

TỠN HAO ỨNG SUẤT TRONG THIẾT KẾ SÀN BÊ TÔNG CỐT THÉP ỨNG LỰC TRƯỚC CĂNG SAU

KS. Nguyễn Chí Hiếu

Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng - Bộ Xây dựng

Tóm tắt: *Tổn hao ứng suất là một yếu tố quan trọng trong phân tích và tính toán kết cấu Bê tông cốt thép (BTCT) ứng lực trước (ƯLT). Một số Tiêu chuẩn thiết kế trên thế giới, về cơ bản đưa ra các phương pháp tính toán tổn hao ứng suất và kết quả khác nhau. Bài báo này trình bày phương pháp và ví dụ tính toán tổn hao ứng suất theo một số Tiêu chuẩn đang được áp dụng tại Việt Nam.*

Abstract: *Loss of stress is an important factor in analysis and calculation of prestressed reinforced concrete structure. Design standards in some countries give methods of calculation of stress losses and results of calculations are different. This paper presents methods and examples of calculation of stress losses according to some of standards being applicable in Viet Nam.*

1. Đặt vấn đề

Tổn hao ứng suất là một yếu tố quan trọng trong phân tích và tính toán kết cấu Bê tông cốt thép (BTCT) ứng lực trước (ƯLT). Các kỹ sư thường áp dụng Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 5574:2012 và một số Tiêu chuẩn thiết kế trên thế giới như AS3600 của Úc, BS EN 1992 của Anh hay ACI 318-08 của Mỹ khi thiết kế các công trình ƯLT tại Việt Nam. Về cơ bản, các tiêu chuẩn thiết kế đều chỉ ra phương pháp tính toán các loại tổn hao ứng suất một cách khá rõ ràng. Tuy nhiên các kết quả là có khác nhau. Việc am hiểu tiêu chuẩn để làm chủ thiết kế nói chung cũng như nắm bắt phương pháp và thực hành tốt tính toán các loại tổn hao ứng suất nói riêng trong thiết kế kết cấu BTCT ƯLT là điều rất quan trọng.

Bài báo này trình bày phương pháp và ví dụ tính toán tổn hao ứng suất theo một số tiêu chuẩn đang được áp dụng tại Việt Nam, cụ thể là tiêu chuẩn AS3600-2009 của Úc; tiêu chuẩn BS EN 1992-1-1:2004 của Anh; tiêu chuẩn ACI 318-08 của Mỹ và tiêu chuẩn TCVN 5574:2012 của Việt Nam.

2. Lý thuyết tính toán tổn hao ứng suất theo một số tiêu chuẩn đang được ứng dụng tại Việt Nam

2.1. Tiêu chuẩn AS 3600-2009 [2]

2.1.1. Tổn hao ứng suất do ma sát

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{pa} &= \sigma_{pj} (1 - e^{-\mu(\alpha_{tot} + \beta_p L_{pa})}) \\ \Rightarrow \Delta P_{pa} &= P_{pj} (1 - e^{-\mu(\alpha_{tot} + \beta_p L_{pa})}) \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó: σ_{pj} , P_{pj} : ứng suất và lực kéo tại đầu neo kéo; $\Delta\sigma_{pa}$, ΔP_{pa} : tổn hao ứng suất, lực kéo tại vị trí cách đầu kéo một khoảng L_{pa} ; β_p : độ lệch góc ngẫu nhiên của cáp trên đơn vị chiều dài (rad/m) - theo bảng; μ : hệ số ma sát giữa cáp và ống gen (1/rad) - theo bảng; α_{tot} : tổng các giá trị tuyệt đối độ lệch góc liên tiếp của cáp giữa điểm đầu tại đầu neo kéo và tiết diện tính toán tại vị trí cách đầu kéo một khoảng L_{pa} (rad);

2.1.2. Tổn hao ứng suất do tụt neo

$$\Delta P_{an} = 2Z \operatorname{tg}\omega \quad (2)$$

Trong đó: ΔP_{an} : tổn hao lực kéo tại đầu kéo do tụt neo; $Z = \sqrt{(E_p A_p \delta_L)} / \operatorname{tg}\omega$; $\operatorname{tg}\omega = (P_{pj} - P_{pa \text{fin}}) / L$; $P_{pa \text{fin}}$: lực kéo còn lại do ma sát tại vị trí cuối cùng của sợi cáp; Z : chiều dài vùng tổn hao ứng suất do tụt neo xảy ra; $\operatorname{tg}\omega$: tổn hao lực kéo do ma sát trên đơn vị chiều dài; E_p , A_p : mô đun đàn hồi và tiết diện ngang của cáp; δ_L : độ tụt neo, $\delta_L = 6\text{mm}$; L : chiều dài sợi cáp.

2.1.3. Tổn hao ứng suất do co ngắn đàn hồi của bê tông

$$\Delta p_{cm} = A_p \sigma_{ci} (E_p / E_{cj})$$

$$\Rightarrow \Delta P_{cm} = \Delta p_{cm} \left[(n_c - 1) / 2n_c \right] \quad (3)$$

Trong đó: Δp_{cm} : tổn hao lực kéo trong sợi cáp do co ngắn đàn hồi của bê tông; ΔP_{cm} : mất mát lực kéo trung bình của một sợi cáp khi ống gen chứa n_c tao cáp; E_{ci} : môđun đàn hồi của bê tông tại thời điểm kéo cáp; σ_{ci} : ứng suất nén trung bình trong bê tông do cáp gây ra.

2.1.4. Tổn hao ứng suất do co ngót bê tông

$$\Delta P_{cs} = A_p E_p \frac{\varepsilon_{cs}}{1 + 15A_s / A_g} \quad (4)$$

Trong đó: ΔP_{cs} : tổn hao lực kéo trong sợi cáp do co ngót bê tông; A_s, A_g : diện tích cốt thép thường và tiết diện mặt cắt ngang của dải bê tông quanh tao cáp; $\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cse} + \varepsilon_{csd}$: biến dạng co ngót của bê tông bằng tổng biến dạng co ngót tự sinh và biến dạng co ngót do phơi khô.

2.1.5. Tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông

$$\Delta P_{cc} = A_p E_p \varepsilon_{cc} \quad (5)$$

Trong đó: ΔP_{cc} : tổn hao lực kéo trong sợi cáp do từ biến bê tông; ε_{cc} : biến dạng co ngót cuối cùng được xác định như sau: $\varepsilon_{cc} = 0,8 (\sigma_{ci} / E_c) \varphi_{cc}$

2.1.6. Tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cáp

$$\Delta P_{re} = R (P_{pj} - \Delta P_{cs} - \Delta P_{cc}) \quad (6)$$

Trong đó: ΔP_{re} : tổn hao lực kéo do chùng ứng suất của cáp; $R = k_4 k_5 k_6 R_b$, với: R_b : giá trị chùng ứng suất cơ bản; $k_4 = \log[5,4(j)^{1/6}]$, với j : thời gian từ khi kéo căng đến thời điểm tính tổn hao ứng suất (ngày); k_5 : hệ số tra theo biểu đồ, phụ thuộc tỷ số σ_p / f_p (f_p là độ bền kéo của cáp). k_6 : hệ số phụ thuộc vào nhiệt độ trung bình hàng năm (T^0C) quanh công trình: $k_6 = (T^0C) / (20^0C)$, $k_6 \geq 1$.

2.2. Tiêu chuẩn BS EN 1992-1-1 :2004 [5, 6]

2.2.1. Tổn hao ứng suất do ma sát

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{max} (1 - e^{-\mu(\theta+kx)}) \quad (7)$$

Trong đó: P_{max} : lực kéo tại đầu neo kéo; $\Delta P_{\mu}(x)$: tổn hao lực kéo tại vị trí cách đầu kéo một khoảng x ; μ : hệ số ma sát giữa cáp và ống gen (1/rad) - theo bảng; k : độ lệch góc ngẫu nhiên của cáp trên đơn vị chiều dài, $k = 0,005-0,01 \text{ rad/m}$ khi không có số liệu cụ thể; θ : tổng góc chuyển hướng theo phương đứng và ngang (giá trị tuyệt đối) của cáp giữa điểm đầu và mặt cắt tính toán (rad).

2.2.2. Tổn hao ứng suất do tụt neo

$$\Delta P_A = 2px_A \quad (8)$$

Trong đó: ΔP_A : tổn hao lực kéo tại đầu kéo do tụt neo; $p = [\Delta P_{\mu}(L)] / L$; $x_A = \sqrt{(\delta_{ad} E_p A_p) / p}$, với: p : hao tổn ứng suất do ma sát trên chiều dài cáp; L : chiều dài sợi cáp; δ_{ad} - độ dịch chuyển của neo.

2.2.3. Tổn hao ứng suất do co ngắn đàn hồi của bê tông

$$\Delta P_{el} = A_p E_p \left([j \Delta \sigma_c(t)] / [E_{cm}(t)] \right) \quad (9)$$

Trong đó: ΔP_{el} : tổn hao lực kéo trong sợi cáp do co ngắn đàn hồi của bê tông; $j = (n-1) / 2n$; $E_{cm}(t) = E_{cm} \left([f_{cm}(t)] / f_{cm} \right)^{0,3}$; $f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm}$; $\beta_{cc}(t) = e^{s[1-\sqrt{28/t}]}$, với: t : tuổi của bê tông khi kéo cáp (ngày); E_{cm} : Môđun đàn hồi của bê tông ở tuổi 28 ngày; $f_{cm}, f_{cm}(t)$: cường độ trung bình của bê tông ở tuổi 28 và t ngày; n là số sợi cáp trong ống gen; $s = 0,2 \div 0,38$ là hệ số phụ thuộc loại xi măng sử dụng; $\Delta \sigma_c(t)$: sự thay đổi ứng suất tại trọng tâm đường cáp ở thời điểm t .

2.2.4. Tổn hao ứng suất do co ngót, từ biến của bê tông và chùng ứng suất của cáp

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \Delta \sigma_{p,c+s+r} = \frac{\varepsilon_{cs} E_p + 0,8 \Delta \sigma_{pr} + (E_p / E_{cm}) \varphi(t, t_0) \sigma_{cQP}}{1 + (E_p / E_{cm}) (A_p / A_c) [1 + (A_c / I_c) Z_{cp}^2] [1 + 0,8 \varphi(t, t_0)]} \quad (10)$$

Trong đó: $\Delta \sigma_{p,c+s+r}$, ΔP_{c+s+r} : tổn hao ứng suất, lực kéo do co ngót, từ biến của bê tông, chùng ứng suất của cáp; $\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{od} + \varepsilon_{ca}$: biến dạng co ngót của bê tông; $\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0)$, $\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0)$, t_0 : số ngày tuổi của bê tông khi chịu tải; $\Delta \sigma_{pr} = \sigma_{pi} 0,66 \rho_{1000} e^{9,1\mu} (t / 1000)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5}$, với: ρ_{1000} : chùng ứng suất cơ bản của cáp; $\mu = \sigma_{pi} / f_{pk}$, σ_{pi} , f_{pk} : ứng suất của cáp tại đầu neo, ứng suất bền của cáp; σ_{cQP} : ứng suất ban đầu trong bê tông do lực căng trước và tải trọng bản thân; I_c : mômen quán tính của mặt cắt ngang bê tông; Z_{cp} : khoảng cách giữ trục trọng tâm của tiết diện bê tông và đường cáp.

2.3. Tiêu chuẩn ACI 318-08 [7, 8, 9, 10]

2.3.1. Tổn hao ứng suất do ma sát

$$P_{px} = P_{pj} e^{-(Kl_{px} + \mu_p \alpha_{px})} \text{ khi } (Kl_{px} + \mu_p \alpha_{px}) > 0,3 \quad (11)$$

$$P_{px} = P_{pj} (1 + Kl_{px} + \mu_p \alpha_{px})^{-1} \text{ khi } (Kl_{px} + \mu_p \alpha_{px}) \leq 0,3 \quad (12)$$

Trong đó: P_{pj} : lực ứng suất trước tại đầu neo; P_{px} : lực kéo còn lại trên sợi cáp tại vị trí cách đầu kéo một khoảng L_{px} ; α_{px} : tổng vec tơ sự thay đổi theo phương đứng và phương ngang của cáp (rad); K , μ_p : hệ số dao động và hệ số đường cong được xác định bằng thực nghiệm, lấy theo bảng. l_{px} : khoảng cách từ đầu kéo đến tiết diện tính toán tổn hao ứng suất của cáp (m).

2.3.2. Tổn hao ứng suất do tụt neo

$$ANC = \Delta f_s = (2E_s \Delta_a) / L_s \quad (13)$$

Trong đó: ANC: tổn hao lực kéo tại đầu kéo do tụt neo; $L_s = \sqrt{(E_s \Delta_a L) / f_f}$; $f_f = \Delta P_{px} / A_p$; Δ_a : độ tụt của neo; E_s : mô đun đàn hồi của cáp U/LT; L : độ dài của cáp; L_s : chiều dài vùng tổn hao ứng suất do tụt neo; f_f : tổn hao ứng suất do ma sát tại vị trí cuối cùng của cáp.

2.3.3. Tổn hao ứng suất do co ngắn đàn hồi của bê tông

$$ES = f_{cir} [(K_{es} E_s) / E_{ci}] \quad (14)$$

Trong đó: ES: tổn hao lực kéo do co ngắn đàn hồi của bê tông; $K_{es} = 0,5$ cho cấu kiện căng sau; f_{cir} : ứng suất của bê tông tại vị trí cáp ngay sau thời điểm kéo căng; E_{ci} : mô đun đàn hồi của bê tông tại thời điểm căng cáp [10].

2.3.4. Tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông theo thời gian

$$SH = 8,2 \times 10^{-6} K_{sh} E_s [1 - (0,06V / S)] (100 - RH), \quad (8,2 \times 10^{-6} \text{ có đơn vị là in./in}) \quad (15)$$

Trong đó: SH: tổn hao lực kéo trong sợi cáp do co ngót bê tông; K_{sh} phụ thuộc vào thời gian bảo dưỡng ẩm cho cấu kiện, tra theo bảng; RH: độ ẩm môi trường (%); $[V, (in)] / [S, (in)]$: tỉ lệ thể tích trên diện tích bề mặt phần tiết diện bê tông quanh sợi cáp.

2.3.5. Tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông

Với cáp bàm dính tính toán theo công thức:

$$CR = K_{cr} (f_{cir} - f_{cds}) (E_s / E_c) \quad (16)$$

Trong đó: CR: tổn hao lực kéo trong sợi cáp do từ biến bê tông; $K_{cr} = 1,6$ cho cấu kiện U/LT căng sau; f_{cds} : ứng suất trong bê tông tại vị trí cáp do tính tải đặt thêm vào sau khi cấu kiện được kéo căng. E_c : mô đun đàn hồi của bê tông tại thời điểm sau 28 ngày.

2.3.6. Tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cáp

$$RE = [K_{re} - J(SH + CR + ES)]C \tag{17}$$

Trong đó: RE: tổn hao lực kéo do chùng ứng suất của cáp; K_{re} , J, C: Hệ số được lấy theo bảng;

2.4. Tiêu chuẩn TCVN 5574:2012 [1]

2.4.1. Tổn hao ứng suất do ma sát

$$\Delta\sigma_{ms} = \sigma_{sp} \left[1 - 1 / (e^{\pi x + \delta\theta}) \right] \tag{18}$$

Trong đó: σ_{sp} : ứng suất ban đầu trong cáp (không kể đến tổn hao ứng suất); δ (1/rad) và π (1/m) là các hệ số lấy theo bảng, phụ thuộc loại ống rãnh hay bề mặt tiếp xúc; x: chiều dài tính từ thiết bị căng đến tiết diện tính toán; θ : tổng góc chuyển hướng của trục cốt thép, rad.

2.4.2. Tổn hao ứng suất do biến dạng của neo đặt ở thiết bị kéo căng

$$\Delta\sigma_{neo} = E_{sp} \left[(\Delta l_1 + \Delta l_2) / L \right] \tag{20}$$

Trong đó: $\Delta\sigma_{neo}$ là tổn hao ứng suất do biến dạng của neo; Δl_1 : biến dạng của êcu hay bản đệm giữa các neo và bê tông, lấy bằng 1mm; Δl_2 : biến dạng của neo hình cốc, êcu neo, lấy bằng 1mm;

L: chiều dài cáp (mm); E_{sp} : mô đun đàn hồi của cốt thép căng (MPa).

2.4.3. Tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông

Tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông ($\Delta\sigma_{co}$) được lấy theo bảng.

2.4.4. Tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông

$$\Delta\sigma_{tb} = (150\alpha\sigma_{bp}) / R_{bp} \text{ khi } \sigma_{bp} / R_{bp} \leq 0,75 \tag{21}$$

$$\Delta\sigma_{tb} = 300\alpha \left[(\sigma_{bp} / R_{bp}) - 0,375 \right] \text{ khi } \sigma_{bp} / R_{bp} > 0,75 \tag{22}$$

Trong đó: α : hệ số lấy phụ thuộc vào điều kiện bảo dưỡng bê tông; σ_{bp} : ứng suất nén trước của bê tông được xác định tại mức trọng tâm cốt thép dọc; R_{bp} : cường độ của bê tông tại thời điểm gây ứng lực trước.

2.4.5. Tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cốt thép

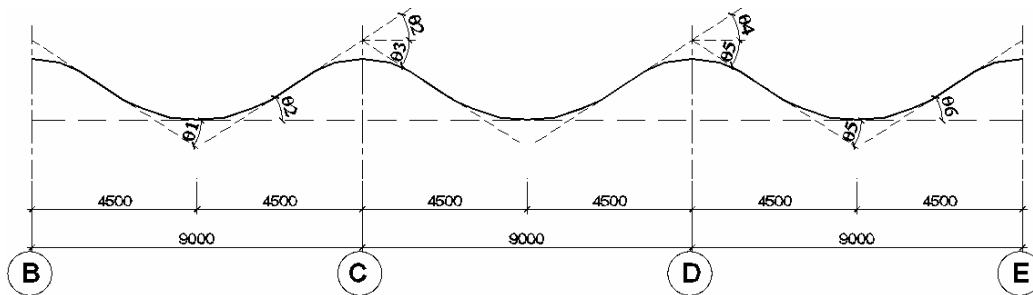
$$\Delta\sigma_{ch} = \sigma_{sp} \left[0,22(\sigma_{sp} / R_{s,ser}) - 0,1 \right] \tag{23}$$

Trong đó: σ_{sp} : ứng suất ban đầu trong cốt thép có kể hao tổn ứng suất; $R_{s,ser}$: cường độ chịu kéo tính toán của cốt thép theo trạng thái giới hạn thứ 2.

3. Ví dụ tính toán và so sánh tổn hao ứng suất theo các tiêu chuẩn

3.1. Lựa chọn số liệu đầu vào

3.1.1. Dãi tính toán như hình vẽ 1



Hình 1. Sơ đồ dải tính toán

3.1.2. Neo, ống gen:

Neo loại 4S13, ống gen chứa 4 tao cáp, khoảng cách giữa các ống gen: 0,72m.

3.1.3. Chiều dày sàn (D_s):

$$L/D_s \leq 40, L = 9m \Rightarrow D_s \approx 225mm \Rightarrow \text{Chọn: } D_s = 230mm$$

3.1.4. Lớp bê tông bảo vệ và độ võng của cáp

Lớp bê tông bảo vệ bên dưới (25mm) và bên trên (20mm). Độ võng lớn nhất của cáp là: 138mm.

3.1.5. Cáp và lực kéo ban đầu:

Cáp T13, độ bền 18600daN/cm², tiết diện ngang 0,987cm², mô đun đàn hồi 1,95*10⁶daN/cm², chùng ứng suất cơ bản 3,5%; Lực kéo ban đầu: $P_{pj} = 0,8f_p A_p = 14687daN$.

3.1.6. Bê tông, thép cấu tạo:

Cường độ đặc trưng của bê tông: 32 MPa; thép cấu tạo 2 lớp D10a300.

3.1.7. Công trình nằm ở vùng nhiệt đới

Nhiệt độ trung bình hàng năm là 25°C.

3.2. Theo tiêu chuẩn AS 3600-2009

3.2.1. Tổn hao ứng suất do ma sát

Với $\beta_p = 0,008 \text{ rad/m}$; $\mu = 0,2/\text{rad}$,

$$\text{ta có: } \Delta P_{pa} = P_{pj} (1 - e^{-\mu(\alpha_{tot} + \beta_p L_{pa})}) = 2244,7 \text{ daN.}$$

3.2.2. Tổn hao ứng suất do tụt neo

$$\text{Với } \Delta l = 0,6 \text{ cm ta có: } Z = 11,79 \text{ m; } tg\omega = 83,14 \text{ daN/m} \Rightarrow \Delta P_{an} = 2Ztg\omega = 1959,7daN.$$

3.2.3. Tổn hao ứng suất do co giãn đàn hồi của bê tông

$$\Delta p_{cm} = A_p \sigma_{ci} (E_p / E_{cj}) = 255,7daN \quad \Rightarrow \Delta P_{cm} = \Delta p_{cm} [(n_c - 1) / 2n_c] = 255,7(3/8) = 95,9daN.$$

3.2.4. Tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông theo thời gian

$$\Delta P_{cs} = A_p E_p \frac{\epsilon_{cs}}{1 + 15A_s / A_g} = 885,1 \text{ daN, trong đó: thời điểm tính tổn hao ứng suất: } t = 10000 \text{ ngày (30 năm).}$$

3.2.5. Tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông

Với tuổi bê tông tại thời điểm chất tải lấy là 28 ngày, ta có: $\Delta P_{cc} = A_p E_p \times \epsilon_{cc} = 391,2 \text{ daN}$, trong đó:

$$\epsilon_{cc} = 0,8(\sigma_{ci} / E_c) \phi_{cc} = 0,8(\sigma_{ci} / E_c) k_2 k_3 k_4 k_5 \phi_{cc,b} = 203 \times 10^{-6}$$

3.2.6. Tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cáp

$$\Delta P_{re} = R(P_{pj} - \Delta P_{cs} - \Delta P_{cc}) = 9,18(14687 - 885,1 - 391,2) = 1231,2daN.$$

Trong đó: $R = k_4 k_5 k_6 R_b = 9,18\%$.

3.3. Theo tiêu chuẩn BS EN 1992-1-1:2004

3.3.1. Tổn hao ứng suất do ma sát

$$\text{Với: } \mu = 0,19; k = 0,01 \text{ rad/m, ta có: } \Delta P_{\mu}(x) = (P_{max} - P_x) = P_{max} (1 - e^{-\mu(\theta + kx)}) = 2269,2 \text{ daN.}$$

3.3.2. Tổn hao ứng suất do tụt neo

Với $\delta_{ad} = 0,6cm$, ta có: $x_A = 11,72m$;

$$p = 84,04 \text{ daN/m} \Rightarrow \Delta P_A = 1970,3 \text{ daN.}$$

3.3.3. Tổn hao ứng suất do co giãn đàn hồi của bê tông

$$\Delta P_{el} = A_p E_p [j \Delta \sigma_c(t) / E_{cm}(t)] =$$

$$0,987(0,375 \times 35,47 / 314549) 1950000 = 81,4 \text{ daN}$$

3.3.4. Tổn hao ứng suất do co ngót, từ biến của bê tông và chùng ứng suất của thép

Với $t_0 = 28$ ngày là tuổi bê tông khi chất tải; $t_s = 7$ ngày là số ngày bảo dưỡng bê tông, ta có:

$$\Delta P_{c+s+r} = A_p \frac{\varepsilon_{cs} E_p + 0,8 \Delta \sigma_{pr} + (E_p / E_{cm}) \varphi(t, t_0) \sigma_{c,QP}}{1 + (E_p / E_{cm}) (A_p / A_c) [1 + (A_c / I_c) z_p^2]} [1 + 0,8 \varphi(t, t_0)] = 1600,18 \text{ daN}$$

3.4. Theo tiêu chuẩn ACI 318-08

3.4.1. Tổn hao ứng suất do ma sát

Với: $k = 0.0005 \text{ 1/foot}$; $\mu = 0,2 \text{ (1/rad)}$, ta có: $\Delta P_{px} = \Delta P_{pj} = P_{pj} - P_{px} = P_{pj} (1 - e^{-k(\mu x + \mu_p a_{px})}) = 2258,1 \text{ daN}$.

3.4.2. Tổn hao ứng suất do biến dạng của neo

$$ANC = \Delta f_s = (2 E_s \Delta_a / L_s) = 1991,5 \text{ daN/cm}^2 \Rightarrow \Delta P_{ANC} = ANC \times A_p = 1991,5 \times 0,987 = 1965,6 \text{ daN}$$

3.4.3. Tổn hao ứng suất do co ngắn đàn hồi của bê tông

$$ES = f_{cir} (K_{es} E_s) / E_{ci} = 146,14 \text{ daN/cm}^2 \Rightarrow \Delta P_{ES} = \Delta P(n-1) / n = ESA_p (3/8) = 108,2 \text{ daN}$$

3.4.4. Tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông

Với số ngày bảo dưỡng bê tông là 7 ngày, ta có: $SH = 683,3 \text{ daN/cm}^2 \Rightarrow \Delta P_{SH} = A_p SH = 674,5 \text{ daN}$.

3.4.5. Tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông

$$CR = K_{cr} (f_{cir} - f_{c,ds}) (E_s / E_c) = 413,3 \text{ daN/cm}^2 \Rightarrow \Delta P_{CR} = 0,987 \times 413,3 = 408 \text{ daN}$$

3.4.6. Tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cáp

$$RE = [350 - 0,04(683,3 + 413,3 + 109)] 1,28 = 386,2 \text{ daN/cm}^2 \Rightarrow \Delta P_{RE} = 381,2 \text{ daN}$$

3.5. Theo tiêu chuẩn TCVN 5574:2012

3.5.1. Tổn hao ứng suất do ma sát

Với $\varpi = 0,003 \text{ (1/m)}$; $\delta = 0,35 \text{ (1/rad)}$, ta có: $\Delta P_{ms} = P_{sp} - P_{ms} = P_{sp} (1 - e^{-\varpi x + \delta \theta}) = 3759,2 \text{ daN}$.

3.5.2. Tổn hao ứng suất do biến dạng của neo

$$\Delta \sigma_{neo} = E_{sp} (\Delta l_1 + \Delta l_2) / L = 14,44 \text{ daN/mm}^2 = 1444 \text{ daN/cm}^2 \Rightarrow \Delta P_{neo} = 1425,7 \text{ daN}$$

3.5.3. Tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông

$$\Delta \sigma_{co} = 30 \text{ MPa} = 300 \text{ daN/cm}^2 \Rightarrow \Delta P_{co} = 296, \text{ daN}$$

3.5.4. Tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông

$$\sigma_{bp} / R_{bp} = 35,47 / 250 \leq 0,75 \Rightarrow \Delta \sigma_{tb} = 150 \alpha \sigma_{bp} / R_{bp} = 21,28 \text{ MPa} \Rightarrow \Delta P_{tb} = 210,1 \text{ daN}$$

3.5.5. Tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cốt thép

$$\Delta \sigma_{ch} = \sigma_{sp} [0,22(\sigma_{sp} / R_{s,ser}) - 0,1] = 1394,3 \text{ daN/cm}^2 \Rightarrow \Delta P_{ch} = 1376,2 \text{ daN}$$

4. So sánh kết quả tính toán tổn hao ứng suất theo các tiêu chuẩn

4.1. So sánh tổn hao ứng suất tức thời

Tổn hao ứng suất tức thời bao gồm 3 loại: do ma sát, do tụt neo và do co ngắn đàn hồi của bê tông.

- Về tổn hao ứng suất do ma sát, công thức tính toán trong 4 tiêu chuẩn có dạng giống nhau. Kết quả tính toán theo 3 tiêu chuẩn nước ngoài có giá trị biến động do hệ số ma sát và đường cong có khoảng biến động cho trước.

TCVN 5574:2012 cho giá trị duy nhất ứng với trường hợp ống gen là kim loại do hệ số ma sát $\delta = 0,35$ 1/rad và đường cong $\varpi = 0,003$ 1/m được lấy cố định.

- Về tổn hao ứng suất do tụt neo, công thức trong 3 tiêu chuẩn nước ngoài cơ bản giống nhau, đồng thời đều đưa ra chiều dài vùng mất mát ứng suất. TCVN 5574:2012 không đề cập đến vùng mất mát ứng suất và không bị ảnh hưởng bởi tổn hao do ma sát như 3 tiêu chuẩn nước ngoài.

- Về tổn hao ứng suất do co ngắn đàn hồi của bê tông, các tiêu chuẩn nước ngoài cơ bản cho ra các kết quả giống nhau. TCVN 5574:2012 lại chưa đề cập đến loại tổn hao này.

- Kết quả tính toán tổn hao ứng suất tức thời trong bảng 1 cho thấy, 3 tiêu chuẩn nước ngoài cho kết quả tổn hao ứng suất do ma sát và tụt neo gần giống nhau nếu lựa chọn số liệu đầu vào giống nhau.

Bảng 1. Tổn hao ứng suất tức thời theo các tiêu chuẩn

Theo AS3600-2009	Theo BS EN 1992	Theo ACI 318-08	Theo TCVN 5574:2012
Tổn hao ứng suất do ma sát			
$\Delta P_{pa} = 2244,7$ daN	$\Delta P_x = 2269,2$ daN	$\Delta P_{px} = 2258,1$ daN	$\Delta P_{ms} = 3759,2$ daN
Tổn hao ứng suất do tụt neo			
$\Delta P_{an} = 1959,7$ daN	$\Delta P_A = 1970,3$ daN	$\Delta P_{ANC} = 1965,6$ daN	$\Delta P_{neo} = 1425,7$ daN
Tổn hao ứng suất co ngắn đàn hồi của bê tông khi kéo căng cáp không đồng thời			
$\Delta P_{cm} = 95,9$ daN	$\Delta P_{el} = 81,4$ daN	$\Delta P_{ES} = 108,2$ daN	Không đề cập
$\mu = 0,2$ /rad; $\beta_p = 0,008$ rad/m	$\mu = 0,19$ /rad; $k = 0,01$ rad/m	$\mu = 0,2$ /rad; $k = 0,0005$ /m	$\delta = 0,35$ /rad; $\varpi = 0,003$ /m

Bảng 2 là tổng hợp kết quả tính toán tổn hao ứng suất do ma sát và tụt neo theo 3 tiêu chuẩn nước ngoài khi thay đổi hệ số ma sát và đường cong.

Bảng 2. Tổn hao ứng suất do ma sát và tụt neo theo các tiêu chuẩn nước ngoài khi thay đổi hệ số ma sát μ và hệ số đường cong β_p (k)

Theo AS3600-2009			Theo BS EN 1992	
$\mu = 0,2$ /rad; $\beta_p = 0,024$ rad/m	$\mu = 0,15$ /rad; $\beta_p = 0,008$ rad/m	$\mu = 0,15$ /rad; $\beta_p = 0,024$ rad/m	$\mu = 0,19$ /rad;	$k = 0,005$ rad/m
$\Delta P_{pa} = 3274,6$ daN	$\Delta P_{pa} = 1717,9$ daN	$\Delta P_{pa} = 2531,7$ daN	$\Delta P_x = 1946,5$ daN	
$\Delta P_{an} = 2366,9$ daN	$\Delta P_{an} = 1714,4$ daN	$\Delta P_{an} = 2081,1$ daN	$\Delta P_A = 1824,9$ daN	
Theo ACI 318-08				
$\mu = 0,15$ /rad; $k = 0,0005$ /foot	$\mu = 0,15$ /rad; $k = 0,002$ /foot	$\mu = 0,25$ /rad; $k = 0,0005$ /foot	$\mu = 0,25$ /rad;	$k = 0,002$ /foot
$\Delta P_{px} = 1871,2$ daN	$\Delta P_{px} = 3465,8$ daN	$\Delta P_{px} = 2633,6$ daN	$\Delta P_{px} = 4133,3$ daN	
$\Delta P_{ANC} = 1789,2$ daN	$\Delta P_{ANC} = 2435,0$ daN	$\Delta P_{ANC} = 2122,6$ daN	$\Delta P_{ANC} = 2659,2$ daN	

Từ kết quả được đưa ra trong bảng 2, cho thấy tổn hao ứng suất do ma sát và tụt neo phụ thuộc nhiều vào hệ số ma sát và đường cong. Do vậy, người thiết kế cần thiết phải lựa chọn hệ số ma sát và đường cong một cách hợp lý, sát với thực tế của vật liệu và thi công.

4.2. So sánh tổn hao ứng suất theo thời gian

Tổn hao ứng suất theo thời gian bao gồm 3 loại: co ngót theo thời gian của bê tông, từ biến của bê tông và chùng ứng suất của cáp.

Theo 3 tiêu chuẩn nước ngoài, tổn hao ứng suất theo thời gian cơ bản được tính toán dựa trên số liệu vùng khí hậu, nhiệt độ, độ ẩm môi trường xung quanh công trình cũng như tham số về thời gian bảo dưỡng bê tông, thời gian chất tải, chùng ứng suất cơ bản của cấp, v.v... Kết quả tính toán tổn hao ứng suất theo thời gian trong mục 3 của bài báo được tổng hợp trong bảng 3.

Bảng 3. Tổn hao ứng suất theo thời gian theo các tiêu chuẩn

Theo AS3600-2009	Theo BS EN 1992	Theo ACI 318-08	Theo TCVN 5574:2012
Tổn hao ứng suất do co ngót theo thời gian của bê tông			
$\Delta P_{cs} = 885,1$ daN	$\Delta P_s = 820,6$ daN	$\Delta P_{SH} = 674,5$ daN	$\Delta P_{co} = 296,1$ daN
Tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông			
$\Delta P_{cc} = 391,2$ daN	$\Delta P_c = 254,6$ daN	$\Delta P_{CR} = 408$ daN	$\Delta P_{tb} = 210,1$ daN
Tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cấp			
$\Delta P_{re} = 1231,2$ daN	$\Delta P_r = 525$ daN	$\Delta P_{RE} = 381,2$ kG	$\Delta P_{ch} = 1376,2$ daN

Về tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông: TCVN 5574:2012 cho kết quả khá nhỏ so với các tiêu chuẩn khác. AS3600-2009 và BS EN 1992 cho kết quả cơ bản giống nhau và ít có biến động. ACI 318-08 cho kết quả có nhiều biến động phụ thuộc vào số ngày bảo dưỡng bê tông t_s . Bảng 4 là kết quả tính toán tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông theo ACI 318-08, ứng với các giá trị t_s khác nhau.

Bảng 4. Tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông theo ACI 318-08 ứng với các giá trị t_s khác nhau

$t_s = 1$ ngày	$t_s = 3$ ngày	$t_s = 5$ ngày	$t_s = 7$ ngày	$t_s = 10$ ngày
$\Delta P_{SH} = 805,8$ daN	$\Delta P_{SH} = 744,5$ daN	$\Delta P_{SH} = 700,7$ daN	$\Delta P_{SH} = 674,5$ daN	$\Delta P_{SH} = 639,4$ daN

Bảng 4 cho thấy, với $t_s = 1$ ngày thì $\Delta P_{SH} = 805,8$ daN sát với kết quả theo AS3600-2009 và BS EN 1992. Trên thực tế, việc bảo dưỡng bê tông sau khi thi công thường khó được kiểm soát chặt chẽ theo quy định. Vì vậy, tác giả kiến nghị, khi tính toán tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông theo ACI 318-08 thì lấy tham số $t_s = 1$ ngày khi điều kiện bảo dưỡng bê tông không được kiểm soát chặt chẽ.

Về tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông, các tiêu chuẩn cho kết quả có nhiều khác biệt. AS3600-2009 và BS EN 1992 cho kết quả phụ thuộc vào thời điểm chất tải t_0 . ACI 318-08 và TCVN 5574:2012 lại có ít biến động. Bảng 5 là kết quả tính toán tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông theo AS3600-2009 và BS EN 1992, ứng với t_0 khác nhau.

Bảng 5. Tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông theo AS3600-2009 và BS EN 1992 ứng với các giá trị t_0 khác nhau

$t_0 \geq 365$ ngày	$t_0 = 180$ ngày	$t_0 = 90$ ngày	$t_0 = 28$ ngày	$t_0 = 7$ ngày
Theo AS3600-2009				
$\Delta P_{cc} = 320,1$ daN	$\Delta P_{cc} = 359,1$ daN	$\Delta P_{cc} = 378,1$ daN	$\Delta P_{cc} = 391,2$ daN	$\Delta P_{cc} = 640,1$ daN
Theo BS EN 1992				
$\Delta P_c = 157,1$ daN	$\Delta P_c = 179,8$ daN	$\Delta P_c = 204,8$ daN	$\Delta P_c = 254,6$ daN	$\Delta P_c = 327,9$ daN

Về tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cấp, các tiêu chuẩn cho kết quả có sự khác biệt lớn. Theo các tiêu chuẩn nước ngoài, kết quả phụ thuộc vào tổn hao ứng suất do co ngót, từ biến của bê tông. TCVN 5574:2012 lại không phụ thuộc vào các giá trị này.

Theo TCVN 5574:2012 hay ACI 318-08, kết quả phụ thuộc vào tỷ số giữa ứng suất ban đầu và ứng suất tính toán hay ứng suất bền của sợi cấp nhưng lại không phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường và chùng ứng suất cơ bản của cấp. Bảng 6 là kết quả tính toán tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cấp theo TCVN 5574:2012 và ACI 318-08 ứng với giá trị ứng suất ban đầu khác nhau.

Bảng 6. Toán tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cáp theo TCVN 5574:2012 và ACI 318-08 ứng với các giá trị σ_{sp}/R_s và f_{si}/f_{pu} khác nhau

Theo TCVN 5574 :2012		Theo ACI 318-08		ứng với $t_s = 7$ ngày
$\sigma_{sp}/R_s = 0,7$	$\sigma_{sp}/R_s = 0,8$	$f_{si}/f_{pu} = 0,7$	$f_{si}/f_{pu} = 0,8$	
$\Delta P_{ch} = 893$ daN	$\Delta P_{ch} = 1376,2$ daN	$\Delta P_{RE} = 223,4$ daN	$\Delta P_{RE} = 381,2$ daN	

Theo AS3600-2009 và BS EN 1992, kết quả phụ thuộc vào chùng ứng suất cơ bản của cáp, ngoài ra theo AS3600-2009, còn phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường. Bảng 7 là kết quả theo AS3600-2009 ứng với $t_0 = 180$ ngày, và các giá trị khác nhau của R_b , $T^{\circ}C$, tỷ số σ_{pi}/f_p .

Bảng 7. Tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cáp theo AS3600-2009 ứng với các giá trị R_b , T và σ_{pi}/f_p khác nhau (lấy $t_0 = 180$ ngày)

$R_b = 2,5\%$; $T = 20^{\circ}C$; $\sigma_{pi}/f_p = 0,7$	$R_b = 2,5\%$; $T = 25^{\circ}C$; $\sigma_{pi}/f_p = 0,7$	$R_b = 3,5\%$; $T = 20^{\circ}C$; $\sigma_{pi}/f_p = 0,8$	$R_b = 3,5\%$; $T = 25^{\circ}C$; $\sigma_{pi}/f_p = 0,8$
$\Delta P_{re} = 407,5$ daN	$\Delta P_{re} = 509,4$ daN	$\Delta P_{re} = 987,3$ daN	$\Delta P_{re} = 1234,1$ daN

Bảng 8 là kết quả tính toán theo BS EN 1992 ứng với $t_0 = 180$ ngày và các giá trị khác nhau của ρ , σ_{pi}/f_{ck} .

Bảng 8. Tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cáp theo BS EN 1992 ứng với các giá trị ρ và σ_{pi}/f_{ck} khác nhau (lấy $t_0 = 180$ ngày)

$\rho = 2,5\%$; $\sigma_{pi}/f_{ck} = 0,7$	$\rho = 3,5\%$; $\sigma_{pi}/f_{ck} = 0,7$	$\rho = 2,5\%$; $\sigma_{pi}/f_{ck} = 0,8$	$\rho = 3,5\%$; $\sigma_{pi}/f_{ck} = 0,8$
$\Delta P_r = 158,4$ daN	$\Delta P_r = 221,7$ daN	$\Delta P_r = 378,3$ daN	$\Delta P_r = 539,6$ daN

5. Một số kiến nghị

Trên cơ sở lý thuyết, ví dụ tính toán và kết quả so sánh trên, tác giả kiến nghị cần bổ sung phần tính toán tổn hao ứng suất do co ngắn đàn hồi của bê tông đối với TCVN 5574:2012.

Kết quả tính toán tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông theo ACI 318-08 ứng với thời gian bảo dưỡng bê tông $t_s = 1$ ngày cho kết quả tương đối sát với AS3600-2009 và BS EN 1992. Theo TCVN 5574:2012 cho kết quả khác biệt và nhỏ hơn nhiều so với với 3 tiêu chuẩn nước ngoài. Vì vậy, kiến nghị tính toán tổn hao ứng suất do co ngót của bê tông nên áp dụng các tiêu chuẩn nước ngoài.

Kết quả tính toán tổn hao ứng suất do từ biến của bê tông theo ACI 318-08 và TCVN 5574:2012 có ít biến động trong khi theo AS3600-2009 và BS EN 1992 có nhiều biến động phụ thuộc vào thời gian chất tải t_0 và kết quả cũng khác biệt nhau ứng với cùng giá trị t_0 . Thời điểm chất tải t_0 trên thực tế cũng rất khó xác định. Vì vậy, cần có quy định cụ thể trong các bài toán thiết kế về thời điểm chất tải t_0 khi áp dụng AS3600-2009 và BS EN 1992.

Kết quả tính toán tổn hao ứng do chùng ứng suất của cáp theo ACI và ENBS nhỏ hơn nhiều so với AS3600 và TCVN 5574:2012. Do đó khi áp dụng ACI hoặc ENBS để tính toán tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cáp phải lưu ý xem xét tính phù hợp về trình độ, công nghệ thi công, đặc tính vật liệu sử dụng, khí hậu, môi trường xung quanh công trình với các yêu cầu của nơi áp dụng tiêu chuẩn.

Việc sử dụng tiêu chuẩn AS3600-2009 có các công thức khá rõ ràng. Phần tính toán tổn hao ứng suất dài hạn theo AS3600 cũng dễ áp dụng vì các số liệu về môi trường khí hậu đặc trưng của Việt Nam đủ điều kiện để áp dụng tiêu chuẩn. Ngoài ra, phần tính toán tổn hao ứng suất do chùng ứng suất của cáp theo AS3600-2009 có đề cập đến cả 4 yếu tố: nhiệt độ môi trường, thời gian tính toán tổn hao ứng suất, chùng ứng suất cơ bản và tỷ số giữa ứng suất ban đầu và ứng suất bền của cáp. Vì vậy, theo tác giả, việc lựa chọn tiêu chuẩn AS3600-2009 để tính toán tổn hao ứng suất dài hạn là tương đối phù hợp với điều kiện Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. TCVN 5574:2012. Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép. Tiêu chuẩn thiết kế.
2. AS3600-2009 Concrete Structures. Australian Standard.

3. AS3600-2001 Concrete Structures. Australian Standard.
4. AS 3600 Supp1-1994 - Úc.
5. Eurocode 2: Design of concrete structures. BS EN 1992-1-1:2004.
6. Prestressed Concrete Design - Second edition - M.K.Hurst MSc, DIC, MICE, MIStruct.E.
7. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary.
8. Design of Prestressed Concrete Structures - T.Lin & H.Buns.
9. Estimating Prestress losses. Concrete International/june 1979 - Paul Zia, H. Kent Preston, Norman L. Scott, and Edwin B. Workman.
10. Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density. Journal of American Concrete Institute/december 1960 - Adrian Pauw.
11. 12. BS 4447-1973. Specification for The performance of prestressing anchorages for post-tensioned construction
12. BS8110-1997 part 1. Code of practice for design and construction.