



NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ĐỘ VỒNG DÀI HẠN CỦA DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP

Nguyễn Ngọc Bình¹, Nguyễn Trung Hiếu¹

Tóm tắt: Bài báo trình bày kết quả thực nghiệm độ võng dài hạn dầm Bê tông cốt thép (BTCT). 03 dầm được chế tạo giống nhau và được gia tải không đổi với 3 cấp tải khác nhau. Kết quả thí nghiệm được so sánh với tiêu chuẩn TCVN 5574:2012, ACI 318:2008. Kết quả thí nghiệm thu được đã cho thấy rõ ảnh hưởng của biến dạng co ngót, từ biến của bê tông, được thể hiện qua độ lớn của tải trọng dài hạn đến độ võng dài hạn của kết cấu.

Từ khóa: Độ võng dài hạn; dầm bê tông; co ngót; từ biến.

Summary: This paper presents experimental results on long-term deflections of reinforced concrete beams. Three beams are casted the same and under constant load over time with three different load levels. The experimental results were compared with the TCVN 5574:2012, ACI 318:2008, ACI 209.2R standards. The obtained results clearly showed the behavior of reinforced concrete beam under - long term loading and the influence of the magnitude of long-term loading to long - term deflection of structures.

Keywords: Long-term deflection; reinforced concrete beam; shrinkage; creep.

Nhận ngày 02/3/2015, chỉnh sửa ngày 20/3/2015, chấp nhận đăng 31/3/2015



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-TTGH1) và trạng thái giới hạn về điều kiện sử dụng (trạng thái giới hạn thứ 2-TTGH2). Việc tính toán theo TTGH1 nhằm đảm bảo cho kết cấu không bị phá hoại, không bị mất ổn định dưới tác dụng của tải trọng. Tính toán theo trạng thái giới hạn 2 đảm bảo cho kết cấu làm việc bình thường trên kết cấu công trình kể từ khi kết cấu dầm BTCT bắt đầu chịu tác dụng của tải trọng. Điều này được thực hiện thông qua việc tính toán nhằm đảm bảo không xuất hiện trên kết cấu dầm những khe nứt hoặc những biến dạng (độ võng) vượt quá giá trị cho phép:

$$w \leq [w]; f \leq [f] \quad (1)$$

trong đó w , f lần lượt là bề rộng khe nứt và biến dạng võng của dầm BTCT do tác dụng của tải trọng gây ra; $[w]$, $[f]$ là các giới hạn cho phép của bề rộng khe nứt và của biến dạng võng để đảm bảo điều kiện làm việc bình thường của kết cấu. Các giá trị này được cho trong các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu BTCT.

Trong việc tính toán theo trạng thái giới hạn 2 thì tính toán khống chế độ võng thường được các tiêu chuẩn thiết kế đề cập nhiều. Độ võng của kết cấu chịu uốn bao gồm hai thành phần là độ võng ngắn hạn (độ võng tức thời) và độ võng dài hạn. Độ võng ngắn hạn được tính toán dựa trên tác dụng tức thời của tải trọng (ví dụ độ võng tại thời điểm đỡ 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 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.

¹NCS, Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp. Trường Đại học Xây dựng.

¹TS, Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp. Trường Đại học Xây dựng. E-mail: ngtrunghieugd@gmail.com

Việc tính toán thiết kế kết cấu công trình BTCT theo trạng thái giới hạn thứ 2 nói chung và đối với kết cấu dầm BTCT chịu uốn nói riêng đã được trình bày trong một số tiêu chuẩn thiết kế hiện nay như tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5574:2012 [3], tiêu chuẩn Hoa Kỳ ACI 318:2008 [4], ACI 209.2R [7]... 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... Ở nước ta hiện nay, việc tính toán thiết kế kết cấu dầm BTCT theo trạng thái thứ 2 vẫn là một vấn đề chưa được nghiên cứu triệt để phù hợp với các điều kiện nước ta. Mặt khác, việc kiểm tra tính phù hợp khi áp dụng các tiêu chuẩn tính toán của các nước khác, hoặc khả năng sử dụng các hệ số thực nghiệm cho trong các tiêu chuẩn khác áp dụng cho tính toán trong điều kiện Việt Nam còn chưa được kiểm chứng đầy đủ. Do vậy, việc có những nghiên cứu chuyên sâu về vấn đề này để làm cơ sở cho việc tính toán kết cấu dầm BTCT ở trạng thái giới hạn 2 là rất cần thiết.

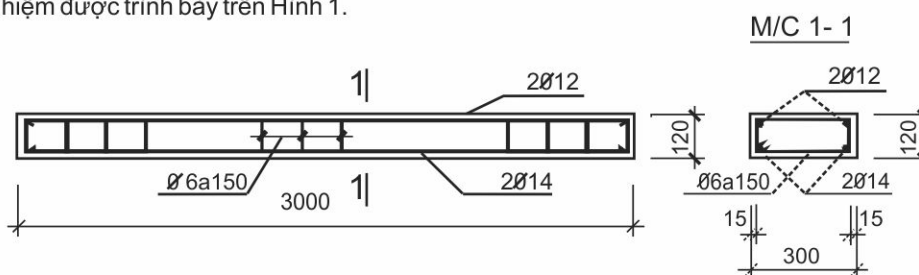
Nghiên cứu thực nghiệm độ võng dài hạn của dầm BTCT là mục tiêu của đề tài. Bên cạnh đó, việc tính toán dự báo độ võng của dầm BTCT theo một số tiêu chuẩn hiện hành được sử dụng phổ biến ở nước ta hiện nay như TCVN 5574:2012, tiêu chuẩn ACI 318:2008, ACI 209.2R cũng được tiến hành. Những kết quả về độ võng dài hạn thu được từ nghiên cứu thực nghiệm cũng như qua các mô hình tính cho phép hiểu rõ hơn sự làm việc của kết cấu cũng như là cơ sở cho việc tính toán thực hành độ võng dài hạn của dầm BTCT.



2. Nghiên cứu thực nghiệm độ võng dài hạn

2.1 Cấu tạo dầm thí nghiệm và vật liệu chế tạo

Mô hình thí nghiệm độ võng dài hạn là dầm đơn giản chịu tác dụng của tải trọng phân đều. 03 mẫu dầm thí nghiệm được chế tạo có kích thước tiết diện ngang $b \times h = 300 \times 120$ mm, chiều dài dầm 3000 mm. Thép dọc chịu lực đặt trong vùng kéo $2\phi 14$, trong vùng nén $2\phi 12$ (nhóm CII, $R_s = R_{sc} = 280$ MPa), cốt đai $\phi 6$ khoảng cách đai $a = 150$ mm. Vật liệu bê tông chế tạo dầm có cấp độ bền B20 ($R_b = 15$ MPa). Cấu tạo chi tiết dầm thí nghiệm được trình bày trên Hình 1.



Hình 1. Cấu tạo dầm thí nghiệm

Trên Bảng 1 trình bày cấp phối vật liệu bê tông chế tạo dầm và đặc trưng cơ học của vật liệu bê tông. Các thí nghiệm xác định các đặc trưng cơ học của vật liệu bê tông như cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi được tiến hành theo tiêu chuẩn TCVN 3118:1993 [1] và tiêu chuẩn TCVN 5726: 1993 [2].

Bảng 1. Cấp phối vật liệu chế tạo và đặc trưng cơ học của bê tông

1. Thành phần cấp phối vật liệu	Giá trị
Cát vàng $D_{max} = 0,5$ (kg/m^3)	650
Đá 1x2 (kg/m^3)	1250
Xi măng PCB30 Bút Sơn (kg/m^3)	410
Nước (kg/m^3)	192
Tỷ lệ N/X (kg/m^3)	0,47
2. Cường độ chịu nén ở 28 ngày (MPa)	26,3
3. Mô đun đàn hồi ở 28 ngày (MPa)	27500

Với cấu tạo vật liệu và kích thước hình học của dầm thí nghiệm như trên có thể sơ bộ xác định khả năng chịu tải trọng tác dụng của dầm theo chỉ dẫn trong TCVN 5574: 2012 [3]:

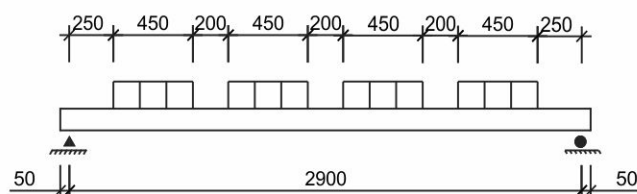
$$\text{Hệ số } \xi = \frac{R_s A_s - R_{sc} A'_s}{R_b b h_0} = \frac{280.308 - 280.226}{15.300.105} = 0,0485$$

Do $\xi < \frac{2a'}{h_0} = \frac{2.15}{105} = 0,285$ nên khả năng chịu lực của dầm được xác định theo công thức sau:

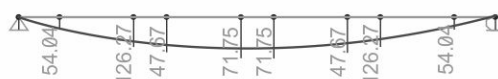
$$M_{gh} = R_s A_s (h_0 - a') = 280.308(105 - 15) = 7,76.10^6 (N.mm)$$

2.2 Sơ đồ thí nghiệm và tải trọng thí nghiệm

Sơ đồ thí nghiệm là dầm đơn giản có nhịp $l = 2900\text{mm}$ chịu tác dụng của tải trọng tác dụng dài hạn được tạo ra bởi trọng lượng bản thân của dầm và tải trọng thí nghiệm bổ sung. Để tạo ra tải trọng thí nghiệm tác dụng dài hạn có giá trị không đổi, sử dụng các viên bê tông hình lập phương kích thước $150 \times 150 \times 150\text{mm}$ để làm phương tiện gia tải (trọng lượng mỗi viên bằng 83N). Đây là phương tiện gia tải đơn giản và sẵn có ở phòng thí nghiệm. Với mục đích làm rõ ảnh hưởng của độ lớn của tải trọng dài hạn đến độ võng dài hạn của kết cấu, tải trọng tác dụng lên các dầm D1, D2 và D3 có giá trị khác nhau. Trên Hình 2.a, 3.a và 4.a trình bày sơ đồ chất tải lên các dầm thí nghiệm. Các viên bê tông được xếp thành 04 chồng tải, mỗi chồng tải có kích thước $450 \times 300\text{mm}$ (tương ứng với 03 viên bê tông theo phương dọc dầm và 02 viên bê tông theo phương ngang). Kích thước của mỗi chồng tải thỏa mãn quy định trong TCVN 9344:2012 [4], trong đó chiều rộng chồng tải không vượt quá $1/6$ chiều dài nhịp. Khoảng cách giữa các chồng tải là 200mm . Số viên bê tông trong mỗi chồng tải lần lượt là 6, 12 và 24 viên tương ứng với dầm D1, D2 và D3. Khoảng cách giữa các chồng tải là 200mm . Trên Hình 2.b, 3.b và 4.b giới thiệu biểu đồ mô men uốn do trọng lượng bản thân của các dầm và tải trọng thí nghiệm gây ra.

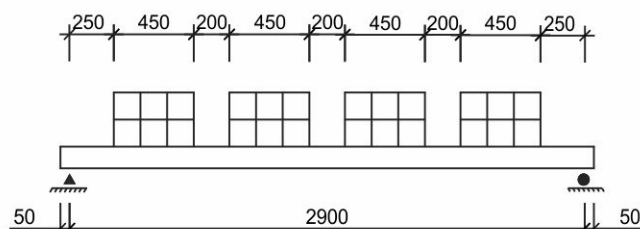


a - Sơ đồ chất tải

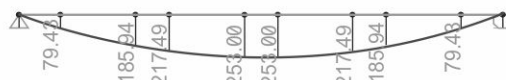


b - Biểu đồ mô men uốn (daN.m)

Hình 2. Sơ đồ chất tải và biểu đồ mô men uốn của dầm D1

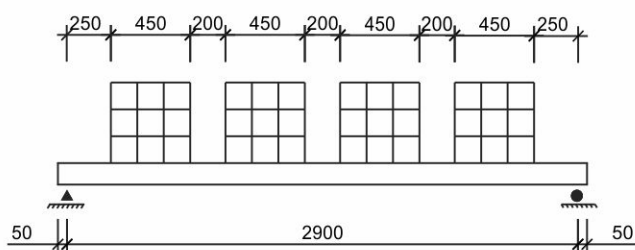


a - Sơ đồ chất tải

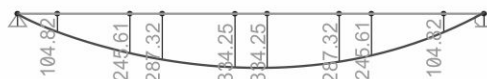


b - Biểu đồ mô men uốn (daN.m)

Hình 3. Sơ đồ chất tải và biểu đồ mô men uốn của dầm D2



a - Sơ đồ chất tải



b - Biểu đồ mô men uốn (daN.m)

Hình 4. Sơ đồ chất tải và biểu đồ mô men uốn của dầm D3

Bảng 2 trình bày tổng hợp giá trị mô men uốn lớn nhất $M_{\max}$ trên các mẫu dầm thí nghiệm do trọng lượng bản thân của các dầm và tải trọng thí nghiệm gây ra và tỷ lệ phần trăm giữa $M_{\max}$ và M_{gh} .

Bảng 2. Mô men uốn M_{max} trên các mẫu đầm thí nghiệm

Dầm	Mô men uốn cực đại M_{max} (daN.m)	% M_{max} / M_{gh}
D1	171,75	22,1 %
D2	253,00	32,6 %
D3	334,25	43,0 %

Tất cả các đầm được tiến hành gia tải ở tuổi 28 ngày sau khi đổ bê tông đầm. Việc chất tải được tiến hành từ từ để tránh gây ra xung lực tác dụng lên đầm. Trên Hình 5 minh họa hình ảnh chất tải lên đầm thí nghiệm D3.



a) Quá trình chất tải lên đầm



b) Chất đủ tải lên đầm thí nghiệm D3

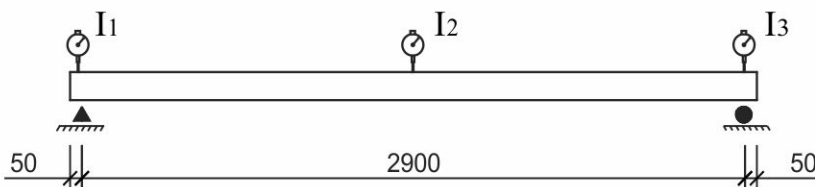
Hình 5. Hình ảnh chất tải lên đầm D3

2.3 Bố trí dụng cụ đo

Để xác định độ võng của các đầm thí nghiệm, sử dụng các dụng cụ đo chuyển vị là các Indicator cơ học (có độ khuếch đại $K=100$). 03 Indicator ký hiệu I_1 , I_2 , I_3 được bố trí ở hai gối tựa đầm và ở vị trí giữa đầm như trên Hình 6. Trong trường hợp này, độ võng f ở vị trí giữa đầm được xác định theo công thức sau:

$$f = f_2 - 0,5(f_1 + f_3) \quad (2)$$

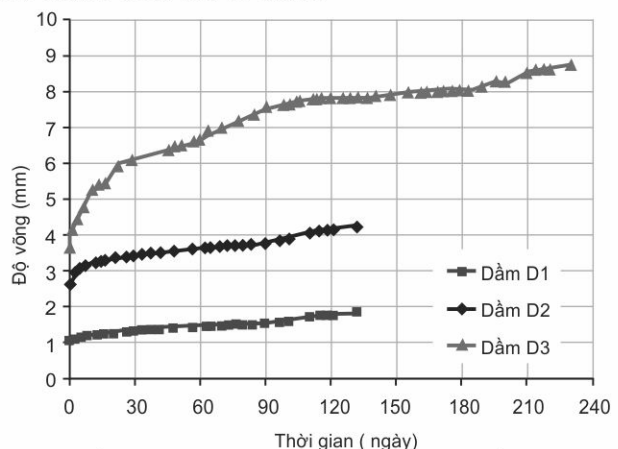
với f_1 , f_2 , f_3 là giá trị chuyển vị xác định từ số đọc trên các Indicator tương ứng.

**Hình 6.** Bố trí dụng cụ đo chuyển vị của đầm thí nghiệm

3. Phân tích và đánh giá kết quả

3.1 Độ võng dài hạn của các đầm thí nghiệm

Trên Hình 7 trình bày biểu đồ quan hệ độ võng theo thời gian của các đầm thí nghiệm D1, D2, D3. Giá trị độ võng tức thời ban đầu được xác định trên cơ sở tổng độ võng do tải trọng thí nghiệm (xác định bằng thực nghiệm) và độ võng do trọng lượng bản thân xác định bằng tính toán lý thuyết theo chỉ dẫn trong [3].

**Hình 7.** Kết quả đo độ võng theo thời gian của các đầm thí nghiệm

Trong Bảng 3 dưới đây trình bày kết quả xác định các thành phần độ võng của các dầm thí nghiệm sau 130 ngày tác dụng tải trọng. Độ võng tức thời của các dầm tăng tỷ lệ thuận với mức tăng của tải trọng thí nghiệm. Tác dụng dài hạn của tải trọng thí nghiệm được thể hiện qua thành phần dài hạn của độ võng. Thành phần độ võng này tăng theo thời gian và tỷ lệ thuận với độ lớn của tải trọng tác dụng. Ảnh hưởng của độ lớn của tải trọng đến độ võng dài hạn của các dầm được thể hiện qua hai thông số là tỷ lệ giữa độ võng dài hạn và độ võng ngắn hạn, tỷ lệ phần trăm giữa độ võng dài hạn và độ võng tổng. Về tỷ lệ giữa độ võng ngắn hạn và độ võng dài hạn, kết quả thu được cho các giá trị 0,74, 1,08 và 1,13 tương ứng với các dầm D1, D2 và D3. Tỷ lệ phần trăm giữa độ võng dài hạn và độ võng tổng của các dầm thí nghiệm được trình bày trên Bảng 3. Kết quả này được giải thích bởi biến dạng từ biến của bê tông, nguyên nhân chính gây ra độ võng dài hạn, phụ thuộc vào ứng suất trong bê tông do tác dụng của tải trọng gây ra. Việc tăng tải trọng dẫn đến tăng ứng suất trong bê tông là nguyên nhân làm tăng biến dạng từ biến của bê tông.

Bảng 3. Độ võng tức thời và độ võng dài hạn của các dầm thí nghiệm

Dầm	Độ võng tức thời		Độ võng dài hạn f_l		Độ võng tổng (mm)
	Giá trị (mm)	% so với độ võng tổng	Giá trị (mm)	% so với độ võng tổng	
D1	1,07	57,5	0,79	42,5	1,86
D2	1,69	48	1,83	52,0	3,52
D3	3,68	47	4,14	53,0	7,82

3.2 So sánh độ võng dài hạn theo thực nghiệm và theo tính toán theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2012 và tiêu chuẩn ACI

* Tính toán độ võng dài hạn theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2012

Tính toán dự báo độ võng dài hạn theo TCVN 5574:2012 [3] mới kể đến ảnh hưởng của biến dạng từ biến của bê tông, ảnh hưởng của biến dạng co ngót của bê tông chưa được kể đến trong tính toán. Độ võng dài hạn của dầm BTCT được tính toán theo các phương pháp của cơ học kết cấu, trong đó sử dụng độ cứng có xét đến biến dạng dẻo của bê tông, sự có mặt của cốt thép trong tiết diện và sự xuất hiện của khe nứt trong vùng kéo của tiết diện dầm ở một đoạn nào đó trên trục dọc của cầu kiện để thay cho độ cứng đàn hồi. Đối với những đoạn của cầu kiện mà trên đó không xuất hiện khe nứt trong vùng kéo, độ võng được tính toán như đối với vật thể đàn hồi. Công thức tính toán độ võng dài hạn của dầm được biểu diễn bằng công thức sau:

$$f'_{tb,\infty} = \left(\frac{1}{r} \right)_1 \frac{l_1^2}{2} + \left(\frac{1}{r} \right)_2 \left(\frac{l^2}{8} - \frac{l_1^2}{2} \right) \quad (3)$$

trong đó: l là nhịp dầm, l_1 là chiều dài đoạn dầm chưa bị nứt do tác dụng của tải trọng; $(1/r)_1$ và $(1/r)_2$ lần lượt là độ cong của đoạn dầm không có khe nứt trong vùng kéo và đoạn dầm có khe nứt trong vùng kéo.

Theo TCVN 5574: 2012, mô men uốn gây nứt dầm M_{cr} được tính theo công thức sau:

$$M_{cr} = R_{bt,ser} \left[\frac{2(I_{b0} + nI_{s0} + nI_{s'0})}{h - x} + S_{b0} \right] \quad (4)$$

trong đó: x là chiều cao vùng nén; $n = \frac{E_s}{E_b}$ với E_s , E_b tương ứng là mô đun đàn hồi của thép và bê tông; I_{b0} ; I_{s0} ; $I_{s'0}$ lần lượt là mô men quán tính đối với trục trung hòa của diện tích vùng bê tông chịu nén, diện tích cốt thép chịu kéo và chịu nén:

$$I_{b0} = \frac{bx^3}{3} ; I_{s0} = A_s(h_0 - x)^2 ; I_{s'0} = A'_s(x - a')^2 \quad (5)$$

S_{b0} : mômen tĩnh đối với trục trung hòa của diện tích vùng bê tông chịu kéo.

$$S_{b0} = \frac{b(h-x)^2}{2} \quad (6)$$

Kết quả tính toán cho giá trị $M_{cr} = 18,86$ (daN.m). Đối chiếu với các giá trị M_{max} của các dầm thí nghiệm trình bày trong Bảng 2 có thể thấy tính toán dầm D1 áp dụng trường hợp không có khe nứt trong vùng kéo. Với dầm D2 và D3 cần phải tính toán độ võng kể đến đoạn dầm bị nứt và không nứt.

* Tính toán độ võng dài hạn theo tiêu chuẩn ACI 318:2008 [6]

Theo Viện Tiêu chuẩn Bê tông Hoa Kỳ (ACI), độ võng dài hạn của dầm do hai thành phần biến dạng dài hạn của bê tông gây ra là biến dạng từ biến và biến dạng co ngót. Trong tiêu chuẩn này, độ võng dài hạn Δ_l của dầm bê tông được xác định dựa trên độ võng ngắn hạn do tải trọng tác dụng dài hạn gây ra Δ_i và hệ số kể đến sự làm việc dài hạn của kết cấu (gọi tắt là hệ số dài hạn). Độ võng ngắn hạn được xác định theo công thức sau:

$$\Delta_i = \frac{5M_a I^2}{48E_c I_e} \quad (7)$$

Trong công thức trên M_a là mô men uốn lớn nhất tại tiết diện giữa dầm, I là nhịp dầm, E_c là mô đun đàn hồi của bê tông, I_e là mô men quán tính hiệu dụng có kể đến sự làm việc của tiết diện vùng bê tông bị nứt và vùng bê tông không nứt (Hình 8):

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (8)$$

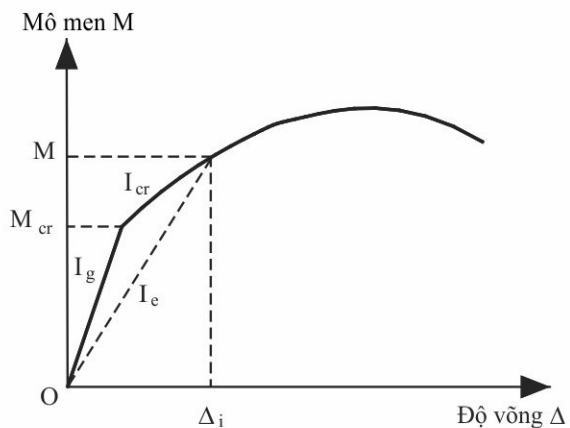
Với M_{cr} là mô men uốn gây nứt dầm được xác định dựa trên cường độ chịu kéo của bê tông và các đặc trưng hình học của tiết diện dầm, I_g và I_{cr} lần lượt là mô men quán tính của tiết diện không nứt và tiết diện bị nứt của dầm.

Đối với việc xác định hệ số dài hạn, tiêu chuẩn ACI đưa ra hai phương pháp:

- Phương pháp theo tiêu chuẩn ACI 318:2008 [6]: hệ số dài hạn, ký hiệu λ , được xác định kể đến đồng thời ảnh hưởng của biến dạng từ biến và biến dạng co ngót của bê tông:

$$\Delta_l = \lambda \cdot \Delta_i \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad (10)$$



Hình 8. Tính toán độ võng ngắn hạn của dầm theo tiêu chuẩn ACI

trong đó: ρ' là hàm lượng cốt thép chịu nén của dầm; ξ là hệ số được lấy theo thời gian tác dụng tải trọng lên kết cấu, được xác định dựa theo đồ thị trên Hình 9:

- Phương pháp theo tiêu chuẩn ACI 209.2R-08 [7]: ảnh hưởng của biến dạng từ biến và biến dạng co ngót đến độ võng dài hạn của dầm BTCT được kể độc lập trong tính toán dự báo độ võng dài hạn:

$$\Delta_l = \Delta_{cr} + \Delta_{sh} \quad (11)$$

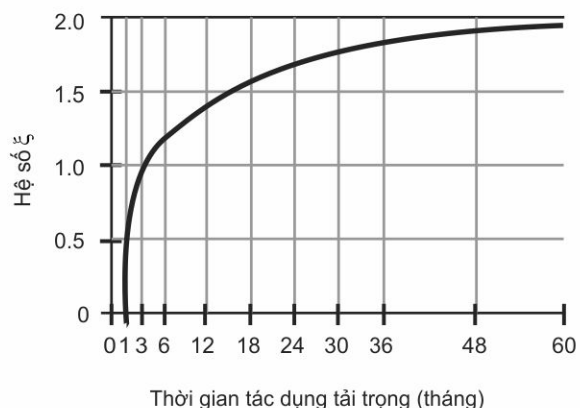
Độ võng dài hạn do biến dạng từ biến của bê tông Δ_{cr} được xác định theo công thức sau:

$$\Delta_{cr} = \lambda_c \Delta_i \quad (12)$$

$$\lambda_c = \frac{0,85}{1 + 50\rho'} C_t \quad (13)$$

trong đó C_t là hệ số từ biến của bê tông được xác định theo công thức sau:

$$C_t = \left(\frac{(t - t_0)^{0,6}}{10 + (t - t_0)^{0,6}} \right) C_u \quad (14)$$



Hình 9. Biểu đồ xác định giá trị ξ theo thời gian tác dụng tải trọng

với t là tuổi của bê tông ở thời điểm tính toán (ngày), t_0 là tuổi của bê tông ở thời điểm đặt tải (ngày), C_u là giá trị giới hạn của hệ số từ biến được xác định phụ thuộc vào các điều kiện về độ ẩm môi trường, tuổi của bê tông ở thời điểm thí nghiệm, các đặc trưng về cấp phối vật liệu chế tạo bê tông và hình dạng của kết cấu.

Độ võng dài hạn do biến dạng co ngót của bê tông Δ_{sh} được xác định theo công thức sau:

$$\Delta_{sh} = 0,125 \phi_{sh} l^2 \quad (15)$$

$$\phi_{sh} = \frac{A_{sh}(\epsilon_{sh})_t}{h} \quad (16)$$

trong đó h là chiều cao tiết diện dầm; A_{sh} là hệ số kể đến ảnh hưởng của cốt thép vùng kéo và vùng nén đến biến dạng co ngót của bê tông; $(\epsilon_{sh})_t$ là biến dạng co ngót của bê tông theo thời gian được xác định theo công thức sau:

$$(\epsilon_{sh})_t = \left(\frac{t - t_c}{35 + (t - t_c)} \right) (\epsilon_{sh})_u \quad (17)$$

với $(\epsilon_{sh})_u$ là biến dạng co ngót giới hạn của bê tông trong điều kiện tiêu chuẩn, có giá trị bằng $780 \cdot 10^{-6}$, t_c là thời gian bảo dưỡng bê tông. Khi bê tông làm việc trong các điều kiện khác với điều kiện tiêu chuẩn được quy định trong [7], biến dạng co ngót giới hạn của bê tông cần được điều chỉnh thông số các hệ số kể đến ảnh hưởng của độ ẩm môi trường, thời gian bảo dưỡng, cấp phối vật liệu chế tạo, hình dạng của kết cấu.

Trên Bảng 4 trình bày kết quả tính toán độ võng của các dầm thí nghiệm theo tiêu chuẩn TCVN 5574: 2012, ACI 318: 2008 và ACI 209.2R ở thời điểm 130 ngày sau khi chất tải và phần trăm chênh lệch giữa kết quả tính toán và kết quả thực nghiệm. Chi tiết các bước tính toán được trình bày trong [9]. Có thể nhận thấy, các kết quả tính toán dự báo độ võng theo 03 tiêu chuẩn nêu trên đều lớn hơn so với kết quả thực nghiệm. So với hai tiêu chuẩn TCVN 5574: 2012 và ACI 209.2R thì việc tính toán theo tiêu chuẩn ACI 318:2008 cho sai lệch nhỏ nhất so với kết quả thí nghiệm.

Bảng 4. So sánh kết quả thí nghiệm và kết quả tính toán độ võng dài hạn

Dầm	Tiêu chuẩn tính toán	Độ võng dài hạn ở giữa dầm sau 130 ngày chất tải (mm)		Độ sai lệch giữa kết quả tính toán và thí nghiệm(%)
		Kết quả tính toán	Kết quả thí nghiệm	
D1	TCVN 5574:2012	2,690	1,860	44,6 %
	ACI 308:2008	2,163		16,3 %
	ACI 290. 2R	2,517		35,3 %
D2	TCVN 5574:2012	5,320	4,250	25,2 %
	ACI 308:2008	5,298		24,7 %
	ACI 290.2R	6,100		43,5 %
D3	TCVN 5574:2012	9,270	7,820	18,5 %
	ACI 308:2008	8,184		4,70 %
	ACI 290.2R	8,023		14,9 %



4. Kết luận và kiến nghị

Những kết quả thu được từ nghiên cứu cho phép làm rõ hơn sự làm việc dài hạn của kết cấu dầm BTCT chịu uốn. Có thể rút ra một số kết luận sau:

- Độ võng dài hạn của kết cấu dầm BTCT chịu uốn chịu ảnh hưởng rõ ràng của độ lớn của tải trọng tác dụng. Điều này được giải thích thông qua biến dạng từ biến của bê tông, thành phần chính gây ra độ võng dài hạn, tăng khi ứng suất trong bê tông tăng.

- Tính toán dự báo độ võng dài hạn theo những tiêu chuẩn trình bày trong bài báo có sai số khá lớn so với kết quả thực nghiệm. Sự sai lệch này chủ yếu do chưa có đầy đủ các số liệu phục vụ cho việc tính toán. Trong tính toán còn sử dụng các thông số do các tiêu chuẩn kiến nghị sử dụng.

- Trong 03 tiêu chuẩn tính toán độ võng dài hạn, tiêu chuẩn ACI 318:2008 cho kết quả tính toán có độ sai lệch với kết quả thực nghiệm là thấp nhất. Đồng thời việc tính toán độ võng dài hạn theo tiêu chuẩn này

đơn giản, rõ ràng và phù hợp với thực tế tính toán thiết kế công trình. Do vậy kiến nghị sử dụng tiêu chuẩn ACI 318: 2008 trong việc dự báo độ võng dài hạn của kết cấu BTCT làm việc chịu uốn.

- Bên cạnh đó, để có số liệu phục vụ cho công tác tính toán độ võng dài hạn cho kết cấu BTCT cần tiến hành nghiên cứu thực nghiệm về biến dạng co ngót và biến dạng từ biến của bê tông trong điều kiện Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

1. TCVN 3118 (1993), *Bê tông nặng, Phương pháp xác định cường độ chịu nén*.
2. TCVN 5726 (1993), *Bê tông nặng, Phương pháp xác định cường độ lắng trụ và mô đun đàn hồi khi nén tĩnh*.
3. TCVN 5574 (2012), *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép, Tiêu chuẩn thiết kế*.
4. TCVN 9344 (2012), *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Đánh giá độ bền của các bộ phận kết cấu chịu uốn bằng phương pháp thí nghiệm chất tải tĩnh*.
5. ACI 437.1R (2007), *Load Tests of Concrete Structures: Methods, Magnitude, Protocols, and Acceptance Criteria*, American Concrete Institute.
6. ACI 318 (2008), *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute.
7. ACI 209.2R (2008), *Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete*, Reported by ACI Committee 209, American Concrete Institute.
8. Ngọc Bình NGUYEN, Cong Than PHAM, Trung Hieu NGUYEN (2013), "Some experimental results of concrete shrinkage strain in Vietnam's warm-wet climatic condition", *Proceeding of International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia (USMCA 2013)*, 1211-1215.
9. Nguyễn Ngọc Bình, Nguyễn Trung Hiếu (2014), *Nghiên cứu độ võng dài hạn của dầm BTCT*, Báo cáo Đề tài NCKH cấp Trường Đại học Xây dựng, mã số 75-2014/KHXD.
10. Gilbert R. I (1992), "Shrinkage Cracking in Fully Restrained Concrete Members", *ACI Structural Journal*, 89(2): 141-149.
11. Đinh Văn Tùng (2014), *Nghiên cứu độ võng dài hạn của dầm BTCT*, Luận văn Thạc sỹ kỹ thuật, Trường Đại học Xây dựng.