

Xác định cốt thép gia cường trong vùng neo cáp dầm dự ứng lực căng sau

Reinforcement determination for anchorage zones of post-tensioned concrete beams

Mai Lưu

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Tác giả liên hệ: luu.mai@ut.edu.vn

Ngày nhận bài: 12/6/2023; Ngày chấp nhận đăng: 12/7/2023

Tóm tắt:

Trong các dầm dự ứng lực căng sau, lực căng cáp tạo ra lực nén tập trung tại đầu dầm rất lớn thông qua áp lực trên các đầu neo. Các lực tập trung này có thể gây nứt chẻ đầu dầm nếu như bê tông tại khu vực neo cáp không được gia cường cốt thép một cách hợp lý. Bài báo trình bày cách xác định lượng cốt thép gia cường do lực nén của cáp tạo ra bằng phương pháp giải tích qua mô hình cân bằng ứng suất làm việc trong giai đoạn đàn hồi tuyến tính và phương pháp thiết kế cốt thép dựa trên mô hình giàn ảo được thiết lập theo trường ứng suất chính hay các dòng lực được hình thành trong kết cấu. Một số kết quả tính toán cho những kết cấu cụ thể được phân tích để làm rõ các phương pháp trình bày.

Từ khóa: Vùng neo; Xé vỡ; Ép vỡ; Mô hình giàn ảo; Dầm dự ứng lực căng sau.

Abstract:

In post-tensioned concrete beams, the high concentrated compressive forces are transmitted to the concrete zones at the beam ends through the anchorage devices. As a result, they can burst and split if the concrete is not adequately reinforced. The paper determines the reinforcement in anchorage zones with axially loaded post-tensioned tendons using the linear elastic analysis method, which involves computing the state of stresses as linearly elastic, and the equilibrium-based plasticity approach method as strut-and-tie models to provide prestressing force paths as a truss structure. Some numerical models are also analyzed to clarify the present methods.

Keywords: Anchorage zone; Bursting; Splitting; Strut-and-tie model; Post-tensioned concrete beams.

1. Giới thiệu

Vấn đề về vùng neo trong dầm bê tông có dự ứng lực căng sau, bị gia tăng ứng suất đột ngột do lực cáp truyền vào hệ neo đầu dầm lớn trên kích thước neo tương đối nhỏ. Do đó, khu vực bê tông tại các đầu neo với ứng suất kéo và nén lớn có thể gây nứt đầu dầm. Theo Breen [1], hiện tượng nứt tại vùng neo có thể chia ra làm ba loại: Nứt do xé vỡ (bursting cracking), nứt do ép vỡ (spalling cracking) và nứt do ứng suất kéo theo mép dọc (longitudinal edge tension) và do đó trong quá trình thiết kế dầm dự ứng lực cần có biện pháp gia cường để tránh các vết nứt này. Trong kiểm toán ở trạng thái giới hạn sử

dụng, việc kiểm soát hiện tượng nứt tại vùng neo chủ yếu qua hai vấn đề: Xác định lực tác dụng tương ứng với việc hình thành những vết nứt đầu tiên và kiểm soát sự phát triển bề rộng vết nứt thông qua bố trí hợp lý cốt thép gia cường ở đầu dầm. Tuy nhiên, theo nghiên cứu của Breen, việc xác định lực gây nứt tại vùng neo thực tế không đơn giản, ngay cả trong trường hợp làm thực nghiệm. Điều này xuất hiện do ứng suất tại vùng neo phân bố khá phức tạp và việc xác định cường độ chịu kéo của bê tông ở trạng thái ứng suất hai trục gần như không thực hiện. Những năm gần đây, nhiều nghiên cứu cũng đã tiếp cận mô hình phân tử hữu hạn để giải quyết

các bài toán vùng neo. Trong nghiên cứu của Okumus [2], tác giả đã sử dụng mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến để phân tích vết nứt ngang tại khu vực đầu dầm do lực cáp tạo ra và xét các hiện tượng khác như ảnh hưởng nhiệt độ, co ngót, từ biến có thể làm tăng độ mở rộng vết nứt tại đầu dầm. Kết quả nghiên cứu cho thấy, việc sử dụng phần tử hữu hạn là công cụ rất hữu hiệu để phân tích nứt, tuy nhiên, mô hình này phụ thuộc rất nhiều vào các thông số đầu vào và đây là một thách thức lớn trong mô phỏng phần tử hữu hạn phi tuyến. Trong nghiên cứu của Van Meirvenne [3], tác giả đã sử dụng mô hình phần tử hữu hạn phi tuyến để phân tích hiện tượng nứt vùng neo; trong nghiên cứu, tác giả xét đến trường hợp phân bố nhiều tao cáp đơn trên mặt cắt ngang dầm trong dầm căng trước và có đường kính khác nhau để tìm lực cáp tới hạn có thể gây nứt đầu dầm.

Nhìn chung, ứng suất khu vực dầm tại đầu neo là khá phức tạp, có phân bố ứng suất không mềm mại và do đó, không thể dùng lý thuyết cơ học vật liệu thông thường để phân tích. Vùng ứng suất này thường được gọi là vùng D (discontinuous regions) và phân bố biến dạng trên vùng D cũng là phi tuyến. Vì vậy, phương pháp thiết kế theo mô hình mặt cắt phẳng không thể áp dụng trên vùng này. Theo nguyên lý Saint-Venant (St.Venant), vùng phi tuyến này có thể kéo dài khoảng từ 1 đến 2 lần kích thước đặc trưng của cấu kiện.

Hiện nay, việc thiết kế cốt thép gia cường vùng neo cáp có thể tiếp cận bằng nhiều phương pháp khác nhau như được trình bày ở trên. Tuy nhiên, theo các tiêu chuẩn thiết kế hiện đại như AASHTO-LRFD, CSA A23.3, CEB-FIP Model Code 90, ... và Tiêu chuẩn Thiết kế cầu của Việt Nam - TCVN 11823-2017, việc thiết kế cốt thép trong dầm bê tông cốt thép tại vùng neo cáp có thể dùng các cách tiếp cận như: Mô hình phi đàn hồi dựa trên sự cân bằng lực và điển hình là mô hình giàn ảo; mô hình phân tích ứng suất với giả thiết kết cấu làm việc vẫn

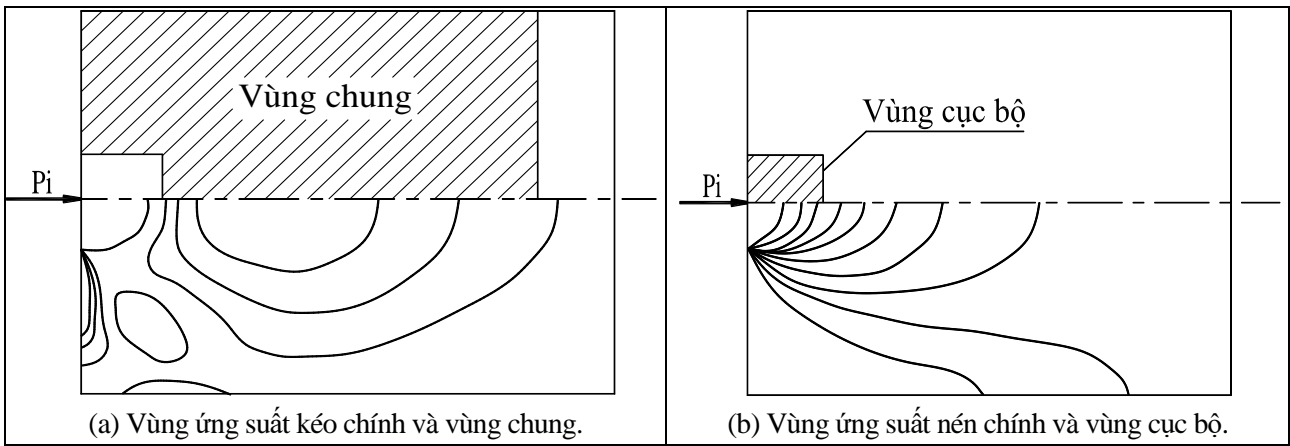
trong giai đoạn đàn hồi tuyến tính và các phương pháp gần đúng khác.

Mặc dù có khá nhiều báo cáo nghiên cứu được công bố trong và ngoài nước về phân tích, thiết kế gia cường ứng suất vùng neo cáp dự ứng lực, cũng như các quy định được nêu ra trong nhiều tiêu chuẩn thiết kế, tuy nhiên, mức độ trình bày chi tiết để áp dụng thực tế còn hạn chế ở các tài liệu công bố, gây khó khăn trong việc tiếp cận [4], [5]. Trong TCVN 11823-2017, các phương pháp phân tích vùng neo cáp đã được nêu tại mục 5.10.9 và 5.10.10, tuy nhiên chi tiết phương pháp phân tích ứng suất đàn hồi tuyến tính và các mô hình STM điển hình cho vùng neo không được trình bày. Vì vậy, việc làm rõ hơn nội dung của các phương pháp trên là rất cần thiết trong việc thiết kế các dầm dự ứng lực hiện nay để tránh những sự cố nứt đầu dầm có thể xảy ra, đặc biệt là trong quá trình căng cáp.

Trong bài báo này, hai phương pháp xác định cốt thép gia cường vùng neo được trình bày, đó là phương pháp phân tích ứng suất đàn hồi tuyến tính và mô hình giàn ảo. Ưu điểm của các phương pháp trình bày là tính toán khá đơn giản nên phù hợp với kỹ sư để vận dụng trong thiết kế và các tham số thiết kế trong mô hình cũng được quy định khá rõ ràng trong các tiêu chuẩn hiện hành TCVN 11823-2017, AASHTO-LRFD và ACI 318-19.

2. Các phương pháp thiết kế cốt thép vùng neo dầm bê tông cốt thép dự ứng lực căng sau

Vùng neo có thể được định nghĩa là vùng bê tông tính từ vị trí lực tập trung do cáp dự ứng lực đến mặt cắt dầm khi ứng suất được phân bố một cách tuyến tính trên toàn bộ mặt cắt ngang dầm [6]. Theo nguyên lý St.Venant, vùng này có thể lấy xấp xỉ bằng chiều cao dầm. Vùng neo thường được chia thành hai loại là vùng chung (general zone) và vùng cục bộ (local zone). Vùng chung là trùng với vùng neo như được định nghĩa ở trên, và vùng cục bộ là vùng bê tông nằm ngay sau hệ neo cáp, như được thể hiện trong hình 1.



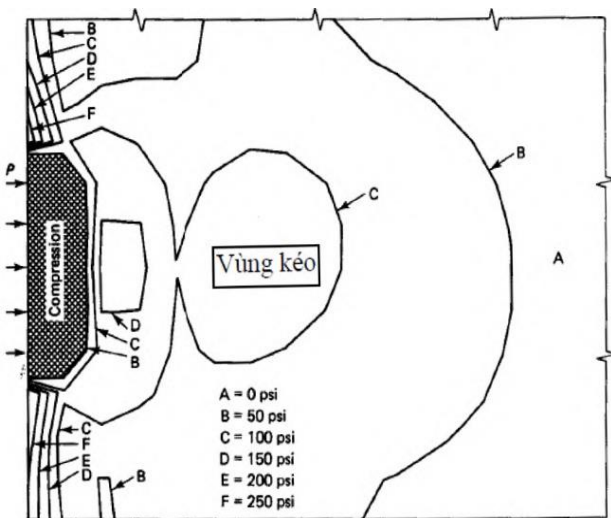
Hình 1. Các dạng vùng neo [1].

Các phương pháp xác định cốt thép gia cường vùng neo được trình bày trong bài báo này chủ yếu dùng để thiết các cốt thép ở vùng chung.

2.1. Phương pháp phân tích ứng suất đàn hồi tuyến tính

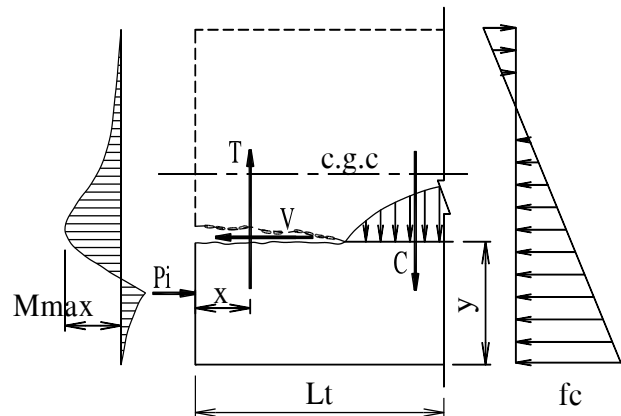
Theo Nawy [6], trong phân tích các trường ứng suất kéo và nén chính, vùng neo có thể tồn tại ba vùng cấp độ ứng suất như sau:

- Vùng ứng suất nén lớn xuất hiện trong vùng bê tông ngay sau đầu neo cáp dự ứng lực. Việc thiết kế cốt thép để kiểm chế nở hông tại khu vực này là rất cần thiết để tránh phá hoại nén và được thể hiện ở vùng tô đậm như trong hình 2.
- Vùng ứng suất kéo lớn sau neo, cụ thể như vùng C trên hình 2.
- Vùng ứng suất nén lân cận vùng ứng suất nén lớn, cụ thể là vùng D và vùng E như hình 2.



Hình 2. Đường đồng ứng suất tại vùng neo [6].

Việc phân chia các vùng trên để hiểu rõ hơn các trạng thái ứng suất khác nhau xuất hiện trong vùng neo và từ đó có mô hình tính toán phù hợp trong thiết kế thép gia cường vùng neo. Phương pháp phân tích ứng suất đàn hồi tuyến tính (ESA) dựa trên các phương trình cân bằng lực và phân tích ứng suất tại vị trí mặt cắt có phân bố ứng suất tuyến tính theo chiều cao thiết diện hay gọi là vùng C. Kích thước vùng này dựa trên nguyên lý St. Venant. Phương pháp ESA có thể xác định tương đối chính xác vị trí vết nứt đầu dầm thông qua biểu đồ phân bố momen theo chiều cao dầm [6]. Diện tích cốt thép chịu kéo trong vùng neo cũng được xác định dựa trên biểu đồ phân bố momen này.



Hình 3. Phân tích lực theo phương pháp ESA tại vùng neo [6].

Trên hình 3, các ứng suất tại các vùng khác nhau quanh khu vực neo do lực cáp ứng suất trước P_i tại đầu dầm và biểu đồ phân bố momen theo chiều cao dầm được thể hiện. Giá trị momen lớn nhất trên biểu đồ có thể cho thấy khả năng xuất hiện vết nứt xé vỡ do cáp dự ứng lực tác dụng đầu dầm.

Momen này được cân bằng với lực kéo T của cốt thép chịu kéo được bố trí theo phương đứng và lực nén C do phần bê tông cuối đoạn dầm tạo ra. Lực cắt V theo phương ngang ở tại mặt cắt nứt tách được cân bằng với lực chèn móc của cốt liệu dọc theo vết nứt. Theo nghiên cứu Nawy [6], vị trí của lực kéo T liên quan đến phạm vi bố trí thép đai gia cường chống nứt vùng neo và thường nằm trong khoảng từ $h/5$ đến $h/3$, trong đó h là chiều cao dầm.

Theo hình 3, bằng cách cân bằng ứng suất f_c và lực nén do áp dụng lực P_i , khi đó giá trị momen tại tọa độ y theo phương đứng tính từ đáy dầm có thể được xác định theo phương trình (1) như sau:

$$M(y) = \sum_{i=1}^n P_i (y - y_{pi}) + \int_0^y f_c b (y - y_c) dy \quad (1)$$

$$y_c = \frac{\int_0^y f_c b y dy}{\int_0^y f_c b dy} \quad (2)$$

Trong đó: $M(y)$ là momen tại tọa độ y tính từ đáy thiết diện dầm; $f_c(y)$ là ứng suất phân bố theo phương đứng tại mặt cắt có ứng suất dầm được phân bố theo quy luật đàn hồi tuyến tính và thông thường lấy cách đầu dầm một đoạn bằng chiều cao dầm; b là bề rộng dầm có xét biến thiên theo chiều cao tại mặt cắt đang xét; P_i là lực áp nén đầu dầm tại vị trí tọa độ y_{pi} ; n là số lực tập trung P_i nằm trong khoảng từ đáy dầm đến tọa độ y đang xét. Bằng cách cân bằng momen theo sơ đồ hình 3, lực kéo tương đương trong cốt thép đứng T có thể được xác định như sau [6]:

$$T = \frac{M_{\max}}{h - x} \quad (3)$$

Trong đó, x là khoảng cách từ đầu dầm đến vị trí lực kéo T , khoảng cách x này có thể lấy từ $h/3$ đến $h/5$. Khi đó, tổng diện tích thép yêu cầu được xác định theo phương trình sau:

$$A_s = \frac{T}{f_s} \quad (4)$$

Trong đó, f_s là ứng suất trong cốt thép. Theo tiêu chuẩn TCVN 11823-2017, trường hợp kiểm tra bề rộng vết nứt vùng neo thì ứng suất trong thép lấy không vượt quá 140 MPa.

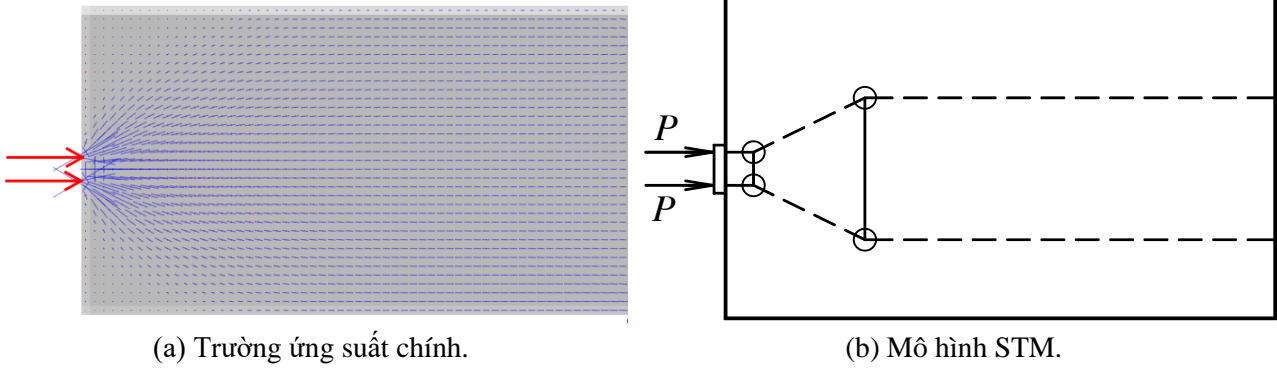
Dựa vào các phương trình từ (1) đến (4) thì diện tích cốt thép gia cường tại vùng neo đầu dầm A_s có thể được xác định.

2.2. Phương pháp tính cốt thép vùng neo bằng mô hình giàn ảo

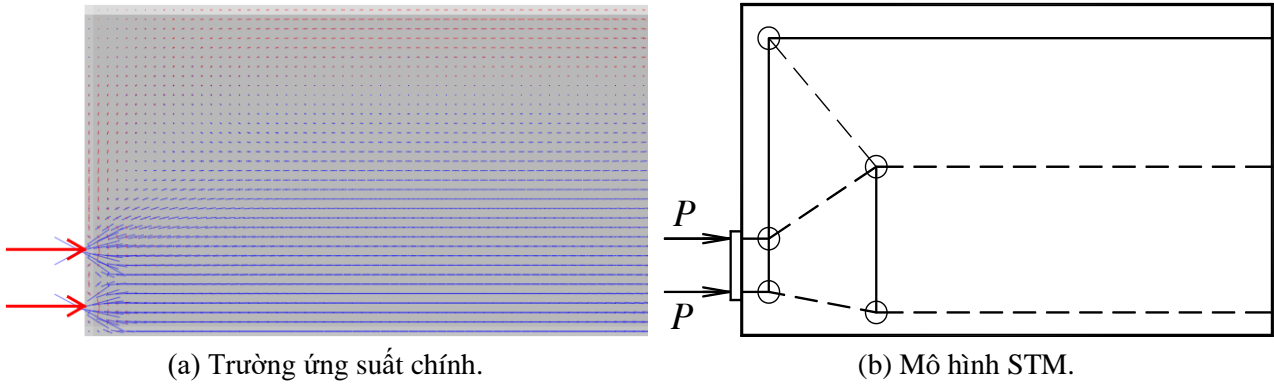
Mô hình giàn ảo (STM) dùng để thiết kế các vùng không liên tục về mặt hình học và tĩnh học (vùng D) trong các kết cấu bê tông cốt thép thường và dự ứng lực. Mô hình này có thể làm giảm độ phức tạp phân tích ứng suất trong vùng D bằng cách tạo ra một hệ thanh chỉ có lực dọc trục.

Mô hình giàn ảo đã chính thức áp dụng trong nhiều tiêu chuẩn tiên tiến trên thế giới trong đó có Tiêu chuẩn TCVN 11823-2017. Việc thiết lập sơ đồ hệ thanh là rất quan trọng trong phương pháp STM. Sơ đồ này được xác định dựa trên nguyên lý giới hạn dưới của lý thuyết dẻo. Nghĩa là một kết cấu sẽ không bị phá hoại dưới tác dụng của một hệ tải trọng nếu có thể tìm được một sự phân bố ứng suất hay nội lực bất kỳ thỏa mãn điều kiện cân bằng và giới hạn cường độ của vật liệu. Nguyên lý này cho thấy rằng có thể có vô số sơ đồ hệ thanh trong mô hình STM để thay thế một kết cấu hoặc một bộ phận kết cấu bê tông cốt thép.

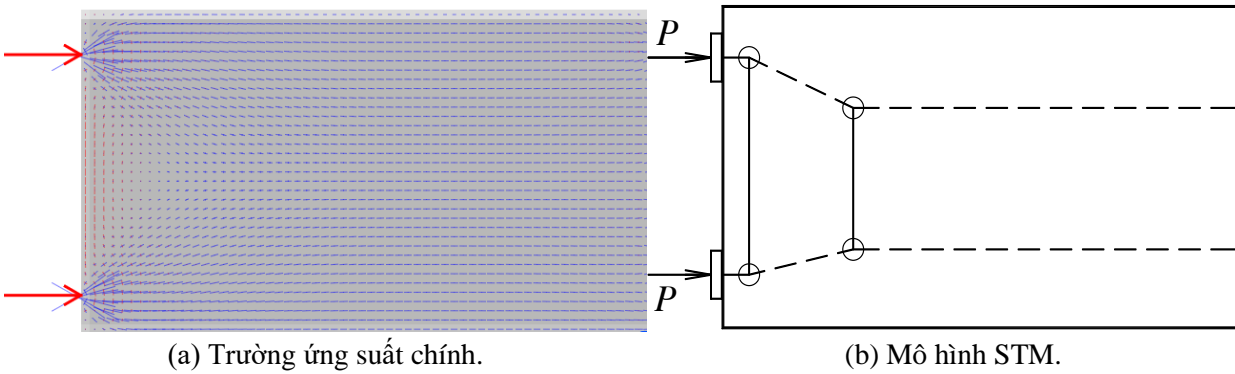
Vì vậy, điều quan trọng là cần phải biết cách để có một sơ đồ hệ thanh hợp lý nhất, tức là sát với khả năng chịu lực của kết cấu thực. Tuy nhiên, sự linh hoạt này cũng là thử thách trong việc xây dựng hệ STM bởi vì phương pháp này có thể dẫn đến sự không chắc chắn và thậm chí nhầm lẫn mô hình đối với người thiết kế. Nghĩa là một vùng D không có duy nhất một hệ giàn “đúng” tồn tại. Dựa vào sự phân bố ứng suất chính trong vùng neo, Breen [1] đã đưa ra một số mô hình giàn ảo như trình bày từ hình 4 đến hình 7.



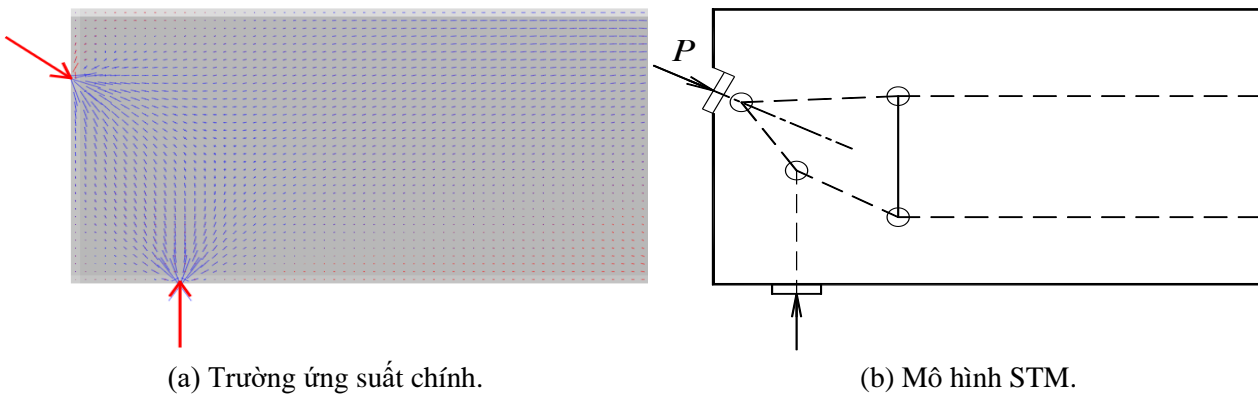
Hình 4. STM cho trường hợp lệch tâm nhỏ.



Hình 5. STM cho trường hợp lệch tâm lớn.



Hình 6. STM cho trường hợp nhiều neo.



Hình 7. STM cho trường hợp neo xiên.

Sau khi xác định nội lực trong hệ giàn ảo, thành 52% phần lực kéo trong thanh giàn được sử dụng để thiết kế thép kéo gia cường vùng neo.

Theo tiêu chuẩn TCVN 11823-2017, diện tích thép chịu kéo trong thanh giằng được xác định như sau:

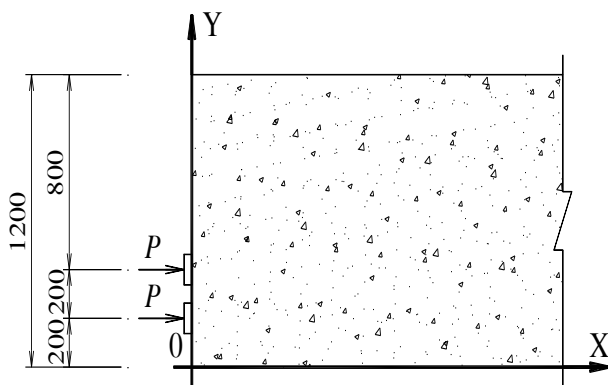
$$A_s = \frac{P_u}{\phi f_y} \quad (5)$$

Trong đó: P_u là lực kéo trong thanh giằng; ϕ là hệ số sức kháng, lấy bằng 0,9; f_y là cường độ chảy dẻo của thép.

3. Áp dụng và thảo luận

Khảo sát bài toán xác định lượng cốt thép gia cường cho đầu dầm bê tông cốt thép có cường độ bê tông $f_c' = 45 \text{ MPa}$ và có chiều cao dầm là 1200 mm, bề rộng dầm 400 mm, cường độ thép $f_y = 400 \text{ MPa}$ và các kích thước khác như hình 8.

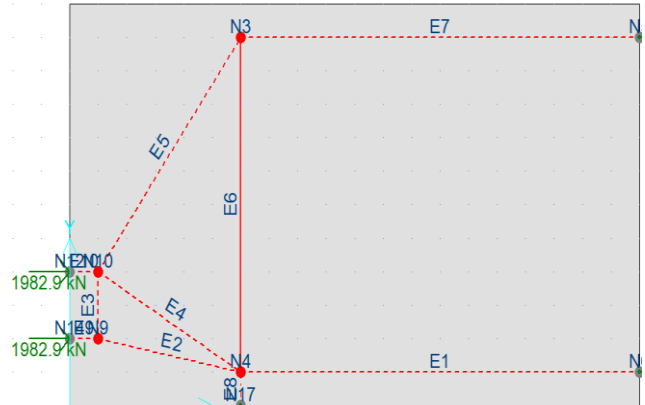
Sau khi tổ hợp tải trọng, lực nén cấp ở trạng thái giới hạn cường độ là $P_{u1} = 1982,9 \text{ KN}$, $P_{u2} = 1982,9 \text{ KN}$; và ở trạng thái giới hạn sử dụng $P_{s1} = 1529,2 \text{ KN}$, $P_{s2} = 1529,2 \text{ KN}$.



Hình 8. Sơ đồ lực tác dụng lên vùng neo.

- Xác định diện tích cốt thép theo mô hình giàn ảo (STM)

Theo phân tích các mô hình giàn ảo cho vùng neo trong mục 2.2, mô hình giàn ảo cho kết cấu đang phân tích có thể được chọn theo sơ đồ như hình 9.

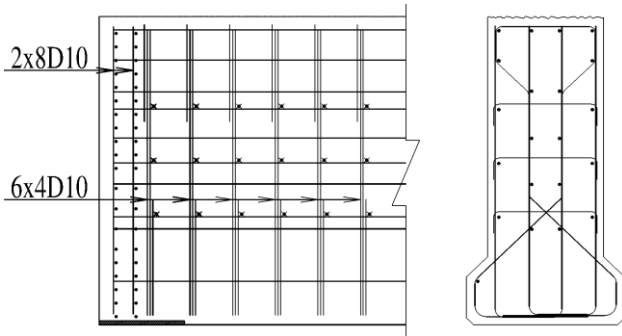


Hình 9. Sơ đồ STM cho vùng neo đầu dầm.

Tại bảng 1, tác giả liệt kê các phân tích nội lực cho thanh giằng, qua đó, xác định và trình bày diện tích cốt thép trong các thanh kéo dựa trên phương trình (4). Kết quả phân tích cho thấy, thanh giằng đứng E6 có lực dọc là 1110,4 KN và cần lượng thép tương ứng là $40\phi 10$. Lượng thép này được bố trí tại đầu dầm gồm tổng cộng 08 lớp thép, khoảng cách 02 lớp từ 50 mm đến 100 mm, 02 lớp đầu tiên mỗi lớp 08 thanh thép và các lớp còn lại, mỗi lớp 04 thanh thép, được thể hiện như hình 10.

Bảng 1. Nội lực trong hệ STM.

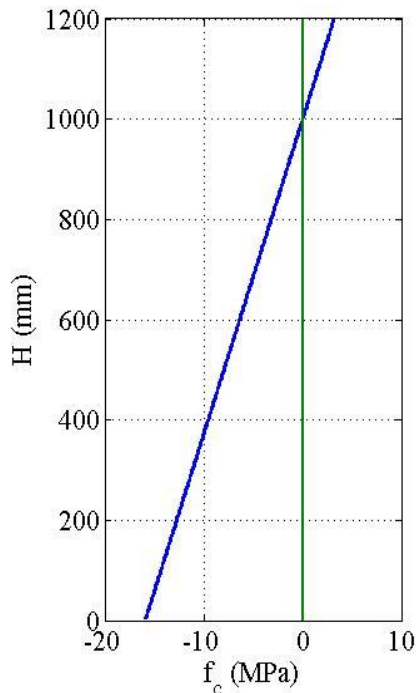
Tên thanh giàn	Các thông số của thanh giàn		
	Lực dọc (KN)	A_s (mm ²)	Số thanh thép
E1	-3172,6	-	-
E2	-2022,2	-	-
E3	-396,6	-	-
E4	-1387,5	-	-
E5	-1364,6	-	-
E6	+1110,4	-	-
E7	-793,2	-	-



Hình 10. Bố trí thép vùng neo.

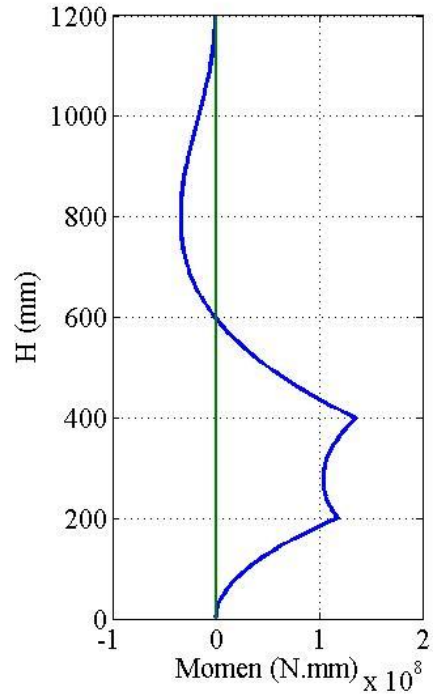
- Kiểm tra nứt vùng neo theo phương pháp phân tích ứng suất đàn hồi tuyến tính (ESA).

Trong trường hợp này phương pháp phân tích ESA được dùng để kiểm tra cốt thép ở trạng thái giới hạn sử dụng với các lực tập trung $P_{s1} = 1529,2$ KN, $P_{s2} = 1529,2$ KN.



Hình 11. Ứng suất pháp tại mặt cắt cuối vùng neo.

Áp dụng các phương trình từ (1) đến (4) để kiểm tra nứt cho vùng neo đầu dầm. Tại mặt cắt dầm ở cuối vùng neo chung, biểu đồ ứng suất pháp có thể xem như phân bố theo quy luật tuyến tính và được thể hiện như hình 11. Theo phương trình (1) biểu đồ momen phân bố theo chiều cao dầm được xác định như trong bảng 2 và trên hình 12.



Hình 12. Biểu đồ momen tại vùng neo.

Bảng 2. Momen phân bố tại vùng neo.

y_i (mm)	Momen* 10^{-8} (N.mm)
0	0,000
100	0,308
200	1,189
300	1,051
400	1,359
500	0,520
600	0,000
700	-0,265
800	-0,339
900	-0,286
1000	-0,169
1100	-0,053
1200	0,000

Từ giá trị momen lớn nhất trên biểu đồ momen, ứng suất lớn nhất tương ứng trong nhóm cốt thép phân bố như hình 10 được xác định như sau:

Bằng cách kết hợp phương trình (3) và (4), ứng suất trong cốt thép kéo trung bình của nhóm thép đứng có thể tính:

$$f_s = \frac{M_{\max}}{A_s (h-x)} = \frac{1,359 \times 10^8}{40 \times (\pi \times 10^2 / 4) \times (1200 - 1200 / 4)} = 48,1 \text{MPa}$$

So sánh với ứng suất kéo cho phép:

$$f_s = 48,1 \text{MPa} \leq [f_s] = \min(0,5 f_y; 140 \text{MPa})$$

Kết quả cho thấy việc bố trí thép theo mô hình giàn ảo như hình 10 đã đảm bảo điều kiện chống nứt tại vùng neo khi được kiểm toán theo mô hình phân tích ứng suất đàn hồi tuyến tính.

4. Kết luận:

Bài báo đã làm rõ hơn cơ sở lý thuyết để thiết kế cốt thép vùng neo theo hai phương pháp tiếp cận khá đơn giản đó là phương pháp dựa trên mô hình phân tích ứng suất với ứng xử đàn hồi tuyến tính và mô hình giàn ảo, và các phương pháp này đã được các tiêu chuẩn thiết kế tiên tiến chấp nhận. Vì vậy, hai phương pháp này khá phù hợp để sử dụng trong công tác thiết kế.

Cách tiếp cận mô hình phân tích ứng suất với ứng xử đàn hồi tuyến tính có thể bằng nhiều phương pháp khác nhau, như phương pháp phần tử hữu hạn, phương pháp sai phân, phương pháp cơ học cổ điển,... và phương pháp được trình bày trong bài báo này là theo lý thuyết cơ học cổ điển, nhằm mục đích xây dựng công thức đơn giản hơn cho việc áp dụng thực tế. Các công thức được thiết lập khá rõ ràng, từ đó dễ dàng hơn trong việc xác định biểu đồ momen theo chiều cao dầm. Dựa vào biểu đồ này có thể xác định ứng suất kéo trong cốt thép kéo gia cường vùng neo và dự đoán vị trí vết nứt có thể xảy

ra trong vùng neo theo các momen dương lớn nhất và momen âm nhỏ nhất, từ đó, có các phương án gia cường cốt thép vùng neo phù hợp.

Tài liệu tham khảo

- [1] J. E. Breen, O. Burdet, C. Roberts, D. Sanders, G. Wollmann; "Anchorage zone reinforcement for post-tensioned concrete girders". Washington, DC, USA: Transportation Research Board; 1994.
- [2] P. Okumus, P. M. G. Oliva, S. Becker; "Nonlinear finite element modeling of cracking at ends of pretensioned bridge girders". Eng Struct. 2012; 40:267–75. DOI:10.1016/j.engstruct.2012.02.033.
- [3] K. Van Meirvenne, W. De Corte, V. Boel, L. Taerwe; "Non-linear 3D finite element analysis of the anchorage zones of pretensioned concrete girders and experimental verification". Eng Struct. 2018; 172:764–79. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.06.065.
- [4] T. N. Linh; "Strut and tie model in design of reinforced concrete structures"; Darmstadt University of Technology, Darmstadt, Germany, and Vietnamese-German University, Binh Duong Province, Vietnam; 2023.
- [5] N. Đ. Thanh; "Nghiên cứu áp dụng mô hình chống giằng trong thiết kế các kết cấu cầu bê tông cốt thép"; DT 064025; Tổng Công ty Xây dựng công trình giao thông 5; Bộ Giao thông vận tải, Hà Nội, Việt Nam; 2006.
- [6] E. G. Nawy; "Prestressed Concrete". 5th Edition. NJ, USA: Prentice Hall. 2010.