

ĐỘ VÔNG DÀI HẠN CỦA KẾT CẤU DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP KHI XÉT TỚI SỰ GIÀ HÓA BÊ TÔNG

Nguyễn Mạnh Hùng^{a,*}, Nguyễn Trung Hiếu^a

^a*Khoa Xây dựng dân dụng & Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 02/06/2021, Sửa xong 28/06/2021, Chấp nhận đăng 29/06/2021

Tóm tắt

Sự làm việc dài hạn của kết cấu dầm bê tông cốt thép (BTCT) liên quan trực tiếp đến hai thành phần biến dạng dài hạn của bê tông là biến dạng từ biến, biến dạng co ngót. Bên cạnh các đặc trưng về biến dạng dài hạn thì sự già hóa của bê tông cũng là một đặc trưng khi bê tông làm việc lâu dài trên kết cấu công trình. Sự già hóa của bê tông được đặc trưng bởi hệ số già. Nội dung bài báo trình bày tính toán độ võng dài hạn của dầm BTCT khi xét đến ảnh hưởng của sự già hóa của bê tông với hai nội dung chính: (1) xây dựng mối quan hệ giữa hệ số từ biến và hệ số già dựa trên đề xuất của Bazant cho bê tông có các cấp cường độ nén khác nhau; (2) tính toán độ võng dài hạn có xét đến sự già hóa dựa trên mô hình Mô đun đàn hồi hiệu quả có điều chỉnh (AEMM). Các kết quả tính toán sẽ được so sánh với kết quả thực nghiệm, từ đó sẽ cho thấy rõ mức độ ảnh hưởng khi không xét và có xét tới sự già hóa của bê tông đến độ võng dài hạn của dầm.

Từ khoá: từ biến; co ngót; hệ số già; độ võng dài hạn; dầm BTCT.

LONG-TERM DEFLECTION OF REINFORCED CONCRETE BEAM MEMBERS CONSIDERING CONCRETE AGING

Abstract

The long-term working of reinforced concrete (RC) beam structures is directly related to the two long-term deformation components of concrete, namely creep and shrinkage deformation. Besides the long-term deformation characteristics, the aging of concrete is also a characteristic when concrete works for a long time on the structure. The aging of concrete is characterized by the aging factor. The content of the article presents the calculation of long-term deflection of RC beams when considering the effect of aging of concrete with two main contents: (1) building the relationship between creep coefficient and aging coefficient based on Bazant's proposal for concrete with different strength levels; (2) calculating the long-term deflection taking into account aging based on the adjusted effective elastic modulus (AEMM) model. The calculated results will be compared with experimental results, from there, it will clearly show the extent of influence when not including and including into account the aging of concrete on the long-term deflection of beams.

Keywords: creep; shrinkage; aging coefficient; long-term deflection; RC beam.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15\(3V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2021-15(3V)-09) © 2021 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

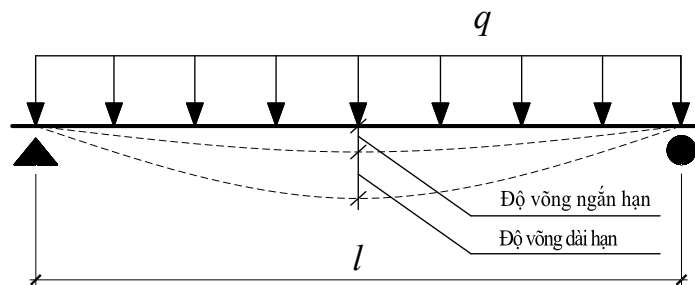
1. Đặt vấn đề

Kết cấu dầm bê tông cốt thép (BTCT) là loại kết cấu được sử dụng rộng rãi nhất hiện nay trên các công trình xây dựng. Đối với kết cấu này, sự làm việc của chúng phải thỏa mãn các điều kiện liên quan đến các trạng thái giới hạn về cường độ (trạng thái giới hạn thứ 1-TTGH 1) và trạng thái giới

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: hungnm1@nuce.edu.vn (Hùng, N. M.)

hạn về điều kiện sử dụng (trạng thái giới hạn thứ 2-TTGH 2). Việc tính toán theo TTGH 1 nhằm đảm bảo cho kết cấu không bị phá hoại, không bị mất ổn định dưới tác dụng của tải trọng. Tính toán theo TTGH 2 đảm bảo cho kết cấu BTCT làm việc bình thường kể từ khi kết cấu bắt đầu chịu tác dụng của tải trọng. Đối với kết cấu dầm BTCT, điều này được thực hiện thông qua việc tính toán nhằm đảm bảo không xuất hiện trên kết cấu những khe nứt hoặc những biến dạng (độ võng) vượt quá giá trị cho phép (thường lấy theo quy định trong các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành).

Trong việc tính toán theo TTGH 2 thì tính toán không chế độ võng được đề cập đến trong các tiêu chuẩn thiết kế. Độ võng của kết cấu BTCT chịu uốn bao gồm hai thành phần là độ võng ngắn hạn (độ võng tức thời) và độ võng dài hạn, Hình 1. Độ võng ngắn hạn được tính toán dựa trên tác dụng tức thời của tải trọng (ví dụ độ võng tại thời điểm dỡ cốt pha, cột chống hoặc độ võng do có sự gia tăng của tải trọng tác dụng). Độ võng dài hạn của kết cấu dầm BTCT xảy ra khi kết cấu chịu tác dụng của tải trọng duy trì theo thời gian và độ võng này cũng tăng dần theo thời gian tác dụng tải trọng. Nhiều tài liệu nghiên cứu [1–18] cho thấy thành phần dài hạn của độ võng có thể lớn gấp từ 2 - 3 lần độ võng tức thời. Độ võng dài hạn của kết cấu dầm BTCT là một quá trình phức tạp và gắn liền với các đặc tính biến dạng dài hạn của vật liệu bê tông như biến dạng co ngót, biến dạng từ biến, biến dạng nhiệt.



Hình 1. Các thành phần độ võng của dầm theo thời gian

Việc tính toán thiết kế kết cấu công trình BTCT theo TTGH 2 nói chung và đối với kết cấu dầm BTCT chịu uốn nói riêng đã được trình bày kỹ càng trong một số tiêu chuẩn thiết kế hiện nay như tiêu chuẩn Châu Âu Eurocode 2 (EC2) [1], tiêu chuẩn Hoa Kỳ ACI 318-14 [2], tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5574:2018 [3] ... Một đặc điểm chung của các công thức tính độ võng dài hạn trong các tiêu chuẩn là sử dụng rất nhiều các hệ số thực nghiệm liên quan đến cấp phối vật liệu chế tạo, điều kiện bảo dưỡng, thời gian tác dụng của tải trọng. ... Các thông số đặc trưng cho sự làm việc dài hạn của bê tông được kể đến trong tính toán gồm biến dạng từ biến, biến dạng co ngót của vật liệu này.

Do đặc điểm cấu trúc của vật liệu bê tông, khi bê tông làm việc dài hạn, chịu tác dụng của tải trọng và các yếu tố tác động khác, cấu trúc của bê tông có sự thay đổi nhất định. Đặc điểm này thường gắn với tên gọi “sự già hóa” của bê tông theo thời gian và một số nghiên cứu đã chứng minh, đặc trưng này của bê tông có ảnh hưởng đến ứng xử dài hạn của bản thân bê tông và của kết cấu BTCT. Carlswärd [4] và Westman [5] giải thích sự ảnh hưởng của sự già hóa là kết quả của quá trình hydrat hóa liên tục của gel xi măng khi bê tông được chất tải ở độ tuổi sớm. Ở độ tuổi sớm, gel xi măng có sẵn mang theo tất cả ứng suất, nhưng khi quá trình hydrat hóa tiếp tục, gel mới được hình thành làm giảm ứng suất cho gel xi măng ban đầu.

Tính toán sự làm việc dài hạn của kết cấu BTCT có kể đến hệ số già đã được một số tác giả đề cập đến, điển hình như các nghiên cứu [6–8]. Trong đó, sự già hóa của bê tông thường được kể đến thông qua hệ số già (ageing coefficient) ký hiệu là $\chi(t, t_0)$. Bazant [6, 7] đã kể đến ảnh hưởng của hệ số già qua việc đưa hệ số này vào trong công thức xác định mô đun đàn hồi của bê tông, còn được gọi

bằng phương pháp mô đun đàn hồi hiệu quả có điều chỉnh theo tuổi (Age-adjusted effective modulus method – AEMM). Theo đó, hệ số già được xác định trên cơ sở hệ số từ biến của bê tông và là một hàm số của thời gian.

Có thể thấy rằng sự già hóa của bê tông biểu diễn thông qua hệ số già đã được nhiều tác giả trên thế giới nghiên cứu. Gần đây để đơn giản hóa một số tác giả như Gilbert [9], Long [10]... đã lấy hệ số già cố định bằng 0,8 để tính toán. Tuy nhiên như đã phân tích ở trên, hệ số già là một tham số thay đổi theo thời gian và phụ thuộc vào hàm từ biến của bê tông. Nội dung tiếp theo của bài báo này trình bày các kết quả thiết lập mối quan hệ giữa hệ số từ biến và hệ số già của bê tông theo các cấp cường độ nén bê tông thay đổi, đồng thời tính toán độ võng dài hạn của dầm BTCT dựa theo chỉ dẫn trong tiêu chuẩn EC2 có xét đến hệ số già của bê tông. Các kết quả tính toán được so sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm tương ứng.

2. Xây dựng mối quan hệ giữa hệ số từ biến và hệ số già

Trong mục này sẽ thiết lập mối quan hệ giữa hệ số từ biến và hệ số già của bê tông, làm cơ sở cho việc tính toán độ võng dài hạn của cầu kiện dầm BTCT.

Theo Bazant [7], hệ số già của bê tông được tính theo biểu thức (1):

$$\chi(t, t_0) = \left[1 - \frac{E_R(t, t_0)}{E(t_0)} \right]^{-1} - \frac{1}{\varphi(t, t_0)} \quad (1)$$

trong đó $E_R(t, t_0)$ được gọi là hàm chùng (relaxation function), hay là ứng suất tại thời điểm t gây ra bởi một biến dạng đơn vị ở thời điểm t_0 .

Biến dạng từ biến của bê tông ở thời điểm t bất kỳ được xác định theo công thức (2) như sau:

$$\varepsilon(t) - \varepsilon^0(t) = \int_0^t J_c(t, t') d\sigma(t') \quad (2)$$

Ứng suất tương ứng ở thời điểm t được xác định theo công thức (3):

$$\sigma(t) = \int_0^t E_R(t, t') [d\varepsilon(t') - d\varepsilon^0(t')] \quad (3)$$

trong công thức (2) và (3): $\varepsilon^0(t)$ là biến dạng phi tải trọng (gồm biến dạng co ngót và biến dạng nhiệt); $J_c(t, t')$ là hàm từ biến, thể hiện biến dạng ở thời điểm t do ứng suất đơn vị tác dụng ở thời điểm t' gây ra; $E_R(t, t')$ là hàm chùng ứng suất, cho biết ứng suất ở thời điểm t gây ra bởi biến dạng đơn vị ở thời điểm t' .

Mối quan hệ giữa các hàm từ biến J_c và hàm chùng ứng suất E_R có thể được xác định bằng cách coi lịch sử biến dạng là một hàm đơn vị, đó là $\varepsilon = 1$ khi $t \geq t_0$ và $\varepsilon = 0$ khi $t < t_0$, trong trường hợp này $\sigma(t) = E_R(t, t_0)$. Khi đó, công thức (3) được viết như sau (coi $\varepsilon^0(t) = 0$):

$$J_c(t, t_0)E(t_0) + \int_{t_0+}^t J_c(t, t') \frac{\partial E_R(t', t_0)}{\partial t'} dt' = 1 \quad (4)$$

khi cho $t > t_0$ ta có:

$$\varphi(t, t') = E(t')J_c(t, t') - 1 \quad (5)$$

$$E''(t, t_0) = \frac{E(t_0) - E_R(t, t_0)}{\varphi(t, t_0)} \quad (6)$$

nếu thay thế

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} \quad (7)$$

ta có:

$$\sigma(t) = \sigma(t_0) + [E(t_0) - E_R(t, t_0)] [\varepsilon_1 - \varepsilon_0] \quad (8)$$

$$\varepsilon_0 + \varepsilon_1 [E(t_0)J_C(t, t_0) - 1] = J_C(t, t_0)\sigma(t_0) - (\varepsilon_1 - \varepsilon_0) \int_{t_0+}^t J_C(t, t') \frac{\partial E_R(t, t_0)}{\partial t'} dt' \quad (9)$$

$$\varepsilon_0 - \varepsilon_1 = E(t_0)J_C(t, t_0)(\varepsilon_0 - \varepsilon_1) + (\varepsilon_0 - \varepsilon_1) \int_{t_0+}^t J_C(t, t') \frac{\partial E_R(t, t_0)}{\partial t'} dt' \quad (10)$$

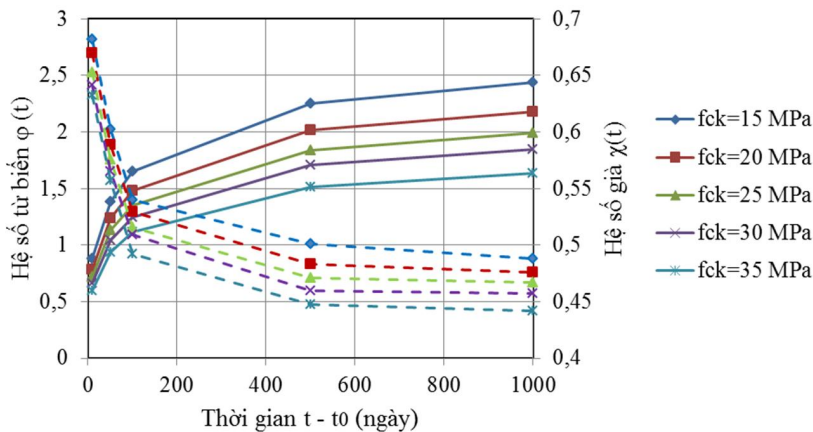
Trong các công thức trên, $E_R(t, t_0)$ được xác định theo công thức (4). Có thể thấy đây là tích phân Volterra và có thể giải bằng cách chia nhỏ thời gian từ t_1 đến t_n thành các bước thời gian Δt_r [7]. Sử dụng phần mềm giải toán chuyên dụng Matlab để thiết lập chương trình tính cho phép xác định được giá trị $E_R(t, t_0)$. Mỗi một $E_R(t, t_0)$ tìm được chỉ tương ứng với một hàm từ biến $J_C(t, t_0)$, hay nói cách khác là tương ứng với một cấp cường độ nén của bê tông.

Để tiến hành thiết lập mối quan hệ này, trong nội dung nghiên cứu của bài báo sử dụng các tính toán hệ số từ biến của bê tông theo chỉ dẫn trong tiêu chuẩn EC2 [1] tương ứng với các cấp cường độ nén bê tông là $f_{ck} = 15 \div 35$ MPa, độ ẩm môi trường $RH = 60\%$, theo công thức sau:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad (11)$$

trong đó $\beta_c(t, t_0)$ là hệ số kể đến sự phát triển từ biến theo thời gian; φ_0 là hệ số từ biến danh nghĩa.

Các thông số tính toán trên được trình bày chi tiết trong tiêu chuẩn EC 2 [1]. Sau khi xác định được $E_R(t, t_0)$, thay vào biểu thức (1) để xác định hệ số già $\chi(t, t_0)$. Trên Hình 2 thể hiện các kết quả tính toán thu được [16, 17].



Hình 2. Biểu đồ quan hệ giữa hệ số từ biến và hệ số già của bê tông theo các cấp cường độ nén của bê tông thay đổi

Kết quả thể hiện trên Hình 2 cho thấy hệ số già của bê tông tỷ lệ nghịch với hệ số từ biến, nghĩa là hệ số từ biến tăng dần theo thời gian còn hệ số già giảm dần theo thời gian. Hệ số từ biến và hệ số già giảm dần khi cường độ nén của bê tông tăng dần. Hệ số già tính trong khoảng thời gian 1000 ngày, với bê tông có cường độ nén đặc trưng từ 15 MPa đến 35 MPa có giá trị nằm trong khoảng từ 0,4 đến 0,7. Kết quả tính toán này cũng phù hợp với khoảng tính toán mà Bazant [6, 7] và Trost [8] đã công bố là từ 0,4 đến 1,0.

3. Tính toán độ võng dài hạn của dầm BTCT khi xét đến sự già hóa của bê tông

Độ võng dài hạn của cầu kiện dầm BTCT đã được trình bày kỹ trong các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu BTCT nói chung và tiêu chuẩn EC2 nói riêng. Nội dung nghiên cứu tiếp theo sẽ áp dụng các chỉ dẫn tính toán độ võng dài hạn của dầm theo tiêu chuẩn EC2 có kể đến sự già hóa của bê tông thông qua hệ số già. Sơ đồ làm việc của dầm dạng đơn giản hai đầu liên kết khớp, chịu tải trọng phân bố đều, theo Hình 1.

Theo EC2 [1], độ võng ở giữa dầm theo thời gian do ảnh hưởng của từ biến và co ngót của bê tông được tính theo công thức sau:

$$f = \frac{5}{48} l^2 \left(\frac{1}{r_{cc}} + \frac{1}{r_{cs}} \right) \quad (12)$$

$$\frac{1}{r_{cc}} = \zeta \left(\frac{1}{r_{cc}} \right)_{II} + (1 - \zeta) \left(\frac{1}{r_{cc}} \right)_I \quad (13)$$

$$\frac{1}{r_{cs}} = \zeta \left(\frac{1}{r_{cs}} \right)_{II} + (1 - \zeta) \left(\frac{1}{r_{cs}} \right)_I \quad (14)$$

trong đó $\frac{1}{r_{cc}}$ là độ cong của dầm do ảnh hưởng của biến dạng từ biến của bê tông; $\left(\frac{1}{r_{cc}} \right)_I, \left(\frac{1}{r_{cc}} \right)_{II}$ tương ứng là độ cong tính toán do từ biến cho vùng không nứt và nứt hoàn toàn; $\frac{1}{r_{cs}}$ là độ cong do biến dạng co ngót cứng của bê tông gây ra và được tính tương tự như hiện tượng từ biến; $\left(\frac{1}{r_{cs}} \right)_I, \left(\frac{1}{r_{cs}} \right)_{II}$ tương ứng là độ cong tính toán do co ngót cho điều kiện không nứt và nứt.

Để tính toán được độ cong của dầm do ảnh hưởng của hiện tượng từ biến và co ngót bê tông, tiêu chuẩn EC2 sử dụng mô đun đàn hồi của bê tông là mô đun đàn hồi hiệu quả, theo phương pháp mô đun đàn hồi hiệu quả (Effective modulus method - EMM).

$$E_{c,eff} = \frac{E_c(t_0)}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (15)$$

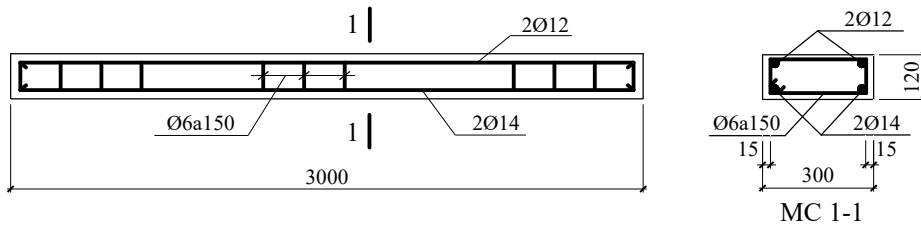
Để kể đến sự già hóa của bê tông, mô đun đàn hồi hiệu quả ở công thức (15) được thay bằng mô đun đàn hồi hiệu quả điều chỉnh theo tuổi dựa trên phương pháp AEMM (Ageadjusted effective modulus method) [6, 7] như sau:

$$E_{c,eff} = \frac{E_c(t_0)}{1 + \chi(t, t_0)\varphi(t, t_0)} \quad (16)$$

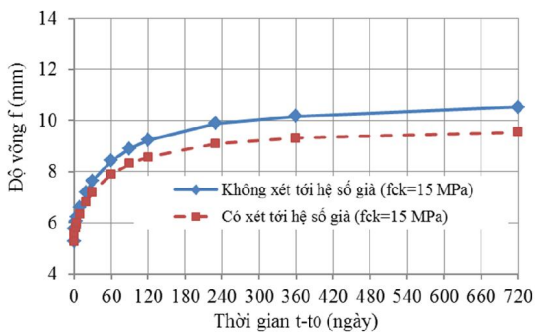
Như vậy quy trình tính toán độ võng dài hạn của dầm khi xét đến sự già hóa của bê tông hoàn toàn tương tự như chỉ dẫn trong tiêu chuẩn EC2, chỉ thay thế mô đun đàn hồi hiệu quả của bê tông thành

mô đun đàn hồi hiệu quả điều chỉnh theo tuổi bằng cách kể thêm hệ số già $\chi(t, t_0)$ vào biểu thức tính toán mô đun đàn hồi.

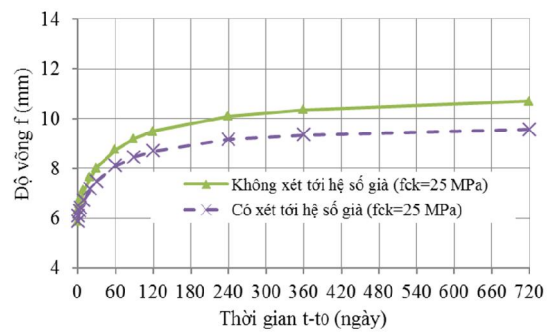
Nghiên cứu tiếp theo sẽ tiến hành tính toán độ võng dài hạn của dầm BTCT trong hai trường hợp không xét tới sự già hóa bê tông (tính hoàn toàn theo EC2) và trường hợp có xét tới sự già hóa bê tông thông qua hệ số già. Các thông số tính toán dầm như sau: Tiết diện $b \times h = 300 \times 120$ mm, nhịp tính toán $l = 2900$ mm, bê tông có cường độ nén thay đổi $f_{ck} = 15 \div 35$ MPa, cốt thép vùng kéo $2\text{Ø}14$ ($A_s = 307,7 \text{ mm}^2$), cốt thép vùng nén $2\text{Ø}12$ ($A'_s = 226,08 \text{ mm}^2$), cốt thép đai $\text{Ø}6\text{a}150$, mô đun đàn hồi cốt thép $E_s = 200000$ MPa, Tải trọng phân bố đều tác dụng lên dầm $q = 30\% q_{\max}$, độ ẩm môi trường $RH = 60\%$.



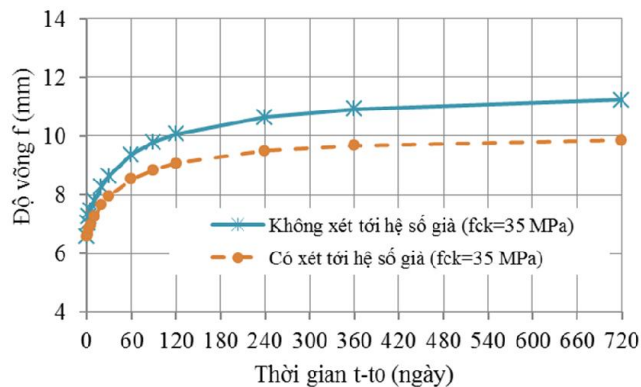
Hình 3. Cấu tạo dầm tính toán



Hình 4. Biểu đồ quan hệ độ võng theo thời gian (khi $f_{ck} = 15$ MPa)



Hình 5. Biểu đồ quan hệ độ võng theo thời gian (khi $f_{ck} = 25$ MPa)



Hình 6. Biểu đồ quan hệ độ võng theo thời gian (khi $f_{ck} = 35$ MPa)

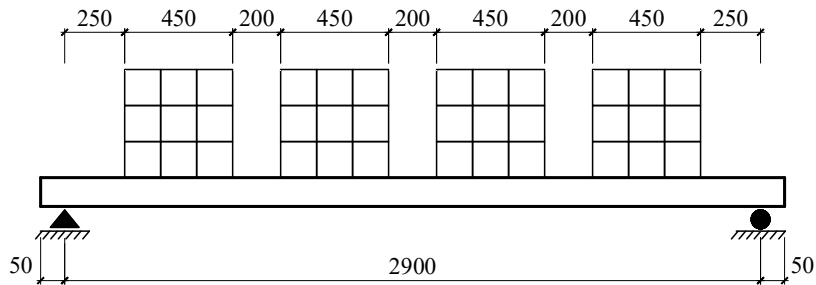
Kết quả tính toán độ võng dài hạn của dầm trong trường hợp không xét tới hệ số già, tính toán hoàn toàn theo tiêu chuẩn EC2 (gọi là không xét tới hệ số già) và trường hợp có xét đến hệ số già, lấy theo kết quả tính toán trong biểu đồ Hình 2 (gọi là có xét tới hệ số già) được trình bày trên các biểu đồ như Hình 4–6.

Kết quả tính toán cho thấy độ võng dài hạn của dầm tính toán theo tiêu chuẩn EC2 ở thời điểm 720 ngày (tương đương với 2 năm) có giá trị lớn gấp 1,71 đến 1,99 lần độ võng ban đầu. Khi kể đến sự già hóa của bê tông thông qua hệ số già, kết quả tính toán ở thời điểm tương tự cho thấy độ võng dài hạn có giá trị lớn gấp 1,54 đến 1,81 lần độ võng ban đầu.

Có thể thấy rằng khi kể đến sự già hóa của bê tông theo tuổi thì độ võng dài hạn của dầm giảm xuống. Mức độ chênh lệch cũng thay đổi tùy thuộc vào cường độ nén của bê tông hay là mức độ từ biến của bê tông. Cường độ nén của bê tông càng cao thì độ chênh lệch càng nhiều, cụ thể với cường độ nén của bê tông $f_{ck} = 15; 25; 35$ MPa thì độ chênh lệch tương ứng là 9,1%; 10,6% và 12,1%.

4. Kiểm chứng kết quả tính toán với kết quả thực nghiệm

Để đánh giá được ảnh hưởng của tính toán độ võng dài hạn của dầm BTCT khi xét đến hệ số già, trong nội dung tiếp theo sẽ so sánh kết quả tính toán với kết quả thực nghiệm độ võng dài hạn của dầm BTCT có kích thước tiết diện giống với kích thước dầm nêu trong mục 3. Các kết quả thực nghiệm này được thực hiện bởi Hiếu và cs. [13, 14]. Cường độ nén bê tông sử dụng trong thực nghiệm là $f_{ck} = 15$ MPa, tải trọng phân bố đều tác dụng lên dầm $q = 30\% q_{\max} = 2,06$ N/mm (sơ đồ Hình 1), được thực hiện bằng cách xếp các viên mẫu bê tông lập phương $150 \times 150 \times 150$ mm (trọng lượng mỗi viên bê tông bằng 83 N), chất thành 4 chồng, mỗi chồng 18 viên mẫu. Sơ đồ thí nghiệm như Hình 7.



Hình 7. Sơ đồ chất tải lên dầm

Để khảo sát độ võng của cấu kiện dầm, nghiên cứu đã bố trí 3 đồng hồ indicator (loại 0,01 mm) đo chuyển vị của dầm tại 3 vị trí ký hiệu I1, I2, I3. Trong đó I1 và I3 đo tại hai gối tựa, I2 đo tại tiết diện giữa nhịp dầm, sơ đồ đo theo Hình 9.

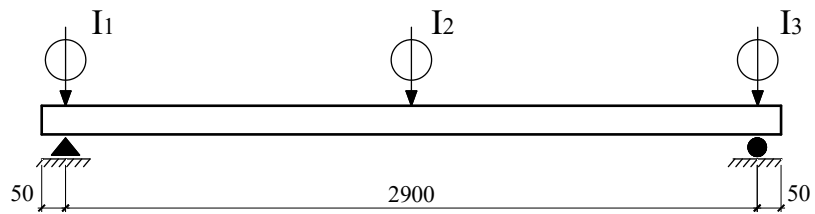
Kết quả khảo sát độ võng của dầm trong thời gian 230 ngày được thể hiện trên biểu đồ Hình 10.

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm này được so sánh với kết quả tính toán lý thuyết đã trình bày trong mục 3. Kết quả khảo sát được trình bày trên biểu đồ Hình 11.

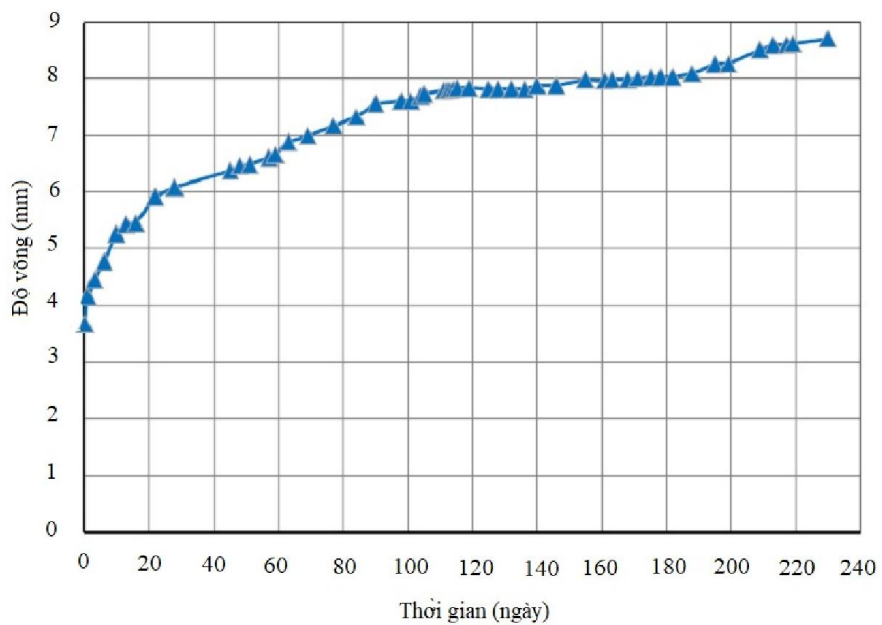
Kết quả khảo sát cho thấy, khi xét đến sự già hóa của bê tông trong tính toán lý thuyết cho kết quả gần hơn với thực nghiệm. Điều này phản ánh đúng hơn sự làm việc của kết cấu dầm theo thời gian. Tuy nhiên có thể nhận thấy rằng để thiên về an toàn cho sự làm việc của kết cấu, các chỉ dẫn tính toán trong các tiêu chuẩn thường bỏ qua hệ số già.



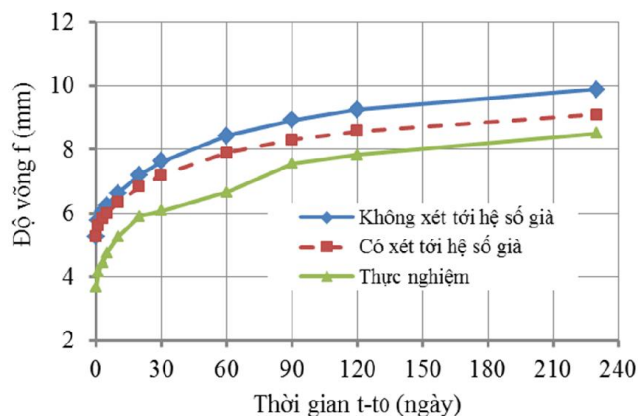
Hình 8. Hình ảnh thí nghiệm chất tải lên dầm



Hình 9. Sơ đồ bố trí dụng cụ đo chuyển vị



Hình 10. Biểu đồ quan hệ độ võng của dầm theo thời gian



Hình 11. So sánh kết quả độ võng của dầm theo tính toán lý thuyết và thực nghiệm

5. Kết luận

Nội dung bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về độ võng dài hạn của cầu kiện dầm BTCT trong hai trường hợp tính toán hoàn toàn theo tiêu chuẩn Eurocode 2 (EC2) và tính toán theo EC2 có bổ sung thêm hệ số già của bê tông. Đây là trường hợp kể đến sự già hóa của bê tông theo tuổi, một chỉ tiêu cơ lý của bê tông hình thành cùng với hiện tượng từ biến bê tông theo thời gian. Các kết quả tính toán lý thuyết được so sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm tương tự. Từ các kết quả thu được, có thể rút ra những kết luận chính sau:

- Đã thiết lập được mối quan hệ giữa hệ số từ biến và hệ số già của bê tông theo các cấp cường độ nén bê tông thay đổi. Hệ số già của bê tông là một tham số thay đổi theo thời gian và phụ thuộc vào từng hàm từ biến.

- Tính toán độ võng dài hạn của dầm khi có kể đến sự già hóa của bê tông theo thời gian thông qua hệ số già $\chi(t, t_0)$ làm chính xác hóa hơn sự làm việc của cầu kiện dầm do có thêm yếu tố ảnh hưởng được kể đến. Tuy nhiên nó làm giảm kết quả tính toán độ võng của dầm trong trường hợp tính toán thông thường chỉ kể đến từ biến bê tông. Do đó các tiêu chuẩn tính toán thiết kế hiện nay thường bỏ qua để thiên về an toàn trong quá trình tính toán thiết kế.

- Độ võng dài hạn ở 720 ngày tính toán theo lý thuyết có giá trị 11,22 mm. So với độ võng tức thời thì độ võng dài hạn gấp 1,99 lần và gần đạt tới giá trị độ võng cho phép đối với cầu kiện dầm theo TCVN 5574:2018 là 11,6 mm. Điều này chứng tỏ rằng ảnh hưởng của sự làm việc dài hạn của kết cấu cần phải hết sức lưu ý trong quá trình tính toán thiết kế.

Tài liệu tham khảo

- [1] BS EN 1992-1-1 (2004). *Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1-1: General - common rules for buildings and civil engineering structures*. London: British Standards Institution (BSI).
- [2] ACI 318-14 (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute.
- [3] TCVN 5574:2018. *Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*.
- [4] Carlswärd, J. (2006). *Shrinkage cracking of steel fibre reinforced self-compacting concrete overlays; Test methods and theoretical modelling*. Unpublished Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- [5] Westman, G. (1999). *Concrete Creep and Thermal Stresses - New Creep Models and Their Effects on Stress Development*. Doctoral Thesis 1999:10, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Luleå university of Technology, Luleå, Sweden.

- [6] Bažant, Z. P. (1972). Numerical determination of long-range stress history from strain history in concrete. *Matériaux et Constructions*, 5(3):135–141.
- [7] Bažant, Z. P. (1972). Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method. *ACI Journal*, 69(4):212–217.
- [8] Trost, H. (1967). Implications of the Superposition Principle in Creep and Relaxation Problems for Concrete and Prestressed Concrete. *Beton-und Stahlbetonbau*, (10):230–238. (in German).
- [9] Gilbert, R. I., Ranzi, G. (2010). *Time-Dependent Behaviour of Concrete Structures*. CRC Press.
- [10] Long, T. N. (2016). *Nghiên cứu thực nghiệm về biến dạng dài hạn cột bê tông cốt thép chịu nén đúng tâm*. Luận án tiến sĩ.
- [11] CEB-FIP (2010). *New Model Code*. Final draft, Lausanne Switzerland, Ed Joost Walraven, Convener, fib Special Activity Group 5.
- [12] Ghali, A., Favre, R., Eldbadry, M. (2002). *Concrete Structures: Stresses and Deformations*. E&FN Spon.
- [13] Hiếu, N. T., Bình, N. N. (2014). *Nghiên cứu thực nghiệm độ võng dài hạn của dầm bê tông cốt thép*. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường Đại học Xây dựng, mã số 75-2014/KH XD.
- [14] Bình, N. N., Hiếu, N. T. (2015). Nghiên cứu thực nghiệm độ võng dài hạn của dầm bê tông cốt thép. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, (23/3).
- [15] Hùng, N. M., Phong, N. T., Hiếu, N. T. (2019). Xây dựng mô hình thí nghiệm xác định chùng ứng suất của bê tông trong kết cấu dầm bê tông cốt thép. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 13(4V):1–11.
- [16] Hùng, N. M., Linh, N. N. (2019). Một phương pháp biểu diễn chùng ứng suất trong bê tông thông qua hệ số từ biến và hệ số già hóa trong bê tông. *Tạp chí Xây dựng Việt Nam*, 58(5-2019).
- [17] Hùng, N. M. (2021). *Nghiên cứu thực nghiệm sự làm việc dài hạn của dầm bê tông cốt thép chịu chuyển vị cưỡng bức gối tựa*. Luận án Tiến sĩ.
- [18] Minh, P. Q., và cs. (2013). *Kết cấu Bê tông cốt thép. Phần cấu kiện cơ bản*. Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật.