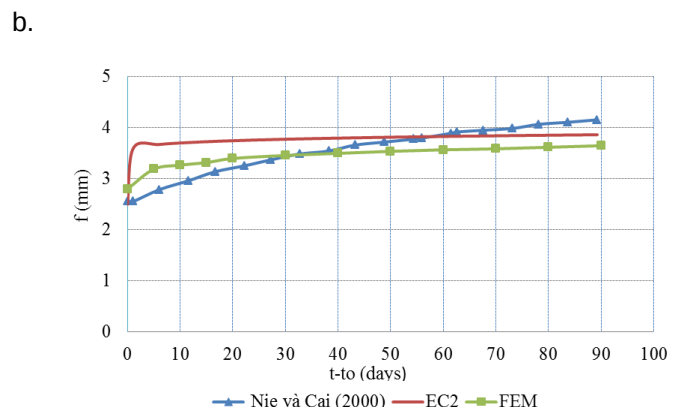
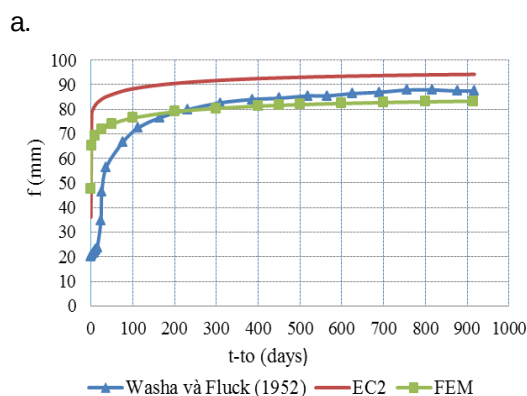
Các kết quả phân tích từ hai phương pháp trên được so sánh với các kết quả thí nghiệm trên các dầm bê tông cốt thép của các tác giả Washa và Fluck [3]; Bakoss và cộng sự [5]; Nie và Cai [6]. Các dầm này chịu tải trọng tĩnh dài hạn dạng phân bố

đều hoặc dạng tập trung, tuổi bê tông tại thời điểm gia tải $t_o = 28$ ngày. Nhiệt độ phòng trung bình trong thí nghiệm của Washa và Fluck [3] thay đổi từ $21.1^\circ C$ đến $29.4^\circ C$, của Bakoss và cộng sự [5] là $20^\circ C \pm 2$, của Nie và Cai [6] là $17.5^\circ C$.

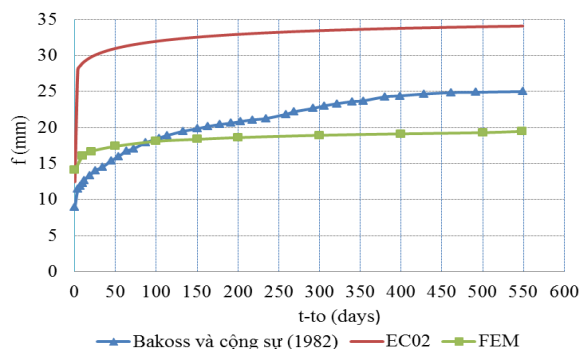
Thông số đầu vào của các dầm cho trong bảng 1.

Bảng 1. Dữ liệu dầm dùng cho phân tích

Tác giả	Tên dầm	b x h (mm)	RH%	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	f'_c (MPa)	Dạng tải trọng	Thời gian gia tải (ngày)
Washa và Fluck [3]	B3, B6	152x203	50	400	325	24	phân bố	915
Bakoss và cộng sự [5]	1B2	100x150	55	226	450	30	tập trung	548
Nie và Cai [6]	B5	200x400	61	1700	462	40	tập trung	90



C.



Hình 4. So sánh kết quả thí nghiệm chuyển vị giữa nhịp-thời gian gia tải ($t - t_0$) với EC2 và FEM

Kết quả thí nghiệm trên bốn dầm đơn giản khác nhau được so sánh với phương pháp thiết kế trong EC2 và phương pháp phần tử hữu hạn FEM thực hiện trong *LIRA-SAPR 2013* thể hiện trên hình 4. Từ các ví dụ đã phân tích thấy rằng kết quả phân tích độ võng cuối cùng bằng phương pháp phần tử hữu hạn có độ chênh lệch từ -12% đến -22% so với kết quả thực nghiệm. Kết quả tính toán độ võng cuối cùng trong EC2 cho sai số trong phạm vi khá rộng từ -2.4% đến $+37\%$. Theo Beeby và Narayanan [1], do có quá nhiều nhân tố ảnh hưởng đến độ chính xác khi dự báo độ võng nên một độ chính xác 20% có thể chấp nhận được trong thực tế. Một số nhận xét sơ bộ rút ra như sau: 1) Phương pháp thiết kế trong EC2 dự báo khá an toàn độ võng theo thời gian dưới tác dụng của tải trọng sử dụng; 2) Dự báo bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong *LIRA-SAPR 2013* kém thận trọng so với kết quả thí nghiệm. Đường quan hệ độ võng-thời gian gần sát với số liệu thực nghiệm. Cũng cần lưu ý là biến dạng do co ngót và thay đổi nhiệt độ không được tính đến trong phần mềm *LIRA-SAPR 2013*.

4. Kết luận

Bài báo sử dụng phương pháp dự báo độ võng của dầm dưới tác dụng của tải trọng dài hạn dựa trên phương pháp mô đun đàn hồi hiệu quả có điều chỉnh theo thời gian (Eurocode 2). Phương pháp khá đơn giản so với phương pháp phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến trong *LIRA-SAPR 2013*. Từ các kết quả tính toán có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Tiêu chuẩn *Eurocode 2* cho kết quả dự báo độ võng rất phân tán và có trường hợp lớn hơn khá nhiều so với kết quả thực nghiệm. Phương pháp sử dụng trong *Eurocode 2* phù hợp cho tính toán nhanh và thiên về an toàn.

- Phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm *LIRA-SAPR 2013* cho kết quả độ võng dài hạn với độ phân tán ít hơn và nhỏ hơn kết quả thực nghiệm với sai số trung bình khoảng 17% . Tuy nhiên ứng xử theo thời gian của dầm khi phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn cho kết quả gần với thí nghiệm hơn tiêu chuẩn *Eurocode 2*.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Beeby A. W. and Narayanan R. S. (2005), "Designers' Guide to EN 1992-1-1 and EN 1992-1-2", *Thomas Telford Publishing*.
- [2] Eurocode 2 (1992), *Design of concrete structures*.
- [3] Washa G. W. and Fluck P. G. (1952), "Effect of Compressive Reinforcement on the Plastic Flow of Reinforced Concrete Beams", *Journal of the American concrete institute*, Vol.49, October, pp.89-109.
- [4] LIRA-SAPR 2013, LiraLand. Tutorial.
- [5] Bakoss S. L., Gilbert R. I., Faulkes K. A. and Pulmano V. A. (1982), "Long-term deflections of reinforced concrete beams", *Magazine of Concrete Research*, Vol.34, No. 121, December, pp. 203-212.
- [6] Nie J. and Cai C. S. (2000), "Deflection of cracked RC beams under sustained loading", *Journal of structural engineering*, Vol. 126, No. 6, June, pp. 708-716.

Ngày nhận bài: 8/9/2017.

Ngày nhận bài sửa lần cuối: 16/10/2017.