

PHÂN TÍCH VÀ THIẾT KẾ DẦM BÊ TÔNG CỐT THÉP CHỊU UỐN TRÊN TIẾT DIỆN NGHIÊNG THEO ACI 318, EUROCODE 2 VÀ TCVN 5574:2012

TS. PHÙNG NGỌC DŨNG

Đại học Kiến trúc Tp. Hồ Chí Minh

ThS. LÊ THỊ THANH HÀ

Đại học Kiến trúc Hà Nội

Tóm tắt: Ứng xử cắt của dầm bê tông cốt thép (BTCT) với vết nứt hình thành trên tiết diện nghiêng là hiện tượng phức tạp. Việc thiết kế dầm chịu lực cắt trong các tiêu chuẩn đều dựa nhiều trên kết quả nghiên cứu thực nghiệm. Với mục đích trình bày một cách rõ ràng hơn về ứng xử cắt dầm BTCT cho sinh viên, kỹ sư, nhà thiết kế, nhiều nghiên cứu cơ bản về ứng xử của dầm BTCT đã được tổng kết. Bài báo này sẽ giới thiệu một trong số các tổng kết đó: so sánh cách thiết kế cốt thép đai theo 3 tiêu chuẩn 5574, ACI và EC2.

1. Giới thiệu

Trong bài báo này, dựa trên sự tổng kết nghiên cứu của nhiều tác giả, ứng xử của dầm BTCT chịu uốn và cắt sẽ được giới thiệu, sau đó một số vấn đề thiết kế cơ bản cho dầm BTCT có và không có cốt thép đai thẳng đứng theo ba tiêu chuẩn 5574, ACI và EC2 sẽ được tổng kết. Sự giống nhau và khác nhau về cách thiết kế cốt thép đai của ba tiêu chuẩn này cũng sẽ được trình bày. Các ví dụ và yêu cầu về cấu tạo sẽ được trình bày ở bài báo tiếp theo.

2. Sự làm việc của dầm BTCT chịu uốn và cắt

2.1 Sự làm việc của dầm đàn hồi đồng chất đẳng hướng chịu uốn và cắt

Sự làm việc của dầm đàn hồi đồng chất đẳng hướng chịu uốn và cắt đã được trình bày kỹ trong nhiều tài liệu [1,5,6,7]. Để giải thích sự làm việc của dầm làm bằng BTCT, vật liệu không đồng chất và đẳng hướng, ứng xử của dầm đơn giản bằng vật liệu đồng chất, đẳng hướng có khả năng chịu kéo, nén và cắt đều lớn, chịu tải trọng phân bố đều (hình 1), sẽ được trình bày. Nếu vật liệu là đàn hồi, ứng suất tiếp và pháp tại bất kỳ điểm nào trên một tiết diện ngang (có lực cắt khác không) có thể được xác định từ hai công thức của sức bền vật liệu [1]:

$$v = \frac{VQ}{Ib_w} \quad (1)$$

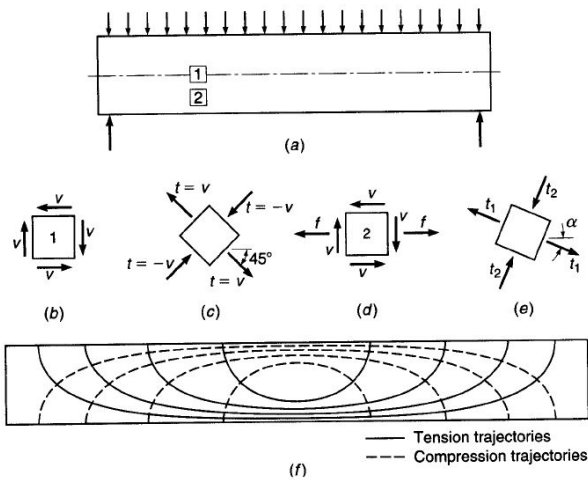
$$\text{và } f = \frac{My}{I} \quad (2)$$

trong đó: v và f là giá trị ứng suất tiếp và ứng suất pháp tại điểm đó; V và M là lực cắt và mômen uốn tại tiết diện đang xét; Q và I là mômen tĩnh và mômen quán tính của tiết diện; y là khoảng cách từ trục trung hòa tới điểm đang xét ứng suất; b_w là bề rộng của tiết diện. Phân bố ứng suất pháp, f , do mô men uốn là tuyến tính, còn ứng suất tiếp v có dạng bậc hai. Tại vị trí tiết diện đi qua hai phân tố 1 và 2 như trên hình 1, giá trị M và V đều khá lớn. Phân tố 1 tại vị trí trục trung hòa sẽ chịu cắt thuần túy, như thể hiện ở hình 1b, với giá trị là lớn nhất so với các vị trí khác trên cùng tiết diện đó và bằng $3/2 v_{av}$. Với v_{av} là ứng suất tiếp trung bình, có giá trị bằng lực cắt chia cho diện tích tiết diện ngang $v_{av} = V/b_w h$, trong đó b_w và h là chiều rộng và chiều cao của tiết diện. Ứng suất chính của phân tố này sẽ có góc nghiêng 45° như ở hình 1c, gồm chỉ 1 ứng suất kéo và 1 ứng suất nén. Phân tố 2 sẽ chịu cả hai ứng suất pháp và tiếp do M và Q , như hình 1d. Phương ứng suất chính của phân tố này sẽ nghiêng một góc α so với trục hoành, như thể hiện ở hình 1d. Giá trị của ứng suất chính này sẽ xác định theo phương trình (3) và góc nghiêng xác định bởi phương trình (4):

$$t = \frac{f}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{f^2}{4}\right) + v^2} \quad (3)$$

$$\tan(2\alpha) = \frac{2v}{f} \quad (4)$$

Vì v và f thay đổi dọc theo dầm và theo chiều cao của tiết diện kể từ trục trung hòa, góc nghiêng cũng như độ lớn của ứng suất chính t cũng thay đổi. Hình 1f thể hiện quỹ đạo của các ứng suất chính này cho dầm đơn giản chịu tải trọng phân bố đều. Có thể thấy phương các ứng suất chính tiếp tuyến với quỹ đạo của chúng. Tại các thớ ngoài cùng của tiết diện giữa nhịp, lực cắt bằng không, ứng suất chính có phương trùng với trục hoành.



Hình 1. Hình dạng ứng suất chính và hình chiếu ứng suất trong dầm chữ nhật đồng chất chịu uốn cắt [1, 5, 6]

2.2 Dầm bê tông cốt thép không có cốt ngang chịu cắt

Ứng xử của dầm đàn hồi đồng chất có thể áp dụng cho dầm bê tông không có cốt thép. Khi tải trọng được tăng lên, vết nứt kéo sẽ hình thành tại vị trí có ứng suất kéo lớn nhất và làm dầm sụp đổ nhanh chóng. Nếu cốt thép chịu kéo được bố trí trong dầm, ứng xử của nó sẽ khác biệt so với dầm không có cốt thép chịu kéo. Mặc dù các vết nứt kéo hình thành trong bê tông, cường độ kéo uốn yêu cầu được chịu bởi cốt thép dọc, và dầm có thể chịu được các tải trọng lớn hơn. Lực cắt tăng tỷ lệ với tải trọng và các ứng suất kéo xiên với giá trị lớn sẽ xuất hiện tại các vùng có lực cắt lớn. Cốt thép dọc chịu kéo được tính toán và bố trí sao cho nó hiệu quả trong việc chống lại lực kéo gần mặt chịu kéo. Nó không làm tăng khả năng chịu kéo của bê tông chống lại ứng suất kéo xiên xuất hiện ở đâu đó, gây ra bởi chỉ lực cắt hoặc bởi sự kết hợp giữa lực cắt và mô men uốn. Khi các ứng suất này đạt đủ lớn làm các vết nứt kéo xiên mở rộng theo hướng vuông góc với ứng suất kéo cục bộ, đó là các vết nứt xiên, khác với các vết nứt uốn thẳng góc.

Tiêu chí hình thành vết nứt xiên:

Phương trình (3) cho thấy ứng suất kéo xiên t thể hiện ảnh hưởng kết hợp giữa ứng suất pháp f và ứng suất tiếp v . Những ứng suất này phụ thuộc vào giá trị của M và V . Tại các vị trí tiết diện có lực cắt V lớn và mô men uốn M nhỏ, vết nứt do uốn nhỏ. Nếu xuất hiện vết nứt này thì nó sẽ xảy ra trước khi hình thành vết nứt xiên do cắt. Ứng suất tiếp trung bình trước khi hình thành vết nứt là:

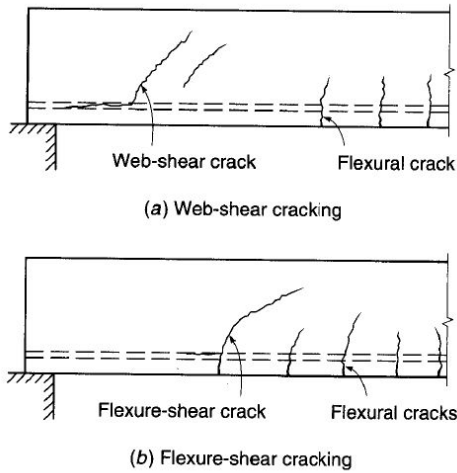
$$v = \frac{V}{b_w d} \tag{5}$$

Với d là chiều cao làm việc của tiết diện. Sự phân bố chính xác của ứng suất tiếp trên toàn bộ mặt cắt tiết diện là không biết, không thể sử dụng phương trình (1) để xác định vì nó không kể đến sự có mặt của cốt thép và bê tông không phải là vật liệu đồng chất đàn hồi. Nếu các ứng suất do uốn nhỏ, các ứng suất kéo xiên, như trong hình 1b, c, nghiêng một góc 45° và bằng ứng suất tiếp với giá trị lớn nhất tại trục trung hòa. Do đó các vết nứt xiên thường hình thành hầu hết tại hoặc gần trục trung hòa và lan truyền từ vị trí đó, như trên hình 2a. Vết nứt do cắt thuần túy tại thân dầm (web-shear crack) có thể xuất hiện khi ứng suất kéo xiên từ trục trung hòa bằng với khả năng chịu kéo của bê tông. Thông qua thí nghiệm người ta xác định được rằng trong các vùng với V lớn và M nhỏ, các vết nứt xiên do kéo hình thành với một giá trị ứng suất tiếp trung bình hay danh nghĩa bằng [6]:

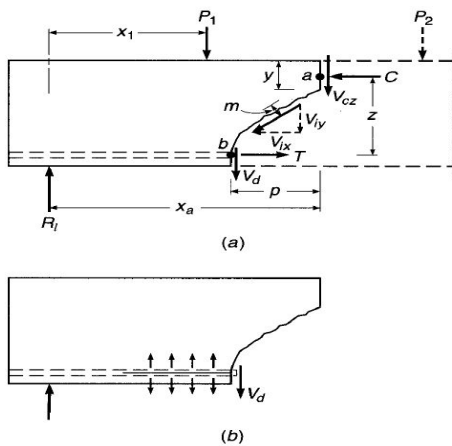
$$v_{cr} = V_{cr} / (b_w d) = 0,29 \sqrt{f'_c} \tag{6}$$

với f'_c là cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông; V_{cr} là giá trị lực cắt gây ra vết nứt xiên. Nói chung, vết nứt này thường ít, chủ yếu xảy ra tại các vị trí gần gối tựa của dầm cao với bề rộng thân dầm nhỏ hoặc tại vị trí mô men đổi dấu trong dầm liên tục. Ứng xử của dầm trở nên khác đi khi tiết diện chịu mô men uốn và lực cắt đều khá lớn. Tại các vị trí như vậy, trong một dầm mà cốt thép dọc được bố trí hợp lý, các vết nứt do lực kéo khi uốn hình thành đầu tiên. Chiều rộng và chiều sâu của chúng được khống chế bởi cốt thép dọc. Tuy nhiên, khi ứng suất xiên do kéo tại phần bên trên của các vết nứt này vượt quá cường độ chịu kéo của bê tông, vết nứt cong theo phương đường xiên và tiếp tục phát triển về độ lớn cũng như bề rộng (hình 2b). Các vết nứt này gọi là vết nứt do cắt khi uốn (flexure-shear crack) và thông dụng hơn so với vết nứt do cắt thuần túy. Rõ ràng, tại thời điểm mà vết nứt xiên do kéo hình thành, ứng suất tiếp trung bình sẽ lớn hơn giá trị cho trong phương trình (5) vì vết nứt do kéo sẵn có làm giảm diện tích của vùng bê tông chưa bị nứt (vùng này dùng để chống lại lực cắt) tới một giá trị nhỏ hơn diện tích chưa bị nứt " $b_w d$ " dùng trong phương trình (5). Các thí nghiệm [6] cho thấy với sự có mặt của mô men uốn khá lớn, ứng suất tiếp danh định mà tại đó ứng suất gây ra vết nứt xiên do kéo hình thành và phát triển, trong đa số các trường hợp, được xác định khá an toàn bằng:

$$v_{cr} = \frac{V_{cr}}{bd} = 0,16 \sqrt{f'_c} \tag{7}$$



Hình 2. Vết nứt kéo xiên trong dầm BTCT [6]



Hình 3. Cân bằng lực tại vết nứt kéo xiên trong dầm BTCT không có cốt đai chịu cắt [6]

Như vậy, ứng suất tiếp tạo ra các vết nứt xiên phụ thuộc vào tỷ số giữa lực cắt và mô men uốn hay chính xác hơn là vào tỷ số v/f tại vị trí gần với đỉnh của vết nứt do uốn. Giá trị ứng suất tiếp trung bình phụ thuộc vào chiều sâu của vết nứt do uốn nên nó có thể xác định bởi $v = k_1(V/bd)$, trong k_1 là hệ số phụ thuộc vào chiều sâu của việc thâm nhập của vết nứt uốn [5, 6, 7]. Mặt khác, ứng suất pháp do mô men uốn có thể xác định theo $f = k_2(M/bd^2)$, trong đó k_2 cũng phụ thuộc vào hình dạng vết nứt [5, 6, 7]. Do đó, tỷ số

$$\frac{v}{f} = \frac{k_1 Vd}{k_2 M}$$

sẽ ảnh hưởng đến tải trọng mà dưới tác dụng của nó vết nứt do uốn sẽ phát triển thành vết nứt do uốn-cắt, đại lượng k_1/k_2 sẽ được xác định bằng thực nghiệm. Phương trình (6) và (7) dùng để xác định ứng suất gây ra vết nứt xiên trong trường hợp giá trị rất lớn và rất nhỏ của Vd/M . Với các giá trị khác của V và M , ứng suất gây ra vết nứt xiên sẽ nằm trong khoảng hai giá trị trên. Nhiều thí nghiệm đã được thực hiện để xác định mối quan hệ giữa ứng suất gây ra vết nứt xiên và giá trị M, V . Ứng suất tiếp danh định mà tại đó các vết nứt xiên do uốn-cắt phát triển có thể xác định từ:

$$v_{cr} = \frac{V_{cr}}{bd} = 0,16\sqrt{f_c'} + 17\frac{\rho Vd}{M} \leq 0,29\sqrt{f_c'} \quad (8)$$

trong đó $\rho = A_s/bd$ với A_s là diện tích tiết diện cốt thép chịu kéo.

Ứng xử của dầm BTCT bị nứt xiên:

Nếu cốt thép dọc được thiết kế hợp lý thì vết nứt thẳng góc do uốn là vô hại đối với sự làm việc của dầm. Vì dầm BTCT trong trường hợp này không có cốt thép đai chịu cắt nên các vết nứt xiên do lực cắt gây ra sẽ quyết định đến ứng xử của dầm hơn là vết nứt thẳng góc do uốn. Thông qua thực nghiệm [6], ứng xử của dạng dầm này có hai dạng như sau:

Dạng 1: Vết nứt xiên khi bắt đầu hình thành lan truyền ngay lập tức khi tải trọng ngoài tăng lên một lượng nhỏ, từ vùng cốt thép chịu kéo đến mặt trên của vùng bê tông chịu nén và làm dầm phá hoại. Quá trình này thường đột ngột và không có cảnh báo nào trước đó và xảy ra chủ yếu ở các dầm có chiều cao tiết diện khá thấp (ví dụ như sàn hay dầm có tỷ số nhịp/chiều cao tiết diện ≥ 8). Vì không có cốt thép đai chịu cắt nên các dầm dạng này rất dễ bị phá hoại giòn nếu có một tác động đột ngột nào đó. Vì vậy, trong thực tế người ta thường bố trí cốt thép chịu cắt tối thiểu cho dầm kể cả khi việc tính toán không cần đến chúng. Các cốt thép đai này sẽ hạn chế việc tăng vết nứt xiên và tăng độ dẻo cho dầm, từ đó có thể xuất hiện các cảnh báo trước khi dầm bị phá hoại. Trong một số trường hợp, như bản sàn,... khi ứng suất tiếp thực tế nhỏ hơn rất nhiều so với ứng suất gây nứt ở phương trình (8) thì người ta có thể bỏ qua cốt thép chịu cắt.

Dạng 2: Vết nứt xiên khi hình thành sẽ lan truyền về phía vùng nén và đến mặt phía dưới của vùng bê tông chịu nén thì dừng lại. Trong trường hợp này không có sự phá hoại đột ngột nào xảy ra và tải trọng phá hoại có thể lớn hơn nhiều lần so với tải trọng gây ra vết nứt đầu tiên. Ứng xử này gặp nhiều ở các dầm có chiều cao tiết diện lớn, với tỷ số chiều dài nhịp/chiều cao tiết diện nhỏ. Đây là loại dầm thường gặp trong thực tế. hình 3 thể hiện một đoạn dầm chịu tải trọng bất kỳ, trong đó một vết nứt xiên đã hình thành. Phần bên trái vết nứt của đoạn dầm này, tải trọng tác động lên nó có chiều hướng lên với giá trị $V_{ext} = R_1 - P_1$. Khi vết nứt được hình thành, không có lực kéo nào vuông góc với vết nứt có thể được truyền qua nó, tuy nhiên, nếu vết nứt này hẹp nó có thể truyền lực dọc theo bề mặt của nó thông qua mối liên kết giữa các vật liệu trên bề mặt gồ ghề. Lực liên kết

V_i , có thể được chia thành hai thành phần V_{ix} và V_{iy} như hình 3a, thường được xác định thông qua thí nghiệm, có giá trị bằng khoảng 1/3 giá trị tổng lực cắt [5, 6]. Các nội lực đứng khác tại vết nứt là lực tại vùng bê tông chịu nén chưa bị nứt V_{cz} và lực ngang qua cốt thép chịu kéo V_d , còn gọi là lực chốt. Theo điều kiện cân bằng, tổng nội lực, $V_{int} = V_{cz} + V_d + V_{iy}$, sẽ bằng với ngoại lực tác dụng, do vậy phần bê tông chịu nén sẽ chịu một lượng lực cắt là: $V_{cz} = V_{ext} - V_d - V_{iy}$ (9). Trong các dầm mà chỉ có cốt thép dọc chịu kéo, khả năng chịu cắt của cốt thép dọc, V_d , thường nhỏ vì lực V_d này phụ thuộc vào chiều dày của lớp bê tông bảo vệ cốt thép dọc, dùng để ngăn cản chuyển vị đứng của nó. Lớp bê tông bảo vệ này thường nhỏ, do đó, lực V_d trong trường hợp này cũng nhỏ. Thực ra lực V_d này tạo ra trong bê tông bảo vệ và bê tông ở phía trên cốt thép dọc một áp lực kéo đứng, như ở hình 3b. Do những ứng suất này, các vết nứt xiên thường có xu hướng lan truyền dọc theo cốt thép dọc chịu kéo. Điều này làm giảm V_d và làm cho vết nứt xiên mở rộng, do đó, lực liên kết V_{iy} cũng bị giảm đi và thường dẫn đến phá hoại đột ngột cho dầm. Xét mô men xung quanh điểm a như ở hình 3a, là điểm cắt giữa C và V_{cz} ; mô men ngoại lực $M_{ext,a}$ tác dụng tại a và có giá trị bằng $M_{ext,a} = R_1 x_a - P_1(x_a - x_1)$ cho trường hợp tải trọng trên hình 3a; mô men nội lực bằng $M_{int,a} = T_b z + V_d p - V_i m$. Ở đây, p là hình chiếu ngang của vết nứt xiên và m là cánh tay đòn mô men của lực V_i đối với điểm a. Việc sử dụng ký hiệu lực kéo trong cốt thép là T_b thay cho T để nhấn mạnh rằng lực trong cốt thép này tác dụng tại điểm b, không phải tại a. Cân bằng mômen nội và ngoại lực $M_{int,a} = M_{ext,a}$ ta có lực kéo dọc trục trong cốt thép tại điểm b là:

$$T_b = \frac{M_{ext,a} - V_d p - V_i m}{z} \quad (10)$$

Nếu vết nứt xiên phát triển thì các lực V_d và V_i nhỏ đi nhiều, nên lực kéo trong cốt thép tại điểm b có thể xác định gần đúng theo:

$$T_b = \frac{M_{ext,a}}{z} \quad (11)$$

Sự phân bố ứng suất và nội lực sau khi xuất hiện vết nứt xiên có thể tóm tắt như sau:

- Tại tiết diện thẳng đứng qua điểm a, ứng suất tiếp trung bình trước khi xuất hiện vết nứt là $V_{ext}/b_w d$. Sau khi hình thành vết nứt, lực cắt được chống lại bởi

sự kết hợp của lực chốt V_d , lực liên kết V_i và khả năng chịu cắt trên vùng tiết diện nhỏ hơn mà bê tông chưa bị nứt. Vì ứng suất kéo dọc theo cốt thép (hình 3b) làm vết nứt mở rộng nên giá trị V_d và V_i giảm đi, và điều này làm tăng lực cắt và ứng suất tiếp trên phần bê tông còn lại chưa bị nứt.

- Vết nứt xiên mô tả ở trên thường xuất hiện phía trên trục trung hòa và cắt ngang qua một vài phần của vùng nén trước khi nó bị dừng lại bởi ứng suất nén. Như vậy, lực nén C cũng tác dụng lên một diện tích nhỏ hơn phần diện tích trước khi xuất hiện vết nứt, do đó, việc hình thành vết nứt xiên cũng làm tăng ứng suất nén trong phần bê tông chưa bị nứt.

- Trước khi hình thành vết nứt xiên, lực kéo trong cốt thép tại điểm b được gây ra và tỷ lệ thuận với giá trị mô men uốn chính tại tiết diện đi qua b. Vì có sự hình thành vết nứt xiên, từ phương trình (11) ta thấy lực kéo tại điểm b tăng thêm và tỷ lệ thuận với mô men tại tiết diện đi qua điểm a. Vì mô men tại tiết diện qua điểm a thường lớn hơn tại tiết diện qua điểm b nên rõ ràng rằng việc hình thành vết nứt xiên làm tăng đột ngột ứng suất kéo trong cốt thép tại b.

- Nếu cả hai vật liệu đều có khả năng tiếp nhận các ứng suất tăng lên này, cân bằng sẽ tự thiết lập sau khi có sự phân phối lại nội lực và tải trọng lớn hơn có thể tác dụng lên dầm trước khi nó bị phá hoại. Sự phá hoại có thể xảy ra theo một số tình huống khác nhau. Nếu cốt thép tại tiết diện b được thiết kế chỉ đủ tại tiết diện đó thì việc tăng lực kéo tại b do hình thành vết nứt xiên sẽ gây ra sự chảy dẻo tại cốt thép ở b do mô men lớn hơn ở a tác dụng, như mô tả ở trên, vì vậy gây ra sự phá hoại của dầm nếu cốt thép bị kéo đứt. Nếu dầm được thiết kế hợp lý để tránh xảy ra vấn đề này thì thông thường bê tông tại đỉnh vết nứt sẽ phá hoại do bị ép vỡ. Bê tông ở vùng này chịu đồng thời ứng suất do nén và do cắt và ứng suất kết hợp này thường gây ra sự phá hoại sớm hơn là một trong hai ứng suất này tác dụng riêng rẽ. Cuối cùng, nếu có sự tách dọc cốt thép chịu kéo, nó sẽ làm giảm lực dính kết giữa cốt thép và bê tông tới một mức mà cốt thép sẽ bị kéo tuột khỏi bê tông. Điều này cũng có thể gây ra sự phá hoại của dầm hoặc nó đồng thời với việc bê tông bị ép vỡ.

2.3 Sự làm việc của dầm bê tông cốt thép có cốt thép đai thẳng đứng chịu cắt

Sự có mặt của cốt thép đai không có ảnh hưởng đáng kể nào trước khi hình thành các vết nứt xiên. Sau khi vết nứt xiên hình thành, cốt thép đai làm tăng

khả năng chịu cắt của dầm BTCT theo bốn cách khác nhau [5,6,7]:

- Một phần của lực cắt được chống lại thông qua các thanh thép đai ngang qua một vết nứt cụ thể. Cơ chế của khả năng chịu cắt tăng thêm này được thể hiện kỹ hơn như dưới đây;

- Sự có mặt của các thanh thép này hạn chế sự phát triển của các vết nứt xiên và làm giảm sự thâm nhập của nó vào vùng nén. Điều này tạo ra nhiều bê tông chưa bị nứt hơn tại đầu vết nứt cho việc chống lại ứng suất kết hợp của ứng suất kéo và nén;

- Cốt thép đai cũng làm cho các vết nứt khó mở rộng hơn và như vậy hai mặt của một vết nứt vẫn tiếp xúc với nhau. Điều này làm tăng lên đáng kể giá trị lực liên kết V_i ;

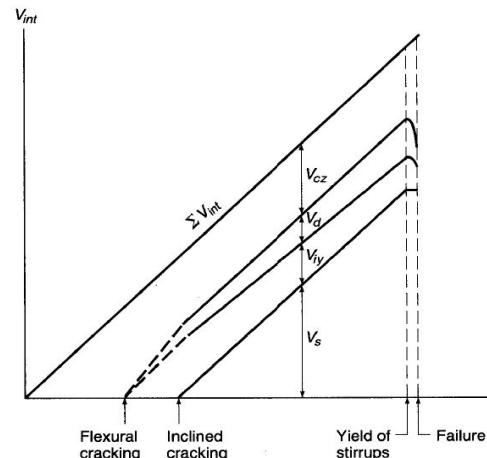
- Cốt thép dọc thường được bố trí ở góc của cốt thép đai, do vậy cốt thép đai sẽ kéo cốt thép dọc liên kết chặt với vùng bê tông hạn chế phía trong. Điều này cũng hạn chế phần nào việc tách của bê tông dọc theo cốt thép dọc chịu kéo và do đó làm tăng khả năng chịu cắt của lực chốt cốt thép dọc.

Như vậy, sự phá hoại do lực cắt sẽ xảy ra khi cốt thép đai bắt đầu chảy dẻo. Điều này không chỉ làm giảm khả năng chịu lực của chính cốt thép đai mà nó cũng làm cho các vết nứt mở rộng hơn và làm giảm khả năng chịu lực cắt.

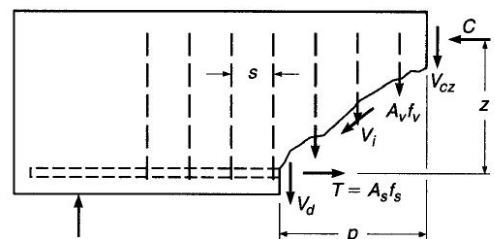
Vì cốt thép đai không hiệu quả trong các dầm không nứt nên độ lớn của lực cắt hoặc ứng suất tiếp mà gây ra nứt là giống như dầm không có cốt thép đai và có thể xác định gần đúng theo công thức (8). Các lực tác dụng lên một phần dầm có cốt thép đai đứng giữa vết nứt và gối tựa được thể hiện ở hình 5. Chúng gần giống như ở hình 3, chỉ khác ở chỗ mỗi cốt thép đai cắt qua vết nứt tạo ra một lực $A_v f_v$ trong phần dầm đang xét. Ở đây A_v là diện tích tiết diện ngang của toàn bộ các nhánh đai của một cốt thép đai và f_v là ứng suất kéo trong cốt thép đai. Cân bằng theo phương thẳng đứng: $V_{ext} = V_{cz} + V_d + V_{iy} + V_s$ (12); trong đó $V_s = nA_v f_v$ là lực thẳng đứng trong các cốt thép đai, n là số lượng cốt thép đai cắt qua vết nứt. Nếu s là khoảng cách giữa các cốt thép đai và p là hình chiếu của vết nứt nghiêng thì $n = p/s$.

Sự phân bố gần đúng của bốn thành phần lực cắt nội lực (vé phải của phương trình (12) với sự tăng dần của lực cắt bên ngoài V_{ext} được thể hiện theo sơ

đồ như hình 4. Có thể thấy, sau khi hình thành vết nứt xiên, phần lực cắt $V_s = nA_v f_v$ chịu bởi các cốt thép đai tăng tuyến tính với việc tải trọng tăng, các thành phần $V_{cz} + V_{iy} + V_d$ gần như là không đổi. Khi các cốt thép đai chảy dẻo, sự đóng góp của chúng là không đổi tại giá trị chảy dẻo $V_s = nA_v f_{yt}$, trong đó f_{yt} là cường độ chảy dẻo của cốt thép đai. Tuy nhiên do có sự mở rộng của vết nứt xiên và việc tách cốt thép dọc khỏi bê tông nên V_{iy} và V_d giảm đi rất nhanh. Điều làm cho vùng bê tông chịu nén sẽ chịu ứng suất lớn do lực cắt và uốn và dầm sẽ dễ dàng phá hoại. Trong khi khả năng chịu lực cắt tổng cộng của cốt thép đai đã biết, độ lớn riêng lẻ của ba thành phần còn lại trong công thức (12) là chưa biết. Rất ít các thí nghiệm và nghiên cứu lý thuyết cho đến ngày hôm nay có thể xác định giá trị của ba thành phần này [5,6,7]. Người ta thường được giả sử một cách an toàn rằng trước khi dầm có cốt thép đai phá hoại tổng của ba thành phần này bằng lực cắt gây nứt bê tông V_{cr} , xác định theo phương trình (8). Tổng này thường được coi một cách gần đúng là đóng góp của bê tông tới khả năng chịu cắt tổng cộng và được diễn tả bằng V_c . Do đó $V_c = V_{cr}$ và $V_c = V_{cz} + V_{iy} + V_d$ (12).



Hình 4. Sự phân bố của các lực cắt nội lực trong dầm với cốt đai đứng [6]



Hình 5. Cân bằng lực tại vết nứt kéo xiên trong dầm BTCT có cốt đai đứng chịu cắt [6]

Số lượng cốt thép đai n với khoảng cách s phụ thuộc vào chiều dài hình chiếu p của vết nứt xiên. Chiều dài này phụ thuộc vào góc nghiêng của vết nứt xiên. Nó có thể được giả sử bằng chiều cao làm việc

của dầm, d [6]; vì vậy $n=d/s$, có nghĩa là góc nghiêng của vết nứt nhỏ hơn 45° . Như vậy, tại trạng thái giới hạn về cường độ, khi $V_{ext} = V_n$, phương trình (12) và (12) cho ta cường độ chịu cắt danh định của dầm $V_n = V_c + \frac{A_v f_{yt} d}{s}$ (13); trong đó V_c được lấy bằng lực gây nứt do cắt của dầm chịu uốn và cắt, theo công thức:

$$v_{cr} = \frac{V_{cr}}{bd} = 0,16\sqrt{f'_c} + 17 \frac{\rho V d}{M} \leq 0,29\sqrt{f'_c} \quad (14)$$

3. Các cách tiếp cận để thiết kế cốt thép đai chịu cắt cho dầm chịu uốn theo ACI 318, EC2 và TCVN

Việc thiết kế dầm chịu cắt của EC2, ACI 318-08 và TCVN : 2012 đều dựa trên nhiều kết quả phân tích và thí nghiệm. Chúng dựa trên tiêu chí về sự hình thành vết nứt xiên do lực cắt và mô men gây ra. Giá trị góc nghiêng của vết nứt này được quy định khác nhau trong các tiêu chuẩn. Với ACI, góc nghiêng θ của vết nứt xiên được giả thiết thiên về an toàn với giá trị gần bằng 45° , tức là hình chiếu của tiết diện nghiêng lên phương nằm ngang bằng chiều cao làm việc của dầm d . Với EC2, giá trị góc nghiêng này được thay đổi từ 22° cho đến 45° , phụ thuộc vào điều kiện khác nhau của dầm. Việc giả thiết góc nghiêng của vết nứt hay

còn gọi là góc nghiêng của phần bê tông chịu nén trong hai tiêu chuẩn trên liên quan mật thiết tới việc xác định nội lực trong các thành phần của dầm khi chịu đồng thời uốn và cắt. Đối với tiêu chuẩn TCVN, việc giả thiết góc nghiêng này tương đương với việc xác định chiều dài của hình chiếu tiết diện nghiêng nguy hiểm nhất c_0 . Sự khác biệt cơ bản giữa TCVN với hai tiêu chuẩn trên là góc nghiêng θ trong TCVN được xác định thông qua việc cực tiểu hóa hàm khả năng chịu cắt của dầm trên các tiết diện nghiêng khác nhau, còn hai tiêu chuẩn còn lại thì thông qua thí nghiệm để đề xuất giá trị góc nghiêng này. Khi tính toán kiểm tra hoặc thiết kế cấu kiện chịu uốn-cắt, ba tiêu chuẩn đều chia chúng thành hai trường hợp: dầm BTCT có và không có cốt thép đai chịu cắt.

3.1 Dầm BTCT không có cốt thép đai chịu cắt

Khả năng chịu cắt của dầm phụ thuộc hoàn toàn khả năng chịu cắt của bê tông vùng nén, vào lực cắt liên kết giữa hai mặt của vết nứt và vào lực chốt của cốt thép dọc như đã trình bày ở các phần ở trên. Đối với ACI và EC2, thì tổng cộng của ba thành phần trên được quy đổi thành khả năng chịu cắt của bê tông V_c (ACI) và $V_{Rd,c}$ (EC2). Giá trị này được xác định theo công thức (16) và (17).

$$\text{ACI (đơn vị theo psi, kip, in): } V_c = \left(0,16\sqrt{f'_c} + 17 \frac{\rho V_u d}{M_u} \right) b_w d \approx 0,17\sqrt{f'_c} b_w d \leq 0,29\sqrt{f'_c} b_w d \quad (15)$$

$$\text{EC2 (đơn vị theo MPa, N, mm): } V_{Rd,c} = b_w d \left[(0,18/\gamma_c) k (100\rho_1 f_{ck})^{1/3} \right] \geq b_w d \left[(0,035) k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \right] \quad (16)$$

trong đó: f'_c hay f_{ck} là cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông; d là chiều cao làm việc của tiết diện, b_w là chiều rộng nhỏ nhất của dầm; $\rho = \rho_1 = A_{s1}/(b_w d) \leq 0,02$ là hàm lượng của cốt thép chịu kéo; A_{s1} là diện tích tiết diện ngang của cốt thép chịu kéo; M_u và V_u là mô men uốn và lực cắt tác dụng tại tiết diện đang xét; $k = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \leq 2,0$ là hệ số thực nghiệm; γ_c là hệ số an toàn của vật liệu bê tông thường lấy bằng 1,5.

$$\text{đơn vị theo MPa, N, mm: } Q \leq \frac{\varphi_{b4} (1 + \varphi_n) R_{bt} b h_0^2}{c} \text{ với } \varphi_{b3} (1 + \varphi_n) R_{bt} b h_0 \leq \frac{\varphi_{b4} (1 + \varphi_n) R_{bt} b h_0^2}{c} \quad (19)$$

trong đó: $\varphi_{b4} = 1$ cho bê tông nặng; $\varphi_n = 0$ đối với dầm; $\varphi_{b3} = 0,6$ đối với bê tông nặng; Q là lực cắt tác dụng tại tiết diện đó; R_{bt} là cường độ chịu kéo tính toán của bê tông; b là chiều rộng và h_0 là chiều cao làm việc.

Từ các công thức (16) đến (20), ta nhận thấy rằng có những sự khác biệt nhất định giữa các tiêu chuẩn về việc tính toán kiểm tra khả năng chịu cắt của dầm BTCT không có cốt thép đai.

Điều kiện kiểm tra hoặc thiết kế khả năng chịu cắt cho tiết diện theo ACI và EC2 là:

$$\text{ACI (đơn vị theo psi, kip, in): } V_u \leq \phi V_c \quad (17)$$

$$\text{EC2 (đơn vị theo MPa, N, mm): } V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \quad (18)$$

trong đó ϕ là hệ số giảm độ bền, lấy bằng 0.85; V_u , V_{Ed} là lực cắt tác dụng tại tiết diện đang xét.

Đối với TCVN, các thành phần tạo nên khả năng chịu cắt của bê tông không được trình bày cụ thể trong tiêu chuẩn, công thức kiểm tra khả năng chịu cắt trên tiết diện nghiêng nguy hiểm nhất là:

- Theo ACI và EC2, khả năng chịu cắt của bê tông phụ thuộc vào ba thành phần (1) khả năng chịu cắt của bê tông vùng nén; (2) lực dính kết giữa các vật liệu giữa hai mặt của vết nứt và (3) khả năng chịu cắt của cốt thép dọc hay còn gọi là lực chốt. Trong khi đó, các thành phần tạo nên khả năng chịu cắt của bê tông không được trình bày kỹ trong TCVN.

- Theo ACI và EC2, khả năng chịu cắt của bê tông tỷ lệ với căn bậc hai hoặc bậc ba cường độ chịu nén

đặc trưng của bê tông, trong khi đó theo TCVN, giá trị này tỷ lệ với cường độ chịu kéo tính toán của bê tông (bằng cường độ chịu kéo đặc trưng chia cho hệ số an toàn của vật liệu). Hệ số an toàn của vật liệu được đưa vào hệ số an toàn tổng thể trong ACI (thông qua ϕ ở công thức (18)), còn trong EC2 hệ số an toàn này được đưa vào ngay từ khi tính cường độ chịu cắt của bê tông (thông qua γ_c ở công thức (17)).

- Cả ACI và EC2 đều tính đến ảnh hưởng của cốt thép dọc đến khả năng chịu cắt của bê tông thông qua hệ số k và hàm lượng cốt thép dọc trong các công thức (16) hoặc (17). Trong khi đó, TCVN không đề cập đến vấn đề này.

- ACI cho phép tính đến sự kết hợp giữa mô men và lực cắt M_u và V_u khi xác định khả năng chịu cắt của bê tông (công thức (16)), trong khi đó EC2 và TCVN không đề cập đến tương tác này. Tuy nhiên, ACI cũng đưa ra giới hạn dưới cho khả năng chịu cắt của bê tông mà không tính đến giá trị M_u và V_u (giá trị xấp xỉ theo công thức (16)).

3.2. Dầm BTCT có cốt thép đai thẳng đứng chịu cắt

Khác biệt lớn nhất giữa các tiêu chuẩn khi tính toán cốt thép đai cho dầm là ACI và TCVN dựa trên các công thức thực nghiệm, trong khi đó, EC2 dựa trên cả các công thức thực nghiệm và mô hình tính toán lý thuyết giàn tương đương với góc nghiêng của vết nứt thay đổi để xác định nội lực trong các thành phần chịu lực cắt.

3.2.1. Theo ACI

Góc nghiêng của vết nứt do cắt gây ra trong dầm nghiêng với trục dầm khoảng 45° , thực chất ACI lấy một cách gần đúng rằng hình chiếu của vết nứt gây ra trong dầm do cắt lên trục hoành bằng với chiều cao làm việc của tiết diện. Thực nghiệm cho thấy rằng, giả thiết này là rất thiên về an toàn trong hầu hết các trường hợp dầm Bernoulli [5,6]. Dầm thiết kế chịu cắt phải thỏa mãn điều kiện: $V_u \leq \phi V_n$ (20), với V_n là khả

$$Q_b = \frac{\phi_{b2} (1 + \phi_f + \phi_n) R_{bt} b h_0^2}{c} \geq \phi_{b3} (1 + \phi_f + \phi_n) R_{bt} b h_0 \tag{25}$$

trong đó: $\phi_{b2} = 2$ với bê tông nặng; ϕ_f là hệ số xét đến ảnh hưởng của cánh chịu nén trong tiết diện chữ T và chữ I, nó bằng 0 với tiết diện chữ nhật; $\phi_n = 0$ đối với dầm vì lực dọc nhỏ; R_{bt} là cường độ chịu kéo tính toán của bê tông. $Q_{sw} = \frac{R_{sw} A_{sw}}{s} c$ là khả năng chịu cắt

năng chịu cắt của tiết diện cần tính cốt thép đai, $V_n = V_c + V_s$, tức là bằng khả năng chịu cắt của bê tông và cốt thép đai cộng lại; V_u là tổng lực cắt tính toán tại tiết diện đang xét. Với giả thiết vết nứt gần 45° như trên và chỉ xét cốt thép đai thẳng góc với trục dầm, điều kiện cường độ (20) được viết lại như sau:

$$V_u \leq \phi V_c + \frac{\phi A_v f_y d}{s} \tag{21}$$

Khả năng chịu cắt của bê tông V_c vẫn được tính toán như ở công thức (16) với điều kiện hạn chế là $V_u d \leq M_u$, để đảm bảo rằng vết nứt xiên sẽ được hình thành, và $\sqrt{f'_c} \leq 0,7 MPa$, để thể hiện khả năng chịu cắt tối đa của bê tông chỉ đạt đến 8 MPa trong mọi trường hợp.

Ngoài ra để đảm bảo rằng bê tông không bị ép vỡ trên dải nghiêng theo vết nứt, ứng suất cắt trung bình trên tiết diện phải thỏa mãn $v = \frac{V_u}{b_w d} \leq 0,07 \sqrt{f'_c}$ (22).

Nếu điều kiện (22) không được thỏa mãn, chúng ta phải tăng kích thước tiết diện hoặc tăng cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông. Việc thiết kế chịu cắt theo ACI khá đơn giản, thông thường chúng ta sẽ tính khả năng chịu cắt của bê tông, giả thiết đường kính cốt thép đai theo cốt thép dọc trong dầm rồi từ đó xác định khoảng cách cốt thép đai phụ thuộc vào giá trị lực cắt tính toán theo phương trình (22).

3.2.2. Theo TCVN 5574:2012

Điều kiện kiểm tra đầu tiên khi thiết kế cốt thép đai cho dầm BTCT chịu cắt là kiểm tra khả năng chịu lực trên dải nghiêng giữa các vết nứt: $Q \leq 0,3 \phi_{w1} \phi_{b1} R_b b h_0$ (23); trong đó $\phi_{w1} = 1 + 5\alpha \mu_w \leq 1,3$ với $\alpha = E_s/E_b$, $\mu_w = A_{sw}/(bs)$; $\phi_{b1} = 1 - 0,1R_b$ cho bê tông nặng, R_b là cường độ chịu nén tính toán của bê tông, theo MPa; h_0 là chiều cao làm việc của tiết diện. Nếu điều kiện (23) không được đảm bảo, chúng ta phải tăng kích thước tiết diện hoặc tăng cấp độ bền của bê tông chịu nén. Điều kiện kiểm tra cường độ đối với dầm chịu cắt là $Q \leq Q_b + Q_{sw}$ (24). Q_b là khả năng chịu cắt của bê tông, xác định theo công thức:

của các cốt thép đai mà mặt cắt nghiêng của vết nứt cắt qua, với R_{sw} mà cường độ chịu cắt tính toán của cốt thép đai và A_{sw} là diện tích tiết diện ngang của 1 đai. Tiêu chuẩn TCVN không đề cập tới góc nghiêng của vết nứt này mà dựa trên việc cực tiểu hóa về phải của phương trình (24), để từ đó đi tìm tiết diện

ngiêng nguy hiểm nhất c_0 . Dễ dàng nhận được

$$c_0 = \sqrt{\frac{\varphi_{b2}(1 + \varphi_n + \varphi_f) R_{bt} b h_0^2 s}{R_{sw} A_{sw}}} \text{ từ việc xác định}$$

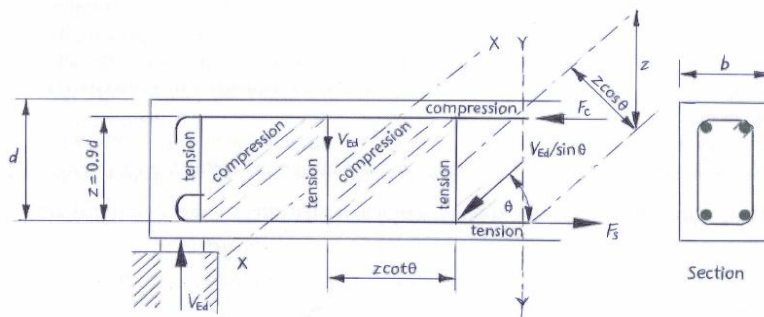
$dQ_{sw}/d_c = 0$. Do đó khả năng chịu cắt tối thiểu của cốt thép đai trên tiết diện nghiêng nguy hiểm nhất là:

$$Q_{sw} = \frac{R_{sw} A_{sw}}{s} c_0 \quad (26)$$

Thay giá trị Q_{sw} từ phương trình (26), giá trị c_0 đã tìm được ở trên và các hệ số cho bê tông nặng, công thức kiểm tra hoặc thiết kế cốt thép đai sẽ trở thành:

$$Q \leq \sqrt{8 R_{bt} h_0^2 b \frac{A_{sw} R_{sw}}{s}} \quad (27) \text{ [11]. Phương trình (27)}$$

dùng để thiết kế cốt thép đai chịu lực cắt.



Hình 6. Sự phân bố của các lực cắt nội lực trong dầm với cốt đai đứng [7]

Cần nhấn mạnh rằng, mô hình giàn ảo thể hiện ứng xử chịu cắt tất cả các lực cắt sẽ được chịu bởi các cốt thép đai thẳng đứng mà không có sự tham gia của bê tông. Góc nghiêng θ tăng với độ lớn của lực cắt lớn nhất trong dầm và vì vậy với các lực nén trong các thanh giàn xiên. EC2 quy định rằng góc nghiêng này thay đổi từ 22° đến 45° . Trong hầu hết các trường hợp chịu tải trọng phân bố đều thì góc nghiêng này là 22° nhưng đối với các tải trọng tập trung lớn nó có thể lớn hơn để chống lại việc ép vỡ bê tông của thành phần xiên này. Việc phân tích nội lực theo mô hình giàn này sẽ được thực hiện theo cách thức sau:

- Giả thiết cường độ chịu nén của thanh giàn xiên bê tông và góc nghiêng θ của nó;
- Tính toán cốt thép chịu cắt yêu cầu A_{sw}/s cho các thanh giàn thẳng đứng;
- Tính toán cốt thép chịu kéo phụ thêm A_{sl} cho thanh giàn ở phía dưới.

$$\text{Vậy} \quad V_{Rd,max} = (f_{ck} b_w z \cos \theta \sin \theta) / 1,5 = \frac{f_{ck} b_w z}{1,5 (\cot \theta + \tan \theta)}$$

Theo EC2 [8], phương trình này được thay đổi bởi việc thêm vào hệ số v_1 kể để cường độ bê tông bị giảm xuống khi nứt do cắt, nên $V_{Rd,max} = \frac{f_{ck} b_w z v_1}{1,5 (\cot \theta + \tan \theta)}$. Với $v_1 = 0,6 (1 - f_{ck}/250)$ và thay thế $z = 0,9d$ ta có:

3.2.3. Theo EC2

Với cách tiếp cận hoàn toàn khác, EC2 dựa trên mô hình giàn ảo với phương pháp góc nghiêng của phần bê tông chịu nén thay đổi để thiết kế cốt thép đai chịu cắt cho dầm BTCT. Để xác định các phương trình tính toán, tác động của một dầm BTCT khi chịu cắt được đại diện bởi một hệ giàn ảo tương đương như trên hình 6. Bê tông tác dụng như thanh chịu nén ở đỉnh và các thanh chịu nén xiên nghiêng một góc θ so với trục hoành. Thanh ở đáy giàn ảo là cốt thép kéo nằm ngang và các thanh cốt thép đai sẽ tạo thành các thành phần thẳng đứng chịu kéo của giàn.

a. Dải bê tông chịu nén và góc nghiêng θ

Lực cắt tác dụng lên tiết diện phải được hạn chế sao cho các ứng suất nén quá lớn không xảy ra trong thanh giàn chịu nén dẫn đến sự phá hoại của bê tông chịu nén. Vì vậy lực cắt thiết kế lớn nhất $V_{Rd,max}$ được hạn chế bởi cường độ chịu nén của thanh giàn xiên và thành phần đứng của nó trong mô hình giàn trên. Dựa vào hình 6, diện tích tiết diện ngang hiệu quả của bê tông tác dụng như một thanh giàn xiên chịu nén được xác định bởi $b_w \times z \cos \theta$ và ứng suất chịu nén thiết kế của bê tông $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c = f_{ck} / 1,5$. Ta có: Cường độ tối đa của thanh dạng chịu nén = Ứng suất thiết kế lớn nhất \times diện tích tiết diện ngang = $(f_{ck} / 1,5) \times (b_w \times z \cos \theta)$ và thành phần đứng của nó = $[(f_{ck} / 1,5) \times (b_w \times z \cos \theta)] \times \sin \theta$.

$$V_{Rd,max} = \frac{0,36b_w d (1 - f_{ck} / 250) f_{ck}}{(\cot \theta + \tan \theta)} \quad (28)$$

Để đảm bảo thanh giàn xiên chịu nén không bị ép vỡ, ta cần kiểm tra điều kiện $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$ (29), với V_{Ed} là giá trị lực cắt ngoại lực tại tiết diện cần tính cốt thép đai. Điều kiện này cần phải kiểm tra cho giá trị lực cắt lớn nhất trên suốt chiều dài dầm, thông thường tại vị trí mép gối tựa, V_{Ef} , nên $V_{Ef} \leq V_{Rd,max}$.

Như đã đề cập ở trên, EC2 quy định góc nghiêng θ thay đổi từ 22° đến 45° .

- Với $\theta = 22^\circ$ (thường phù hợp với tải trọng phân bố đều):

Từ phương trình (29) ta có:
 $V_{Rd,max(22)} = 0,124b_w d (1 - f_{ck} / 250) f_{ck} \quad (30)$

Nếu $V_{Rd,max(22)} \leq V_{Ef}$ thì một giá trị lớn hơn của θ nên được lựa chọn sao cho dải bê tông chịu nén xiên có giá trị thành phần đứng cân bằng với V_{Ed} .

- Với $\theta = 45^\circ$ (giá trị lớn nhất của θ cho phép bởi EC2):

Từ phương trình (29) ta có:
 $V_{Rd,max(45)} = 0,18b_w d (1 - f_{ck} / 250) f_{ck}$ (32). Đây là giá trị cận trên của cường độ thanh giàn xiên chịu nén trong mô hình giàn tương đương. Nếu $V_{Rd,max(22)} \leq V_{Ef}$ thì ta phải tăng kích thước tiết diện hoặc tăng cường độ chịu nén đặc trưng của bê tông.

- Với θ nằm giữa 22° và 45° :

Giá trị cần thiết của θ có thể xác định từ việc cân bằng $V_{Rd,max} = V_{Ed}$ và việc xác định θ từ phương trình (28) như sau: $V_{Ed} = V_{Rd,max} = \frac{0,36b_w d (1 - f_{ck} / 250) f_{ck}}{(\cot \theta + \tan \theta)}$. Vì $\frac{1}{(\cot \theta + \tan \theta)} = \sin \theta \cos \theta = 0,5 \sin(2\theta)$ nên ta có được:

$$\theta = 0,5 \sin^{-1} \left\{ \frac{V_{Ed}}{0,18b_w d (1 - f_{ck} / 250) f_{ck}} \right\} \leq 45^\circ \text{ hay } \theta = 0,5 \sin^{-1} \left\{ \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max(45)}} \right\} \leq 45^\circ \quad (31)$$

b. Cốt thép đai thẳng đứng

Như đã đề cập, tất cả lực cắt sẽ được kháng lại bởi các cốt thép đai mà không có sự đóng góp nào từ khả năng chịu cắt của bản thân bê tông. Sử dụng các phương pháp của mặt cắt ta có thể thấy tại mặt cắt X-X như trên hình 6, nội lực trong các cốt thép đai đứng (V_{wd}) phải cân bằng với lực tác dụng (V_{Ed}), tức là:

$$V_{wd} = V_{Ed} = f_{ywd} A_{sw} = \frac{f_{yk} A_{sw}}{\gamma_s} = \frac{f_{yk} A_{sw}}{1,15} = 0,87 f_{yk} A_{sw}$$

Nếu tất cả các cốt thép đai được đặt với một khoảng cách s , số lượng đai trên đoạn chiều dài đi qua khe nứt $z \cot \theta$ là $(z \cot \theta) / s$; do đó lực cắt trong mỗi cốt thép đai sẽ bị giảm một cách tương ứng và được xác định bởi $V_{wd} = V_{Ed} = 0,87 f_{yk} A_{sw} \frac{z \cot \theta}{s}$. Nếu thay thế $z = 0,9 d$, ta rút ra được: $\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{0,78 d f_{yk} \cot \theta}$ (32)

Phương trình (34) dùng để bố trí cốt thép đai và sẽ phụ thuộc vào giá trị góc nghiêng θ sử dụng trong quá trình tính toán. Đối với hầu hết các trường hợp với các tải trọng phân bố đều góc nghiêng θ sẽ bằng 22° và $\cot \theta = 2,5$. Nếu không thì giá trị θ sẽ được xác định từ phương trình (33). Phương trình (34) có thể được sắp xếp lại để xác định khả năng chịu lực của cốt thép đai $V_{Rd,s}$ đối với một hình dạng cốt thép đai nhất định A_{sw}/s .

Ta có $V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} 0,78 d f_{yk} \cot \theta \quad (33)$

Thông thường, việc thiết kế cốt thép đai thường được thực hiện theo phương pháp thử và sai, có nghĩa là chúng ta lựa chọn hình dạng cốt thép đai,

khoảng cách rồi đi xác định khả năng chịu lực cắt là giá trị nhỏ hơn trong hai phương trình (29) và (35) sau đó so sánh với giá trị V_{Ed} .

c. Lực dọc tác dụng phụ thêm trong cốt thép chịu uốn

Khi sử dụng phương pháp giàn ảo để tính toán cốt thép đai, ta phải kể thêm một lực dọc tác dụng lên cốt thép chịu kéo gây ra bởi V_{Ed} . Lực kéo dọc ΔF_{ld} được gây ra bởi các thành phần ngang để cân bằng với lực nén trong thanh giàn nén nghiêng. Giải lại các lực ngang trong mặt cắt Y-Y như trên hình 6, thành phần lực dọc trong thanh giàn chịu nén là: Lực dọc = $(V_{Ed} / \sin \theta) \times \cos \theta = V_{Ed} \times \cot \theta$. Nếu giả sử rằng, một nửa lực này được chịu bởi cốt thép trong vùng kéo

của dầm và được xác định theo: $\Delta F_{td} = 0,5 V_{Ed} \times \cot\theta$ (34).

Để chịu được lực dọc phụ thêm này, tại bất kỳ tiết diện nào, ta cần phải cung cấp thêm một lượng cốt thép dọc bổ sung cho cốt thép dọc được thiết kế chịu uốn thông thường. Trong thực tế, việc tăng chiều dài cốt thép của cốt thép dọc chịu kéo phía dưới thường đảm bảo điều kiện yêu cầu nêu ở trên.

3.2.4. Nhận xét

Sự khác nhau giữa việc thiết kế cốt thép đai thẳng đứng trong các tiêu chuẩn có thể được tổng hợp như sau:

- ACI và TCVN chủ yếu dựa trên sự làm việc thực nghiệm để hình thành công thức tính toán cốt thép đai. Cả hai tiêu chuẩn này đều kể đến sự đóng góp của bê tông vào khả năng chịu cắt tổng thể của dầm. Trong khi đó EC2 dựa trên cả thực nghiệm lẫn mô hình giàn ảo dùng để xác định nội lực trong các thành phần của dầm. EC2 không kể đến sự đóng góp của bê tông tới khả năng chịu cắt tổng thể của dầm khi có cốt thép đai;

- Tương tự như trường hợp dầm bê tông cốt thép không có cốt thép đai, việc thiết kế cốt thép đai của ACI dựa trên thực nghiệm với vết nứt nghiêng với trục hoành một góc khoảng 45° ; TCVN thì dựa trên tiết diện nghiêng nguy hiểm nhất, thông qua mô hình đai số; EC2 dựa trên thực nghiệm và mô hình giàn ảo đơn giản với góc nghiêng thay đổi từ 22° đến 45° , phụ thuộc vào tải trọng và dạng liên kết của dầm;

- Khi thiết kế cốt thép đai TCVN không kể đến sự tương tác giữa mô men uốn và lực cắt và sự có mặt của cốt thép dọc; ACI và EC2 thì kể đến nó khi tính toán khả năng chịu lực cắt của bê tông;

- Với các công thức lập được, việc tính toán cốt thép đai của cả ba tiêu chuẩn đều khá giống nhau, hoặc dựa trên phương pháp thử và sai hoặc dựa trên việc giả thiết đường kính cốt thép đai, số nhánh của nó rồi đi tính toán khoảng cách cần thiết để nó chịu đủ lực cắt ngoại lực trên tiết diện nghiêng;

- Với việc sử dụng mô hình giàn ảo, EC2 cho chúng ta hiểu rõ hơn nguyên nhân tại sao cần kéo dài cốt thép dọc chịu kéo ở phía dưới của cấu kiện, với mục đích là đảm bảo khả năng chịu lực phụ thêm trong cốt thép dọc chịu kéo do lực cắt gây ra.

4. Kết luận

Trong bài báo này, ứng xử của dầm BTCT chịu uốn và cắt đã được trình bày dựa trên tổng hợp một số tài liệu đã xuất bản. Bên cạnh đó, việc thiết kế cắt

cho dầm BTCT theo ba tiêu chuẩn TCVN, ACI và EC2 cũng đã được giới thiệu. Thông qua ứng xử của dầm BTCT khi chịu uốn, cắt và việc so sánh ba tiêu chuẩn này chúng ta có thể rút ra một số kết luận sau:

Dầm BTCT có thể bị phá hoại trên tiết diện nghiêng do sự kết hợp giữa uốn và cắt. Vết nứt xiên có góc nghiêng thay đổi, tùy thuộc vào loại tải trọng tác dụng và vào liên kết của dầm. Ứng xử của dầm phụ thuộc vào khả năng chịu nén trên tiết diện nghiêng và vào khả năng chịu cắt của dầm trên tiết diện nghiêng đó, bao gồm bốn thành phần chính (1) khả năng chịu cắt của vùng bê tông chưa bị nứt (V_{cz}); (2) khả năng chịu cắt do liên kết các thành phần cấp phối giữa hai mặt của vết nứt (V_{ly}); (3) khả năng chịu cắt của cốt thép dọc (V_d); (4) khả năng chịu cắt của cốt thép đai ($V_{Rd,s}$).

Tiêu chuẩn EC2 bỏ qua sự đóng góp của bê tông cho khả năng chịu cắt của dầm nhưng góc nghiêng của vết nứt thay đổi tùy thuộc vào tải trọng. Ngược lại, ACI và TCVN có kể đến sự đóng góp của bê tông khi chịu cắt nhưng góc nghiêng của vết nứt cố định.

Việc áp dụng ACI là dễ dàng nhất vì các điều khoản tính toán rõ ràng và đơn giản. EC2 là tiêu chuẩn thể hiện rõ nhất sự làm việc của dầm khi chịu uốn và cắt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. LÊ NGỌC HỒNG, “Sức bền vật liệu”, Nhà xuất bản khoa học kỹ thuật, 2006.
2. TCVN 5574:2012, “Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép – Tiêu chuẩn thiết kế”, Nhà xuất bản Xây dựng, 2012.
3. ACI 318 – 08, “Building Code Requirements for Structural concrete (ACI 318 – 08) and Commentary”, American Concrete Institute, 2008.
4. Eurocode 2, EN1992-1-1, “Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”, 2004.
5. R. PARK and T. PAULAY, “Reinforced Concrete Structures”, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York, London, Sydney and Toronto, 1974.
6. ATHUR H. NILSON, DAVID DARWIN, CHARLES W.DOLAN, “Design of Concrete Structures”, Mc Graw Hill Higher Education, 14th edition, 2010.
7. R. S. NARAYANAN and A. BEEBY, “Designer’s Guide to EN1992-1-1 and EN1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures. General rules and rules for buildings and structural fire design” Thomas Telford Publication, 2005.
8. PHAN QUANG MINH, NGÔ THẾ PHONG, NGUYỄN ĐÌNH CÔNG, “Kết cấu bê tông cốt thép – Phần Cấu kiện cơ bản”, Nhà xuất bản khoa học kỹ thuật, 2006.

Ngày nhận bài sửa: 2/9/2014.