

# KHẢ NĂNG CHỊU LỰC CỦA SÀN BÊ TÔNG ỨNG LỰC TRƯỚC SỬ DỤNG CẤP KHÔNG KẾT DÍNH VÀ KẾT DÍNH THEO CÁC TIÊU CHUẨN VÀ MÔ HÌNH

Phạm Phú Anh Huy

Khoa Xây dựng – Đại học Duy Tân

## 1. Đặt vấn đề

Bài viết giới thiệu cách tính ứng suất trong thép ứng lực trước theo các tiêu chuẩn ACI318-08, CSA-A32-94, EC2, TCVN5574-2012 và mô hình Naaman.

## 2. Ứng suất trong thép ULT:

Tỷ lệ tăng ứng suất trong thép ULT của cấu kiện bê tông ULT dưới tác dụng của tải trọng phụ thuộc vào độ lớn của lực dính giữa thép cường độ cao và bê tông. Trong trường hợp dính kết, như cấu kiện căng trước hay căng sau bơm vữa, ứng suất trong thép được tính toán theo lý thuyết đàn hồi cho tiết diện quy đổi. Dưới tác dụng của tải trọng sử dụng, sự tăng ứng suất trong thép ULT dính kết được xác định theo lý thuyết đàn hồi là:

$$\Delta f_{ps} = n.f_c = n.\left(\frac{M.y}{I}\right) \quad (1)$$

I: mômen quán tính của tiết diện quy đổi.

y: khoảng cách từ trọng tâm tiết diện quy đổi đến trọng tâm thép ULT.

$$n = \frac{E_{ps}}{E_c}$$

Trong trường hợp dầm sử dụng thép ULT không dính kết, thép ULT sẽ tự do giãn dài một cách độc lập trong suốt chiều dài của nó dưới tác dụng của tải trọng ngoài trên dầm. Sự tăng biến dạng trong thép sẽ phụ thuộc vào biến dạng trung bình trong bê tông tại vị trí thép. Tổng độ giãn dài của thép bê tông tại vị trí trọng tâm cốt thép là:

$$\delta L = \int_0^L \left( \frac{M \cdot y}{E_c \cdot I} \right) dx \quad (2)$$

Trong đó: L là tổng chiều dài của cáp.

M là mômen tại tiết diện do tải trọng gây ra.

$$\text{Biến dạng trung bình của bê tông là: } \frac{\delta L}{L} = \frac{y}{E_c / L} \cdot \int_0^L M \cdot dx \quad (3)$$

Ứng suất trung bình trong cốt thép là:

$$f_s = \left( \frac{E_{ps}}{E_s} \right) \cdot \left( \frac{y}{I \cdot L} \right) \int_0^L M \cdot dx = \left( \frac{n \cdot y}{I \cdot L} \right) \cdot \int_0^L M \cdot dx \quad (4)$$

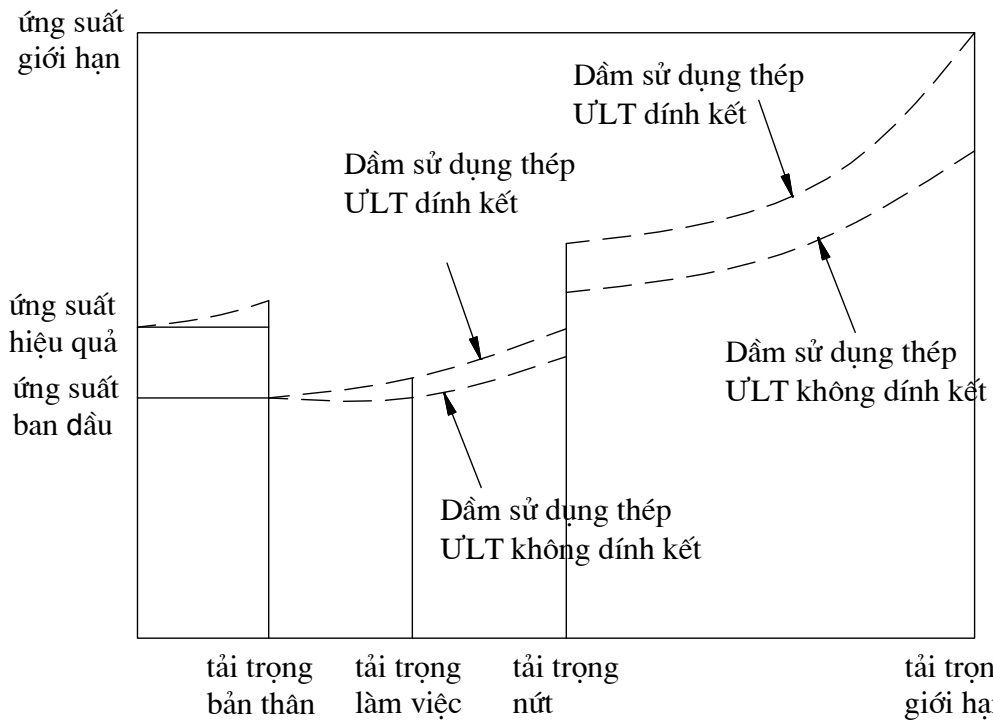
Gọi A là diện tích biểu đồ mômen uốn do tải trọng gây ra:

$$A = \int_0^L M \cdot dx \quad (5)$$

$$\text{Ta có: } f_{ps} = \frac{n \cdot y \cdot A}{I \cdot L} \quad (6)$$

$$\text{Trường hợp dầm chịu tải trọng phân bố đều w: } A = \frac{w \cdot L^3}{12} \quad (7)$$

$$\text{Ứng suất trong thép không kết dính là: } \Delta f_{ps} = \frac{n \cdot y \cdot w_d \cdot L^2}{12 \cdot I} \quad (8)$$



**Hình 1: Quan hệ giữa ứng suất và tải trọng khi sử dụng thép UHT dính kết và không dính kết**

Sự thay đổi ứng suất trong thép UHT ở dầm tương ứng với các giai đoạn chịu tải trọng khác nhau được thể hiện trên hình vẽ 2.1. Sau khi vết nứt phát triển, ứng suất trong thép phát triển nhanh đối với cả dầm sử dụng thép UHT dính kết và không dính kết. Vì thép không đạt đến cường độ của nó trong trường hợp sử dụng thép UHT không kết dính nên tải trọng phá hoại của dầm sẽ nhỏ hơn so với khi sử dụng thép UHT dính kết.

Trong giai đoạn sau khi nứt, trong dầm sử dụng UHT dính kết đặc trưng bởi các vết nứt nhỏ được phân bố ở những vùng có mômen lớn, trong dầm sử dụng thép UHT không dính kết chỉ phát triển một vài vết nứt ở vị trí những tiết diện yếu hơn. Bề rộng vết nứt trong dầm sử dụng thép UHT không dính kết là rộng hơn so với trường hợp sử dụng thép UHT dính kết tương ứng. Nói chung, dầm sử dụng thép UHT dính kết được ưa dùng hơn bởi cường độ chịu uốn cao hơn và đặc tính biến dạng có thể dự đoán dễ dàng hơn.

**Sự phát triển các công thức tính toán ứng suất trong cáp không kết dính ở trạng thái giới hạn:**

Tiêu chuẩn ACI318-63 đã đưa ra phương trình xác định ứng suất  $f_{ps}$  trong cáp ứng lực trước không kết dính:

$$f_{ps} = f_{pe} + 1500(\text{psi}) \quad (9)$$

$f_{pe}$ : ứng suất hiệu quả trong cáp ULT không dính bám (sau khi trừ đi tất các các hao ứng suất).

Qua các điều tra khảo sát của Warwaruk [1962] đã chỉ ra rằng phương trình (2.9) chỉ đúng với các thí nghiệm tương ứng lúc đó. Dựa trên các kết quả thí nghiệm Warwaruk đã chỉ ra rằng sự có mặt của của cốt thép thường cải thiện sự phân phối các vết nứt và làm giảm độ võng của cầu kiện và cầu kiện không phá hoại đột ngột dưới các vết nứt ban đầu. Warwaruk cũng đã chỉ ra rằng giá trị của  $\Delta f_{ps}$  (ứng suất tăng thêm trong cáp ULT ở trạng thái giới hạn) giảm khi tỉ số  $\rho_p / f'_c$  tăng, và dựa trên đó Warkaruk đã đề xuất phương trình dự đoán ứng suất trong cáp không kết dính:

$$f_{ps} = f_{pe} + (30000 - \frac{\rho_p}{f'_c} \cdot 10^{10})(\text{psi}) \text{ khi } f_{pe} \leq 0,6 \cdot f_{pu} \quad (10)$$

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot d_p} : \text{hàm lượng cốt thép ULT.}$$

$f'_c$ : cường độ chịu nén của mẫu lăng trụ.

Mattock [1971] đã chỉ ra rằng việc dự đoán  $f_{ps}$  theo phương trình (10) đúng khi tỉ số  $\rho_p / f'_c$  bé, mặc dù nó đã kết hợp những ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép thường và ứng suất nén trong bê tông. Tuy nhiên phương trình (10) là phương trình đầu tiên có kể đến các yếu tố ảnh hưởng đến ứng suất trong cáp. Từ các kết quả thí nghiệm Mattock đã đưa ra phương trình dự đoán  $f_{ps}$  như sau:

$$f_{ps} = f_{pe} + (10000 + \frac{1,4 \cdot f'_c}{100 \cdot \rho_p}) \text{psi} \quad (11)$$

Một phương trình sửa đổi từ phương trình (11) đã được thông qua bởi tiêu chuẩn ACI trong cả hai phiên bản ACI318-71 và ACI318-77 như sau:

$$f_{ps} = f_{pe} + (10000 + \frac{f'_c}{100 \cdot \rho_p})(psi) \quad (12)$$

$$\text{Với: } f_{ps} \leq f_{pe} + 60000(psi); f_{ps} \leq f_{py} \text{ và } f_{ps} \leq 0,6 \cdot f_{pu} \quad (13)$$

Các nghiên cứu bởi Mojtahedi và Gamble [1978] cho thấy dự đoán của các giá trị của  $f_{ps}$  từ phương trình (12) ước tính quá cao các giá trị thử nghiệm, với hàm lượng thép ULT  $\rho_p$  thấp và  $l/d_p$  lớn hơn 40; trong khi đó giá trị dự đoán của  $f_{pr}$  được lấy dựa vào các giá trị thí nghiệm với tỷ lệ  $l/d_p$  bé. Do đó, phương trình (12) tiếp tục được ACI thay đổi (ACI-318-83) cho tỷ số  $l/d_p$  lớn hơn 35:

$$f_{ps} = f_{pe} + (10000 + \frac{f'_c}{\mu \cdot \rho_p})psi \quad (14)$$

Với  $\mu = 100$  với  $l/d_p \leq 35$ ;  $\mu = 300$  với  $l/d_p > 35$ ; giới hạn  $f_{ps}$  như phương trình (14).

Phương trình (14) được các tiêu chuẩn ACI318-89 và ACI318-95 thừa nhận. Phương trình (14) có sự thay đổi khá lớn cho các cấu kiện liên tục nhiều nhịp phụ thuộc vào vị trí của các mặt cắt,  $\rho_p$ , các thành phần chịu nén. Hơn thế nữa phương trình (14) thì không liên tục khi  $l/d_p = 35$  (Harajli[1990]), và không xét đến ảnh hưởng của thép thường, loại cáp, biến dạng cực hạn trong bê tông, loại và cách chất tải trên kết cấu.

Thông qua các kiến nghị của tiêu chuẩn Mỹ ACI về việc dự đoán ứng suất trong cáp không kết dính, phát hiện ra các thiếu sót khi tiêu chuẩn ACI đề xuất công thức dự đoán ứng suất trong cáp không kết dính, tiêu chuẩn CSA A23.3-M84 đưa ra một các dự đoán khác dựa trên lý thuyết của Pannell[1969] và được phát triển bởi Loov[1987]:

$$f_{ps} = f_{pe} + 5000 \cdot \frac{(d_p - c_y)}{l_e} \leq f_{py} (MPa) \quad (17)$$

$l_e$ : chiều dài cáp giữa các neo.

$c_y$ : chiều cao trục trung hòa.

Hằng số 5000 được chọn dựa trên các thí nghiệm với các cấu kiện có gối tựa đơn giản chịu 1 lực tập trung. Sau đó người ta nhận ra rằng với 2 hoặc 4 tải trọng tập trung thì sẽ có sự khác biệt, do vậy CSA.A23.3.94 đã đề xuất thay đổi trong công thức (17) và được CSA.A23.3-94 thừa nhận:

$$f_{ps} = f_{pe} + 8000 \cdot \frac{(d_p - c_y)}{l_e} \leq f_{py} \text{ (MPa)} \quad (18)$$

$c_y$  được xác định bởi:

$$c_y = \frac{\phi_p \cdot A_p \cdot f_{py} + \phi_s \cdot A_s \cdot f_y - \phi_s \cdot A'_s \cdot f'_y - \phi_c \cdot \alpha_1 \cdot f'_c \cdot h_f \cdot (b - b_w)}{\phi_c \cdot \alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot f'_c \cdot b_w} \quad (19)$$

$\alpha_1$ : là tỷ số giữa ứng suất trung bình trong vùng bê tông chịu nén với cường độ chịu nén mẫu lăng trụ.

$\beta_1$ : là hệ số kể đến chiều cao của vùng nén.

$\phi_p, \phi_s, \phi_c$ : là hệ số sức kháng của vật liệu cho cốt thép ứng lực trước, cốt thép thường và bê tông.

Mặc dù công thức (18) dự đoán được ứng suất trong cáp không kết dính  $f_{ps}$  tốt hơn các công thức (17) nhưng cả 2 công thức này chỉ dựa trên các dữ liệu thí nghiệm cho dầm đơn giản 1 nhịp. Naaman và Alkhairi [1991], Allouch [1996] và cộng sự đã chỉ ra rằng nếu sử dụng các biểu thức của tiêu chuẩn CSA thì dẫn đến có thể dự đoán giá trị của  $f_{ps}$  âm cho các trường hợp có trục trung hòa nằm sâu bên trong. Các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng nếu sử dụng công thức theo đúng tiêu chuẩn thì không hợp lý cho những cấu kiện nhiều nhịp với tải trọng tác dụng lên nhiều nhịp. Hơn thế nữa các phương trình trên cũng có thể cho các giá trị khác nhau khi loại cáp khác nhau và biến dạng cực hạn trong bê tông khác nhau.

Dựa trên các phương trình dự đoán được điều tra khảo sát, kể các các phương trình trong tiêu chuẩn Bắc Mỹ và Châu Âu. Naaman và Alkhairi đã chỉ ra rằng hầu hết các phương trình rất bảo thủ trong việc dự đoán  $f_{ps}$  trong đó thiếu các yếu tố

như ứng suất trong cáp. Sử dụng một cách tiếp cận bằng biến dạng như đề xuất của Baker[1949], phương trình dự đoán  $f_{ps}$  :

$$f_{ps} = f_{pe} + \Omega_u \cdot E_p \cdot \varepsilon_{cv} \cdot \left(\frac{d_p}{c} - 1\right) \cdot \left(\frac{L_1}{L}\right) \leq 0,94 f_{py} \quad (22)$$

Và phương trình cân bằng:

$$A_p \cdot f_{ps} + A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f'_s = \alpha_1 \cdot f'_c \cdot (b - b_w) \cdot h_f + \alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot f'_c \cdot b_w \cdot c \quad (23)$$

Trong đó  $\Omega_u$  nhân tố giảm lực dính, được nhận bởi  $1,5/(l/d_p)$  cho tải tập trung, và lấy bằng  $3,0/(l/l_p)$  cho 3 điểm đặt tải hoặc tải trọng phân bố đều.

$L_1$  là chiều dài nhịp có tải hoặc tổng các nhịp có tải bị ảnh hưởng bởi cáp.

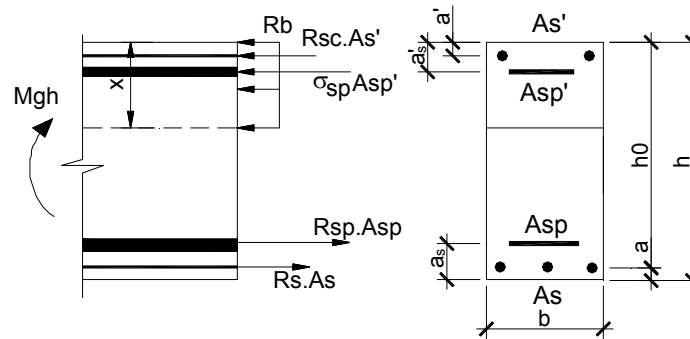
### **Khả năng chịu lực của cấu kiện chịu uốn bê tông UŁT theo các tiêu chuẩn:**

#### **a. Tiêu chuẩn Việt Nam TCXDVN356-2005:**

##### **Trường hợp cáp kết dính:**

Theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN5574-2012 xem thép UŁT như một thành phần chịu lực, cách tính tương tự như tính toán cấu kiện bê tông cốt thép thường chỉ khác ở các công thức cơ bản có thêm thành phần của cốt thép ứng suất trước.

Sơ đồ ứng suất:



**Hình 2: Sơ đồ ứng suất cấu kiện chịu uốn UŁT có tiết diện chữ nhật**

$$R_b \cdot b \cdot x = \gamma_{s6} \cdot R_{sp} \cdot A_{sp} + R_s \cdot A_s - \sigma'_{sp1} \cdot A'_{sp} - R_{sc} \cdot A'_s \quad (24)$$

$$M \leq R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5 \cdot x) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a') + \sigma'_{sp1} \cdot A'_{sp} \cdot (h_0 - a'_s) \quad (25)$$

Trong đó:

$R_b$  : cường độ chịu nén tính toán của bê tông.

$R_s$  : cường độ chịu kéo tính toán của thép chịu kéo.

$R_{sc}$  : cường độ chịu nén tính toán của thép chịu nén.

$A_s$  : diện tích của thép chịu kéo.

$A_s'$  : diện tích của thép chịu nén.

$R_{sp}$  : cường độ chịu kéo tính toán của thép UŁT trong vùng kéo.

$\sigma_{sp}$  : ứng suất của thép UŁT trong vùng nén.

$A_{sp}$  : diện tích của thép UŁT trong vùng kéo.

$A_{sp}'$  : diện tích của thép UŁT trong vùng nén.

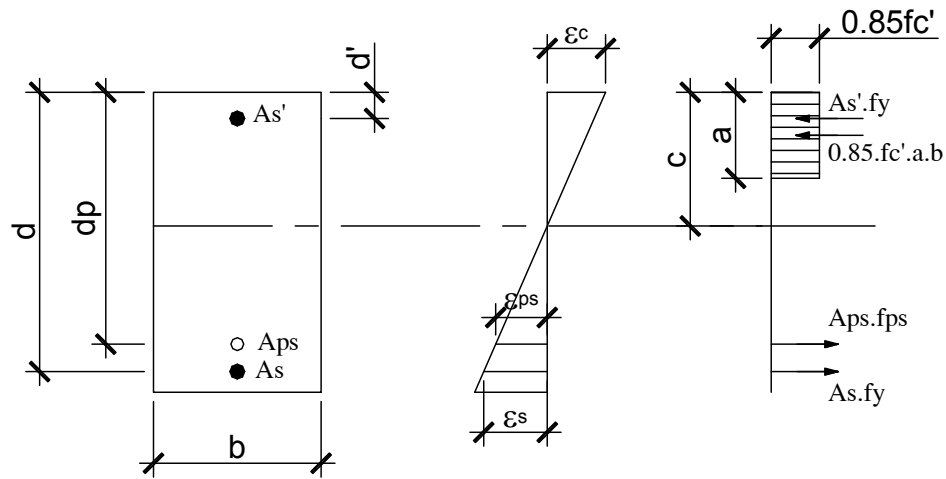
Khả năng chịu uốn của sàn bê tông UŁT chính là vế phải của phương trình (2.25).

**Trường hợp cáp không kết dính:** Hiện nay tiêu chuẩn TCVN5574-0212 chưa đưa ra cụ thể cho trường hợp cáp kết dính.

**b. Tiêu chuẩn Mỹ ACI-318-05:**

**Trường hợp cáp kết dính:**

Sơ đồ ứng suất được thể hiện bởi hình vẽ 3:



**Hình 3: biểu đồ ứng suất – biến dạng trên mặt cắt ngang**

Phương trình cân bằng lực:  $A_{ps} \cdot f_{ps} + A_s \cdot f_y = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a + A_s' \cdot f_y$  (26)

Phương trình cân bằng mômen:

$$M_u = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' \cdot f_y \cdot \left(\frac{a}{2} - d'\right)$$
 (27)



$$\text{Với cáp kết dính thì: } f_{ps} = f_{pu} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[ \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f_c} + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega - \omega') \right] \right) \quad (28)$$

Quy trình tính toán khả năng chịu uốn của dầm bê tông ULT cũng tương tự như dầm bê tông cốt thép thông thường với sự khác biệt trong việc xác định ứng suất trong thép ULT ở trạng thái giới hạn. Các tải trọng được xét đến là tải trọng tính toán và tương ứng là các tổ hợp tải trọng quy định trong từng tiêu chuẩn thiết kế.

Hợp lực của bê tông vùng nén:  $C = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a$

$$T = T_p + T_s = A_{ps} \cdot f_{ps} + A_s \cdot f_y \quad (29)$$

Trong đó  $A_s$ ,  $A_{ps}$  là diện tích cốt thép thường và thép ULT trong vùng kéo.

Điều kiện đảm bảo khả năng chịu lực của cấu kiện là:

$$M \leq M_u = \phi \cdot M_n = \phi \cdot [f_s \cdot A_{ps} \cdot (d_p - 0,5 \cdot a) + f_y \cdot A_s \cdot (d - 0,5 \cdot a)] \quad (30)$$

Hệ số giảm độ bền  $\phi$  của cấu kiện chịu uốn được xác định:

Khi biến dạng của cốt thép chịu kéo  $\varepsilon_t \geq 0,005$  và  $c/d_t \leq 0,375$  (tiết diện thuộc trường hợp phá hoại dẻo):  $\phi = 0,9$

$c$ : khoảng cách từ mép chịu nén của tiết diện đến trục trung hòa.

$d_t$ : khoảng cách từ mép chịu nén của tiết diện đến trọng tâm của lớp cốt thép chịu kéo ngoài cùng.

Hầu hết các cấu kiện chịu uốn được thiết kế theo trường hợp này.

Khi biến dạng của cốt thép chịu kéo  $0,004 < \varepsilon_t < 0,005$  và  $0,375 < c/d_t \leq 0,429$  (trạng thái ứng suất chuyển tiếp):  $\phi = 0,23 + 0,25 \cdot (c/d_t)$

Quy trình tính toán  $M_u$  được tiến hành như sau:

Bước 1: Tính toán mômen do tải trọng ngoài gây ra  $M$ .

Bước 2: Tính  $T_p$ ,  $T_s$  (bước đầu có thể chọn  $T_s=0$ )

$$\text{Bước 3: Tính } a = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps} + A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \quad (31)$$

Bước 4: Tính  $M_u$

Bước 5: Nếu  $M > M_u$  bố trí thép thường và lặp lại bước 2.

Ứng suất trong thép ULT gần đạt đến cường độ giới hạn của nó tại điểm phá hoại của cầu kiện chịu uốn và được tính theo công thức:

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \left[ \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f_c'} + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega - \omega') \right] \right\} \quad (2.32)$$

$\gamma_p$  : phụ thuộc vào loại thép ULT

$$\gamma_p = 0,55 \text{ cho thép thanh với } f_{py} / f_{pu} \geq 0,8$$

$$\gamma_p = 0,40 \text{ cho sợi và cáp với } f_{py} / f_{pu} \geq 0,85$$

$$\gamma_p = 0,28 \text{ cho sợi và cáp với } f_{py} / f_{pu} \geq 0,9$$

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b.d}; \rho = \frac{A_s}{b.d}, \rho' = \frac{A_s'}{b.d} \quad (33)$$

$$\omega = \frac{\rho \cdot f_y}{f_c'}; \omega' = \frac{\rho' \cdot f_y}{f_c'} \quad (34)$$

Với  $A_s'$  là diện tích cốt thép thường trong vùng nén.

Nếu trong công thức (2.20) có xét đến cốt thép chịu nén thì giá trị

$\left[ \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f_c'} + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega - \omega') \right]$  lấy không nhỏ hơn 0,17 và không lớn hơn 0,15 $d_p$ .

Giá trị  $\beta_1$  được xác định như sau:

$$\beta_1 = 0,85 \text{ khi } f_c' \leq 30MPa$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,008 \cdot (f_c' - 30) \geq 0,65 \text{ khi } f_c' > 30MPa$$

Theo tiêu chuẩn ACI, chỉ số của thép  $\omega_p$  xấp xỉ với giá trị giới hạn để đảm bảo rằng ứng suất của thép ULT nằm trong giới hạn chảy của nó

$$\omega_p \leq 0,32 \cdot \beta_1 \quad (35)$$

Trong trường hợp cả thép ULT  $A_{ps}$  và cốt thép thường  $A_s, A_s'$  cùng được sử dụng, tỷ lệ thép giới hạn là:

$$\omega_p + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega - \omega') \leq 0,36 \cdot \beta_1 \quad (36)$$

Ngoài ra để đảm bảo khả năng làm việc của cấu kiện ngay sau khi xuất hiện vết nứt, tiêu chuẩn cũng yêu cầu hàm lượng cốt thép tối thiểu của thép U<sub>L</sub>T, thép thường phải thỏa mãn điều kiện:  $M_u \geq 1,2.M_{cr}$

### Trường hợp sử dụng cáp không kết dính:

Khả năng chịu lực cũng được xác định như công thức trên chỉ khác  $f_{ps}$  được xác định như sau:

Khi  $f_{pe} \geq 0,5.f_{pu}$  giá trị  $f_{ps}$  được xác định:

+ Khi không có thép chịu nén ( $A'_s = 0$ ):

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left[ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \left( \frac{A_{ps} \cdot f_{pu} + A_s \cdot f_y}{b \cdot d_p \cdot f'_c} \right) \right] \quad (37)$$

+ Khi có thép chịu nén ( $A'_s \neq 0$ ):

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left[ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \left( \frac{A_{ps} \cdot f_{pu} + A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f_y}{b \cdot d_p \cdot f'_c} \right) \right] \quad (38)$$

Trong đó yêu cầu:  $\frac{A_{ps} \cdot f_{pu} + A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f_y}{b \cdot d_p \cdot f'_c} \geq 0,17$  và  $d' \leq 0,15 \cdot d_p$  (39)

$\gamma_p$ : hệ số phụ thuộc vào thép U<sub>L</sub>T, được lấy theo bảng 1

**Bảng 1: Hệ số phụ thuộc vào thép U<sub>L</sub>T**

$f_{py} / f_{pu}$	$\geq 0,8 \div 0,85$	$\geq 0,85 \div 0,9$	$\geq 0,9 \div 1,0$
$\gamma_p$	0,55	0,40	0,28

$\beta_1$ : hệ số phụ thuộc vào cường độ chịu nén của bê tông, được lấy theo bảng 2

**Bảng 2: Hệ số phụ thuộc vào cường độ chịu nén của bê tông**

$f'_c$	$\leq 28MPa$	34MPa	41MPa	48MPa	$\geq 55MPa$
$\beta_1$	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65

Tính toán chính xác cường độ giới hạn của sản phẩm thép U<sub>L</sub>T không dính kết là khó khăn hơn nhiều so với dầm sử dụng thép U<sub>L</sub>T dính kết vì ứng suất trong thép tại lúc phá hoại sản phẩm không thể tính toán một cách chính xác nhất, Cũng không có đủ số liệu về cường độ giới hạn của sản phẩm thép U<sub>L</sub>T dính kết để thiết lập

một phương pháp hoàn tính toán hoàn toàn tin cậy. Tuy vậy, cường độ của sàn sử dụng thép U<sub>L</sub>T không dính kết thường nhỏ hơn so với sàn sử dụng thép U<sub>L</sub>T dính kết, vì biến dạng trong thép U<sub>L</sub>T là đều trong suốt chiều dài của nó và biến dạng tại tiết diện nguy hiểm là giảm đi, ứng suất trong thép U<sub>L</sub>T sẽ tăng chậm cho nên khi bê tông đã phá hoại ứng suất trong thép thường vẫn nhỏ hơn nhiều cường độ giới hạn của nó. Khi chưa có vết nứt xuất hiện trên sàn, ứng suất trong thép được tính toán thông thường như đã trình bày ở trên, khi sàn bị nứt hay đạt tới biến dạng dẻo, ứng suất không thể tính toán một cách thuận lợi. Tuy vậy có thể tính toán ứng suất trong thép khi sàn phá hoại theo công thức chung sau:

$$f_{ps} = f_{pe} + \Delta f_s \quad (40)$$

Trong đó  $f_{pe}$ : ứng suất hiệu quả trong thép U<sub>L</sub>T.

$\Delta f_{ps}$ : ứng suất tăng thêm trong thép U<sub>L</sub>T do tải trọng phá hoại.

Tiêu chuẩn ACI318-05 đưa ra công thức tính toán  $f_{ps}$  như sau:

Khi tỷ lệ nhịp/chiều cao cấu kiện không lớn hơn 35:

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f'_c}{100 \cdot \rho_p} \text{ nhưng không lớn hơn } f_{py} \text{ hoặc } f_{pe} + 420 \quad (41)$$

Khi tỷ lệ nhịp/chiều cao cấu kiện lớn hơn 35:

$$f_{ps} = f_{pe} + 70 + \frac{f'_c}{300 \cdot \rho_p} \text{ nhưng không lớn hơn } f_{py} \text{ hoặc } f_{pe} + 200 \quad (42)$$

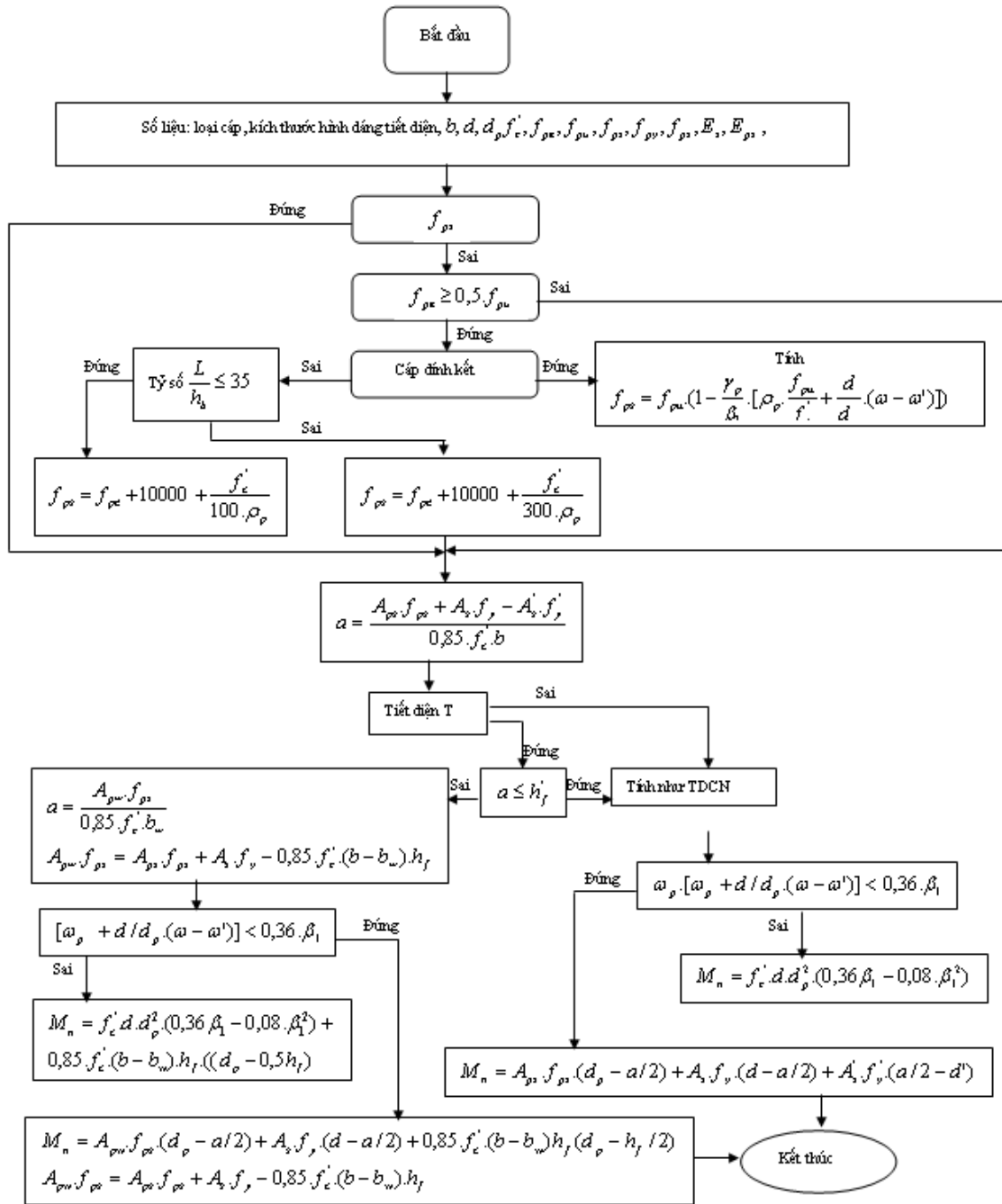
Sau khi tính toán  $f_{ps}$  và cánh tay đòn tương ứng, ta xác định mômen giới hạn của sàn như trường hợp dầm sử dụng thép U<sub>L</sub>T dính kết.

Để hạn chế vết nứt và tăng cường độ cho sàn U<sub>L</sub>T, tiêu chuẩn ACI318-05 quy định diện tích tối thiểu của thép thường là:  $A_s = \rho_{\min} \cdot A$

A: tiết diện.

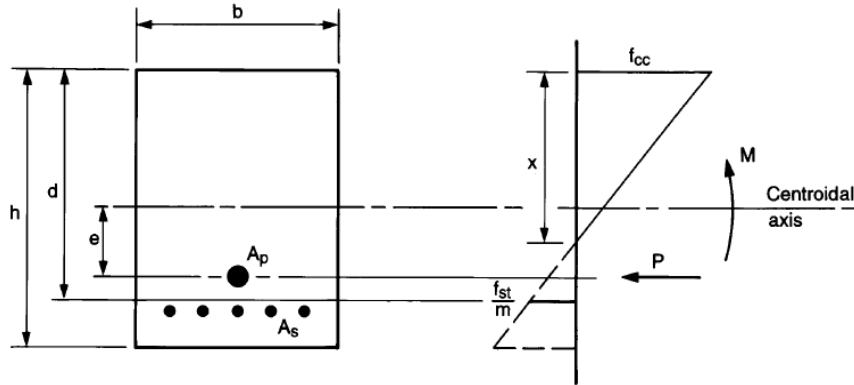
$\rho_{\min}$ : hàm lượng cốt thép thường tối thiểu phụ thuộc vào nhóm thép sử dụng nhưng không nhỏ hơn 0,14%.

Lưu ý thuật toán tính toán khả năng chịu lực của sàn bê tông U<sub>L</sub>T sử dụng cáp dính kết và không dính kết được mô tả thông qua sơ đồ thuật toán sau:



**c. Tiêu chuẩn EC-2:**

**Trường hợp cáp kết dính:**



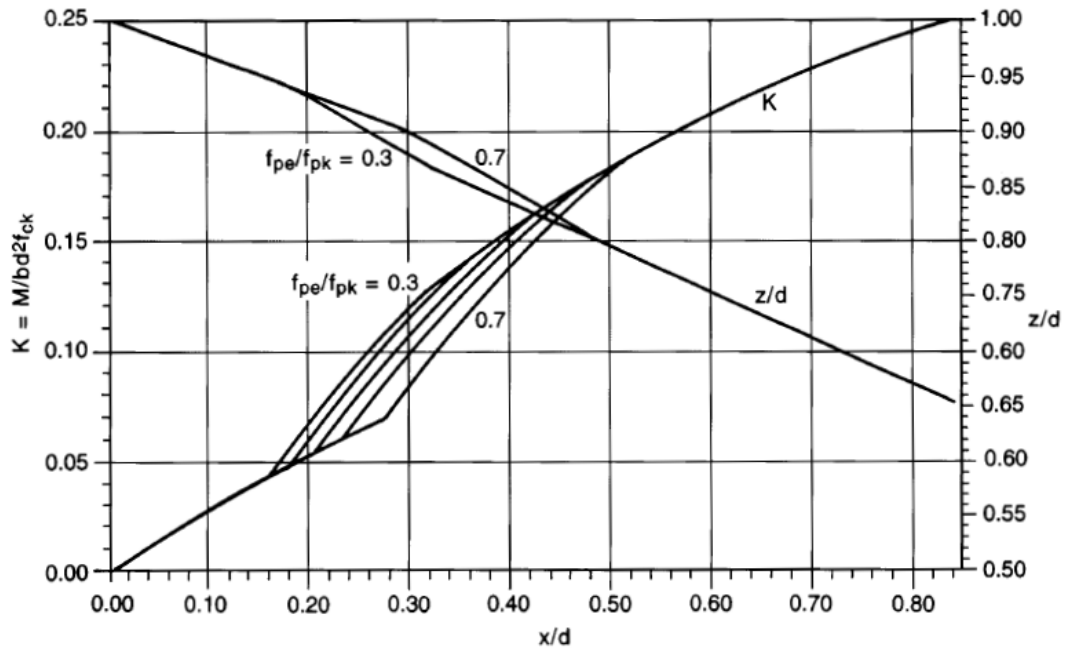
**Hình 4: Sơ đồ biến dạng theo tiêu chuẩn EC-2**

Bài toán thiết kế theo tiêu chuẩn EC-2 đối với tiết diện chữ nhật được thể hiện qua các bước sau:

- Xác định tỉ số trong cáp ULT sau khi đã kể đến tất cả các hao ứng suất  $f_{pe} / f_{pk}$
- Tính  $K = M / b.d^2 . f_{ck}$  (43)
- Tính giá trị giới hạn của  $x/d$  từ bảng 2.3 với các giá trị thích hợp  $f_{ck}$  và tỉ lệ % mômen phân phối lại (lấy bằng 0 cho các thành phần bê tông bị nén trước). Từ đó tính được  $K_{lim}$  với các giá trị thích hợp của  $f_{pe} / f_{pk}$  theo hình 5

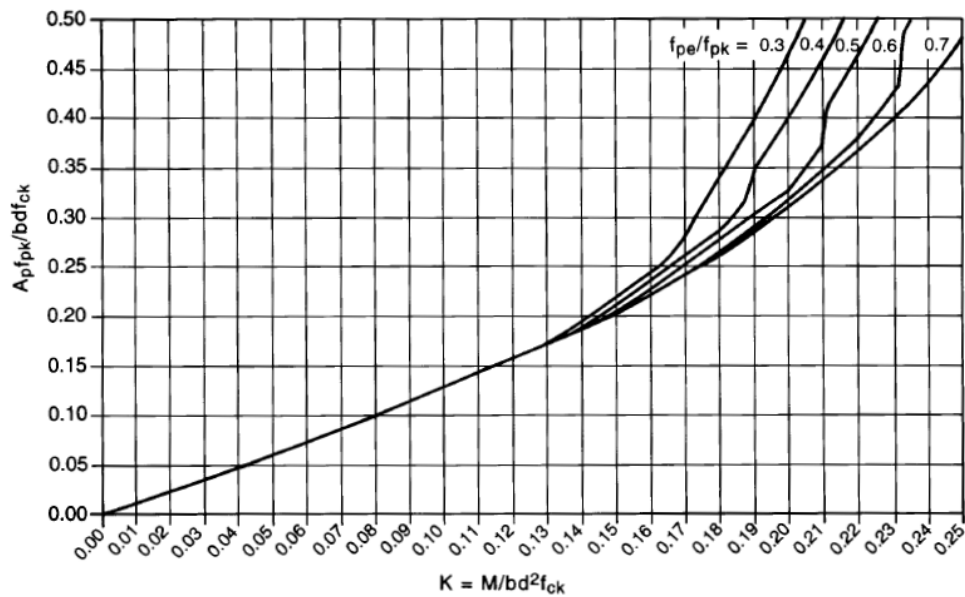
**Bảng 3: Bảng xác định tỷ số  $x/d$  theo EC-2**

Phần trăm phân phối lại mômen (%)	0	5	10	15	20	25	30
$f_{ck} \leq 35MPa$	0,45	0,41	0,37	0,33	0,29	0,25	0,21
$f_{ck} \geq 40MPa$	0,35	0,31	0,27	0,23	0,19	0,15	0,11



**Hình 5: Chiều cao trục trung hòa và các tỷ số cho cấu kiện bê tông ULT tiết diện chữ nhật với cáp dịnh kết**

- Nếu  $K = K_{lim}$  tính  $A_p \cdot f_{pk} / b \cdot d \cdot f_{ck}$  tương ứng với các giá trị thích hợp của  $f_{pe} / f_{pk}$  theo hình



**Hình 6: Biểu đồ thiết kế cho tiết diện hình chữ nhật ULT với cáp kết dịnh**

- Tính diện tích cáp ULT  $A_p$
- Nếu diện tích  $A_p$  này không đảm bảo yêu cầu cho trạng thái giới hạn cuối cùng. Cốt thép thường có thể được xem xét trong tính toán với diện tích quy đổi thành cáp ULT tương đương  $A_s \cdot f_{yk} / f_{pk}$
- Nếu  $K > K_{lim}$  thì cần xác định thêm cốt thép thường chịu nén, diện tích cốt thép thường chịu nén được tính toán:

$$A'_s = \frac{M - K_{lim} \cdot b \cdot d^2 \cdot f_{ck}}{0.87 \cdot f_{yk} \cdot (d - d')} \quad (44)$$

$d'$ : là khoảng cách từ trọng tâm cốt thép chịu nén đến mép bê tông vùng nén.

Nếu  $d' > (1 - \frac{f_{yk}}{800})x$  thì lấy  $700(1 - \frac{d'}{x})$  thay cho  $0.87 f_{yk}$  trong công thức trên.

- Xác định  $A_p$  tương ứng với  $K_{lim}$  theo hình 2.5 và  $z/d$  tương ứng với giá trị giới hạn  $x/d$  từ hình 2.6. Lúc này diện tích cáp ULT yêu cầu được xác định:

$$A_p \cdot (1 + \frac{0.87 A'_s \cdot f_{yk} \cdot z}{K_{lim} \cdot b d^2 f_{ck}}) \quad (45)$$

- Nếu diện tích  $A_p$  này không đảm bảo yêu cầu cho trạng thái giới hạn cuối cùng. Cốt thép thường có thể được xem xét trong tính toán với diện tích quy đổi thành cáp ULT tương đương  $A_s \cdot f_{yk} / f_{pk}$

Theo EC2 khả năng chịu lực của sàn sử dụng ULT kết dính được tính:

$$M = K \cdot f_{ck} \cdot b \cdot d^2 \quad (46)$$

### Trường hợp cáp không kết dính:

Theo EC2 lực nén trước  $P_d$  được tính:  $P_d = 0.9 P_{m' \infty} + \Delta \sigma \cdot A_p$  (47)

Ứng suất trong cáp ULT không dính bám:

$$f_p = \frac{0.9 P_{m' \infty} + \Delta \sigma \cdot A_p}{A_p} = \frac{0.9 P_{m' \infty}}{A_p} + \Delta \sigma \quad (48)$$

Trong đó:

$P_{m, \infty}$ : lực nén trước sau khi đã trừ đi tất cả các ứng suất hao.

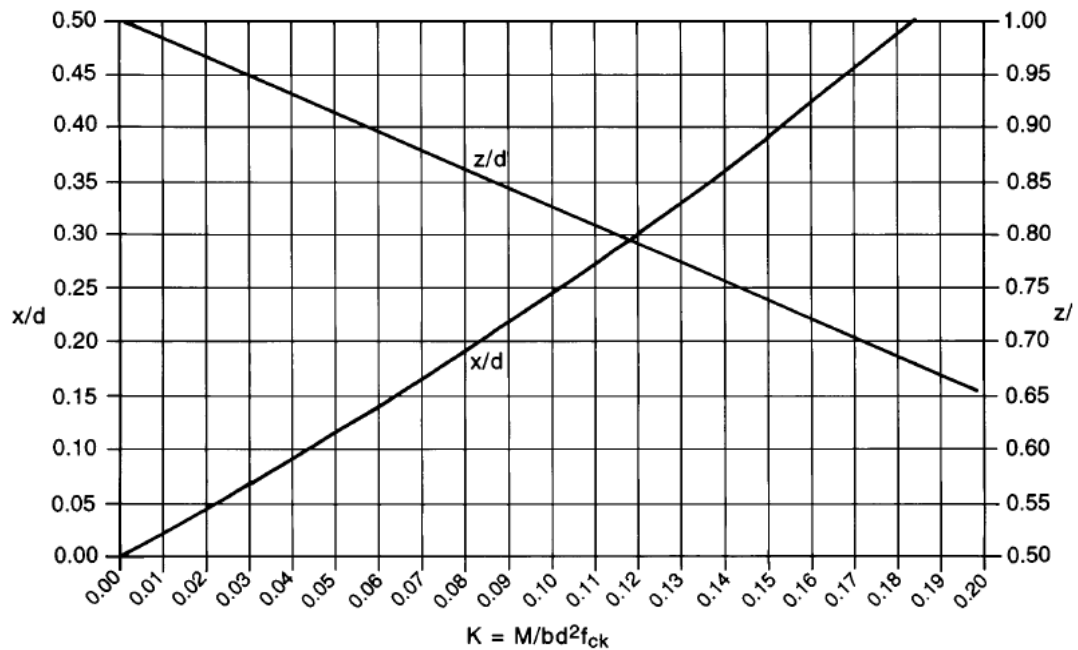


$A_p$  : diện tích cáp ULT không dính bám.

$\Delta\sigma = 100\text{N/mm}^2$  khi chiều dài cáp ULT không dính kết không vượt quá kích thước nhịp, ngược lại thì lấy  $\Delta\sigma = 0$ .

Bài toán thiết kế theo tiêu chuẩn EC-2 đối với tiết diện chữ nhật được thể hiện qua các bước sau:

- Tính  $K = \frac{M}{bd^2 f_{ck}}$  (49)
- Tính giá trị giới hạn  $x/d$  giống như trường hợp cáp ULT dính bám. Từ đó tính  $K_{lim}$  theo hình 2.7



**Hình 7: Chiều cao trục trung hòa và các tỷ số cho cấu kiện bê tông ULT tiết diện chữ nhật với cáp dính kết**

- Nếu  $K \leq K_{lim}$  diện tích cốt thép  $A_s$  được tính:

$$A_s = \frac{M / z - P_d}{0.87 f_{yk}} \quad (50)$$

$z$ : được xác định theo hình 2.7

- Nếu  $K > K_{\text{lim}}$  thì cần đặt cốt thép chịu nén, diện tích cốt thép chịu nén  $A_s'$  được tính:

$$A_s' = \frac{M - K_{\text{lim}} b d^2 f_{ck}}{0.87 f_{yk} \cdot (d - d')} \quad (51)$$

$$\text{Diện tích cốt thép chịu kéo được tính: } A_s = A_s' + \frac{\frac{K_{\text{lim}} b d^2 f_{ck}}{0.87 f_{yk}} - P_d}{0.87 f_{yk}} \quad (52)$$

#### d. Tiêu chuẩn CSA-A23-3-94:

##### Trường hợp cáp kết dính:

- Ứng suất trong cáp U<sup>LT</sup> dính kết:

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left[1 - k_p \cdot \frac{c}{d_p}\right] \quad (53)$$

$$\text{Với: } k_p = 2 \cdot \left(1,04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}}\right) \quad (54)$$

$$\frac{c}{d_p} \leq 0,5; \quad f_{pe} \geq 0,6 f_{py}$$

- Khả năng chịu uốn của sàn được xác định:

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot (d_p - a/2) + A_s \cdot f_y \cdot (d - a/2) + A_s' \cdot f_y' \cdot (a/2 - d') \quad (55)$$

Vì sàn không có cốt thép chịu nén  $A_s' = 0$  nên khả năng chịu uốn được xác định:

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot (d_p - a/2) + A_s \cdot f_y \cdot (d - a/2) \quad (56)$$

##### Trường hợp cáp không kết dính:

Ngoài các thiếu sót của tiêu chuẩn CSA A23.3-94 như đã nói ở trên, các nhà nghiên cứu cũng chỉ ra rằng nhân tố ngăn cản của vật liệu theo như tiêu chuẩn sẽ dẫn đến làm giảm giá trị  $\Delta f_{ps}$  cho những cấu kiện có trục trung hòa nằm sâu bên trong như sàn và dầm có tiết diện chữ nhật. Do đó để tránh sự mâu thuẫn như dự báo giá trị  $\Delta f_{ps}$  âm và kể đến ảnh hưởng của biến dạng do tải trọng chất đầy trên các nhịp, các loại tải trọng khác nhau trên các nhịp liên tục và các cấu kiện có tỷ số  $c/d_p$  lớn, các nhà nghiên cứu đã chỉnh sửa phương trình trên thành:

$$f_{ps} = f_{pe} + \frac{8000}{l'_c} \cdot \left[ \frac{\sum_1^n (d_p - c) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{c}{d_p} \right)^2 \right]}{n} \right] (MPa) \quad (57)$$

Trong đó  $f_{pe} + 70 \leq f_{ps} \leq f_{py}$

Chiều cao của trục trung hòa

$$c = \frac{A_p \cdot f_{py} + A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f'_y - \alpha_1 \cdot f'_c \cdot h_f (b - b_w)}{\alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot f'_c \cdot b_w} \quad (58)$$

$l'_c$ : chiều dài hiệu quả hiệu chỉnh được tính bởi  $L/(\alpha_2 \cdot n)$

$L$ : chiều dài cáp giữa các đầu neo

$\alpha_2$ : hệ số giảm kể đến khả năng hình thành các khớp dẻo.

Tuy nhiên phương trình trên vẫn chưa kể đến loại cáp và biến dạng cực hạn của bê tông.

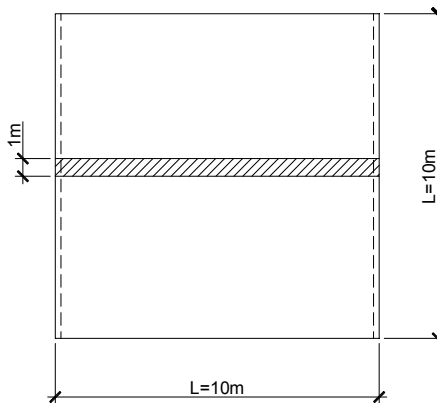
- Khả năng chịu uốn của sàn được xác định:

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot (d_p - a/2) + A_s \cdot f_y \cdot (d - a/2) + A'_s \cdot f'_y \cdot (a/2 - d') \quad (59)$$

### 3. THÍ DỤ TÍNH TOÁN

#### 3.1. Số liệu khảo sát:

Cho một ô sàn bê tông ứng lực trước như hình vẽ 8:



**Hình 8: Sơ đồ mặt bằng ô sàn khảo sát**

Vật liệu bê tông theo ACI-318-05 và CSA-A23-94 có  $f'_c = 34MPa$ .

Theo tiêu chuẩn Châu Âu EC-2:  $f_c = 34MPa$ ;  $f_{c,cube} = 42,5MPa$

Theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN5574-20125 tương đương B42,5.

### Vật liệu cáp U<sup>L</sup>T:

Theo tiêu chuẩn ACI-318-05 và CSA-A-23-94 có:  
 $f_{pu} = 1860MPa$ ;  $f_{py} = 1674MPa$ ;  $A_{ps} = 140mm^2/1$  cáp.

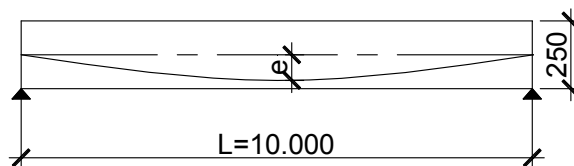
Tiêu chuẩn EC-2:  $f_{pk} = 1674MPa$ .

**Cốt thép thường:** để làm rõ hơn vai trò của ứng suất trong thép U<sup>L</sup>T, trong thí dụ này không xét đến ảnh hưởng của cốt thép thường.

Trọng lượng sàn (kể cả trọng lượng bản thân và các lớp cấu tạo)  $6 \frac{kN}{m^2}$ , hoạt tải  $2 \frac{kN}{m^2}$ .

Sàn dày 250mm; Nhịp  $L = 10m$ ;

Chọn quỹ đạo cáp theo đường hợp lực C-line như hình vẽ:



Hình 8: Quỹ đạo cáp U<sup>L</sup>T

$$e = \frac{h_b}{2} - 30 - \frac{20}{2} = \frac{250}{2} - 30 - \frac{20}{2} = 85mm$$

$$\text{Ứng suất căng cáp: } f_{pi} \leq \begin{cases} 0,8 \cdot f_{pu} \\ 0,94 \cdot f_{py} \end{cases}$$

$$f_{pi} = 0,7 \cdot f_{pu} = 0,7 \times 1860 = 1302MPa$$

Mất mát ứng suất:

Mất mát ứng suất do ma sát được lấy bằng 2,5%/10m dài:

$$\frac{1302 + 0,975 \times 1302}{2} = 1286MPa$$

$$\text{Độ dẫn dài của cáp: } \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \Rightarrow \Delta_s = \varepsilon \cdot L = \frac{\sigma_{sp}}{E_{sp}} \cdot L = \frac{1286}{2 \times 10^6} \times 1000 = 6,8cm$$

Mất mát ứng suất do biến dạng neo: biến dạng neo được lấy 6mm

$$\Delta\sigma = \frac{1286}{6,8} \times 0,6 = 114 \text{MPa}$$

Các mất mát ứng suất khác được lấy hoặc 200MPa.

Ứng suất hiệu quả trong giai đoạn sử dụng:  $f_{pe} = 1286 - 200 = 1086 \text{MPa}$

Chọn số lượng cáp trên sàn:

Áp dụng phương pháp cân bằng tải trọng:  $w_b = (0,8 \div 1) \times$  trọng lượng bản thân

Chọn  $w_b = 0,8 \times TLBT = 0,8 \times 6 = 4,8 \text{kN/m}^2$

$$\text{Lực căng hiệu quả yêu cầu: } P_e = \frac{w_b \cdot L^2}{8 \cdot e} = \frac{4,8 \times 10^2}{8 \times 0,085} = 705 \text{kN}$$

Lực căng trong 1 cáp:  $P_1 = A_{ps} \cdot f_{pe} = 140 \times 1086 = 152040 \text{N} = 152 \text{kN}$

Số lượng cáp:  $n = \frac{P}{P_1} = \frac{705}{152} = 4,6$  cáp. Chọn số cáp là 5 cáp/1m.

**Tính toán khả năng chịu lực của sàn khi sử dụng cáp kết dính theo các tiêu chuẩn:**

Kết quả tính theo các tiêu chuẩn và mô hình được thể hiện trong bảng sau.

**Ứng suất trong cáp ULT và khả năng chịu uốn của sàn ULT sử dụng cáp kết dính theo các tiêu chuẩn.**

Tiêu chuẩn	$f_{ps}$ (MPa)	$M_u$ (kNm)
ACI-318-05	1741	230,3
EC-2	1617	254,9
CSA-A23-3-94	1714	226,6

**Tính toán khả năng chịu lực của sàn khi sử dụng cáp không kết dính theo các tiêu chuẩn, mô hình:**

Kết quả tổng hợp tính toán theo các tiêu chuẩn và mô hình được thể hiện trong bảng

Ứng suất trong cáp ULT và khả năng chịu uốn của sàn ULT sử dụng cáp không kết dính theo các tiêu chuẩn

Tiêu chuẩn	$f_{ps}$ (MPa)	$M_n$ (kNm)
ACI-318-05	1190	162,9
EC-2	1077	150,4
CSA-A-23-94	1225	164,8
Đề xuất của Naaman và Alkhairi	1374	174,1

### **So sánh và nhận xét:**

Các kết quả tính toán cường độ của cáp và khả năng chịu uốn của sàn sử dụng cáp ULT kết dính và không kết dính được thể hiện trong bảng sau

Ứng suất trong cáp ULT và khả năng chịu uốn của sàn ULT theo các tiêu chuẩn

	ACI-318-05		EC-2		CSA-A23-94		Naaman và Alkhairi	
	$f_{ps}$ (MPa)	$M_u$ (kNm)	$f_{ps}$ (MPa)	$M_u$ (kNm)	$f_{ps}$ (MPa)	$M_u$ (kNm)	$f_{ps}$ (MPa)	$M_u$ (kNm)
Cáp kết dính (1)	1741	230.3	1617	210	1714	226.6	-	-
Cáp không kết dính (2)	<b>1190</b>	162.9	<b>1077</b>	150.4	<b>1225</b>	167.7	<b>1374</b>	174,1
Tỷ số $\frac{(1)}{(2)}$	1,46	1,41	1,50	1,40	1,37	1,35	-	-

### **Nhận xét:**

- Ứng suất trong cáp không kết dính khi tính theo trạng thái giới hạn về chịu lực (cường độ của cáp không kết dính) phụ thuộc vào ứng suất hiệu quả của cáp và tỷ số  $L/d_p$  (nhịp/chiều cao làm việc của tiết diện). Vì vậy hạn chế các tổn hao ứng suất có ý nghĩa quan trọng.

- Tỷ số cường độ của cáp kết dính và không kết dính tính theo các tiêu chuẩn dao động từ (1,37 -1,46), trong đó tiêu chuẩn CSA-A23-94 cho kết quả bé nhất, tiêu

chuẩn EC-2 cho kết quả lớn nhất. Sử dụng công thức Naaman và Alkhairi, giá trị cường độ của cáp không kết dính cho giá trị lớn hơn các tiêu chuẩn thiết kế.

- Khả năng chịu lực của sàn khi sử dụng cáp kết dính lớn hơn đáng kể so với trường hợp cáp không kết dính, trong khoảng 1,35 đến 1,41 tùy theo tiêu chuẩn.

### **Bàn luận**

- Cường độ của cáp không kết dính phụ thuộc vào ứng suất hiệu quả của cáp, do vậy với các cấu kiện có tổn hao ứng suất nhiều việc sử dụng cáp không kết dính có thể không đạt được hiệu quả kinh tế.
- Khả năng chịu lực của sàn ULT sử dụng cáp kết dính lớn hơn khả năng chịu lực của sàn ULT sử dụng cáp không kết dính khoảng 1,35-1,41 lần từ thí dụ tính toán.
- Cường độ của cáp không kết dính xác định theo các tiêu chuẩn khác nhau cho kết quả khác nhau nhưng sự sai lệch là không đáng kể.

### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] **Phan Quang Minh và các tác giả**, *Kết cấu bê tông cốt thép-Phần cấu kiện cơ bản*, Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội 2008.
- [2] **Phan Quang Minh**, *Sàn phẳng bê tông ứng lực trước căng sau*, Nhà xuất bản Khoa Học và Kỹ Thuật, Hà Nội 2010.
- [3] **Phan Quang Minh, Ngô Thế Phong**, *Kết cấu bê tông cốt thép – thiết kế theo tiêu chuẩn châu Âu*, Nhà xuất bản xây dựng, Hà Nội 2010.
- [4] **Phan Quang Minh, Ngô Thế Phong**, *Kết cấu bê tông cốt thép thiết kế theo tiêu chuẩn Châu Âu*, Nhà xuất bản Xây Dựng, Hà Nội 2011.
- [5] **Nguyễn Trung Hòa**, *Tiêu chuẩn Châu Âu EUROCODE EN 1992-1-1-Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép*, Nhà xuất bản Xây Dựng, Hà Nội 2011.
- [6] **Trần Mạnh Tuấn**, *Tính toán kết cấu bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn ACI318-2002*, Nhà xuất bản Xây Dựng, Hà Nội 2005.

- [7] **Tiêu chuẩn xây dựng Việt Nam**, *Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu bê tông cốt thép TCXDVN 356 : 2005*, NXB Xây dựng. Hà Nội 2005.
- [8] **Tiêu chuẩn Mỹ**, *Tiêu chuẩn ACI:318-02*.
- [9] **Dr G.Cross**, *Design of prestressed concrete flat slab* – South Africa.
- [10] **A. Fattah Shaikh**, *Precast and prestressed Concrete* – South Africa.
- [11] **Ed Chen Wai -Fah**, *Structural Concrete Design*, Structural engineering Handbook, 1999.
- [12] **Pritiv Kumar Gopal**, *Flexural Behaviour of Flanged Concrete Beams Prestressed With UnBonded Steel or FRP Tendons*, 2004.
- [13] **Filippo Osimani**, *The Use of Unbonded Tendons for Prestressed Concrete Bridges, Structural design and bridges*, 2004.