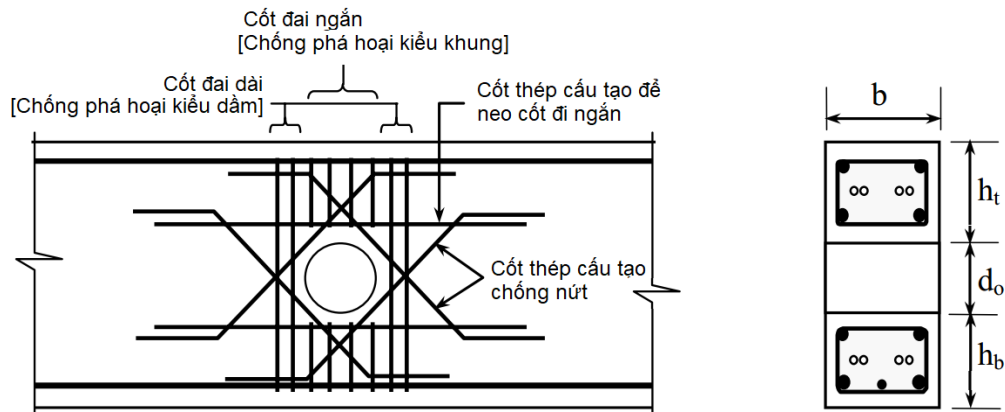


THIẾT KẾ LỖ MỞ TRÊN DÀM BÊ TÔNG CỐT THÉP

Tài liệu này được dịch từ bản gốc "DESIGN OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH WEB OPENINGS" do M.A. Mansur trình bày tại APSEC 2006.



Các lỗ mở trên dầm không phải là điều hiếm gặp nhưng lại ít được đề cập đến trong các tài liệu của Việt Nam, đặc biệt là các phân tích và tính toán. Trong bài viết này, tác giả (Mansur) đã đề cập đến những bước tính toán cơ bản của dầm có lỗ mở, chủ yếu đề cập đến việc gia cường lỗ mở, chống nứt cũng như kiểm tra võng cho các dầm có lỗ mở lớn. Tuy nội dung tính toán chủ yếu tuân theo tiêu chuẩn ACI nhưng cũng có thể tham khảo nguyên lý để áp dụng cho thiết kế tại Việt Nam. Các thí nghiệm trong bài viết cũng chỉ ra rằng các dầm hiện trạng khi bị khoan tạo lỗ có thể dẫn tới giảm độ bền cũng như tăng độ võng nếu không được gia cố phục hồi thích hợp.

Vì mục đích dễ nắm bắt, người dịch đã lược bỏ một số nội dung, bạn đọc có thể tra cứu bài viết gốc để có thông tin đầy đủ.

1. Giới thiệu

Ngày nay, các tòa nhà cần có một hệ thống mạng lưới đường ống nhằm đáp ứng các dịch vụ thiết yếu như cấp nước, thoát nước, hệ thống điều hòa thông gió, các hệ thống điện v.v.. Thông thường, các hệ thống này được bố trí phía dưới dầm và được che bởi hệ thống trần giả, do đó tạo ra một không gian chết của tòa nhà. Việc đưa các đường ống này xuyên qua dầm bằng cách bố trí các lỗ mở trên dầm sẽ làm giảm không gian chết và đưa đến một thiết kế nhỏ gọn hơn. Đối với công trình nhỏ thì những điều trên không đáng kể, nhưng đối với các công trình lớn thì việc tiết kiệm được chiều cao tầng sẽ dẫn đến nhiều lợi ích như tăng được số lượng tầng do không kể chiều cao công trình cũng như có khả năng giảm được các loại tải trọng.

Tuy nhiên việc tạo các lỗ mở cũng làm thay đổi khả năng làm việc của dầm. Do tiết diện dầm thay đổi nên có thể sẽ tạo ra các vị trí có sự tập trung ứng suất dẫn đến xuất hiện các vết nứt không mong

muốn. Bên cạnh đó việc giảm độ cứng cũng sẽ dẫn đến tăng độ võng của dầm. Nếu không được thiết kế phù hợp, độ bền của dầm cũng sẽ bị suy giảm đáng kể.

Prentzas (1968) đã thực hiện nghiên cứu với nhiều thí nghiệm về các lỗ mở hình tròn, hình chữ nhật, hình tam giác, hình thang, với các kích thước không đều. Tuy nhiên, trên thực tế lỗ mở hình tròn và hình chữ nhật vẫn là phổ biến nhất. Xét về kích thước, nhiều nhà nghiên cứu đã sử dụng thuật ngữ lỗ mở nhỏ và lỗ mở lớn mà không đề cập đến ranh giới rõ ràng để phân biệt. Nghiên cứu từ các tài liệu có sẵn (thực hiện bởi Mansur and Tan, 1999) đã cho thấy rằng sự phân loại như vậy phụ thuộc chủ yếu vào phản ứng của dầm. Khi lỗ mở đủ nhỏ để dầm vẫn ứng xử như thông thường, hay nói cách khác là vẫn áp dụng lý thuyết dầm (lý thuyết uốn), thì lỗ mở được coi là nhỏ. Ngược lại, các lỗ mở lớn là các lỗ mở làm thay đổi sự làm việc của dầm. Do đó, lỗ mở nhỏ và lỗ mở lớn cần được thiết kế bằng các bài toán khác nhau.

Trong bài báo này, dầm chứa các lỗ mở nhỏ và lớn sẽ được xử lý riêng. Dựa trên công trình nghiên cứu được báo cáo trong tài liệu, bài báo cũng đưa ra quy trình để thiết kế các lỗ mở dưới tác dụng của uốn và cắt. Bài báo cũng chỉ ra rằng việc thiết kế các lỗ mở lớn có thể được đơn giản hơn mà vẫn đảm bảo tính hợp lý và tiết kiệm.

2. Dầm có lỗ mở nhỏ

Lỗ mở hình tròn, hình vuông hoặc gần vuông có thể coi là nhỏ nếu kích thước của nó bé so với kích thước dầm, ví dụ, khoảng bé hơn 40% chiều cao dầm. Khi đó ứng xử của dầm được coi là trội hơn, việc tính toán dầm có lỗ nhỏ cũng tương tự như đối với dầm đặc. Tuy nhiên, việc có các lỗ mở sẽ làm gián đoạn đường truyền lực thông thường, do đó sẽ dẫn đến sự tập trung ứng suất xung quanh các lỗ mở và có thể dẫn đến các vết nứt. Cần bố trí cốt thép gia cường xung quanh lỗ mở để kiểm soát các vết nứt và ngăn ngừa sự phá hoại của dầm.

2.1. Dầm chịu uốn thuần túy

Đối với dầm chịu uốn thuần túy, việc bố trí các lỗ mở trong vùng kéo sẽ không làm ảnh hưởng tới sự làm việc của dầm do vùng kéo đương nhiên sẽ xuất hiện vết nứt ở trạng thái tới hạn. Mansur và Tan (1999) đã thể hiện điều này bằng nhiều ví dụ được kiểm chứng bằng thí nghiệm. Do đó, khả năng chịu uốn của dầm sẽ không bị ảnh hưởng bởi sự xuất hiện của lỗ mở miễn là chiều cao tối thiểu của biên chịu nén, h_c , lớn hơn hoặc bằng chiều cao vùng nén ở trạng thái tới hạn

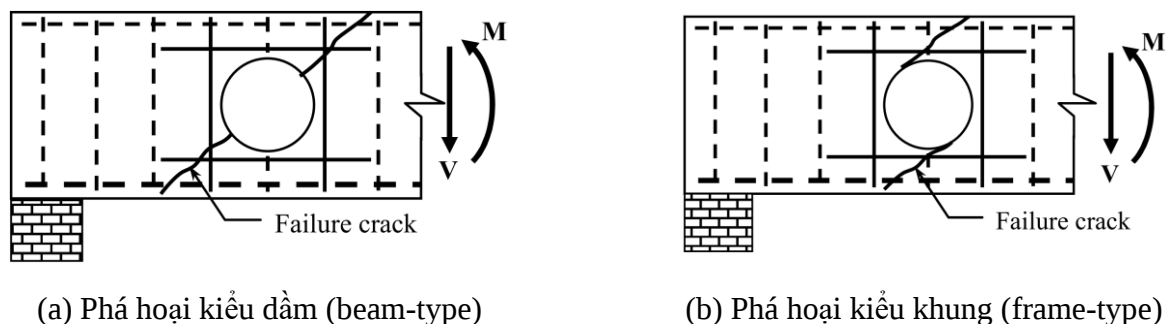
$$h_c \geq \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b} \quad (1)$$

Trong đó: A_s = diện tích của cốt thép chịu kéo; f_y = cường độ của cốt thép; f'_c = cường độ của bê tông; b = bề rộng của vùng nén.

Tuy nhiên, do có sự giảm độ cứng tại các tiết diện có lỗ mở, nên các vết nứt sẽ xuất hiện sớm hơn. Mặc dù vậy, bề rộng vết nứt và độ võng lớn nhất dưới tác dụng của tải trọng sử dụng sẽ vẫn ở khoảng xấp xỉ với tính toán thông thường.

2.2. Dầm chịu tác động đồng thời mô men và lực cắt

Đối với dầm, thông thường lực cắt vẫn đi kèm với mô men ngoại trừ điểm uốn (điểm đảo dấu mô men). Khi lỗ mở nhỏ xuất hiện ở vị trí có lực cắt lớn, và lỗ mở đó được thiết kế có cốt thép kín xung quanh (thể hiện bằng đường nét liền trong hình 1), các kết quả thí nghiệm của Hanson (1969), Somes và Corley (1974), Salam (1977), và Weng (1998) cho thấy rằng dầm có thể bị phá hoại ở 2 dạng khác nhau. Dạng phá hoại đầu tiên bắt gặp ở các dầm đặc thông thường, trong trường hợp này đối với sự xuất hiện lỗ mở thì vết nứt đi qua tâm lỗ mở (hình 1a). Ở dạng thứ 2, có 2 vết nứt chéo nhau xuất hiện độc lập tại 2 phần biên dầm phía trên và phía dưới của lỗ mở. Mansur (1998) đặt tên tương ứng cho 2 dạng này là phá hoại kiểu dầm (beam-type) và phá hoại kiểu khung (frame-type); mỗi dạng này cần có một cách xử lý riêng.



Hình 1. Hai dạng phá hoại do lực cắt ở các dầm có lỗ mở nhỏ

Tương tự phương pháp thiết kế truyền thống, khả năng chịu cắt của dầm V_n trong cả 2 trường hợp được tính từ khả năng chịu lực của bê tông V_c và của cốt thép V_s

$$V_n = V_c + V_s \quad (2)$$

Cốt thép chịu uốn được tính toán độc lập so với cốt thép chịu cắt, như thông thường.

2.2.1. Phá hoại kiểu dầm (beam-type)

Đối với trường hợp phá hoại kiểu dầm, mặt phẳng phá hoại nghiêng 45° như trường hợp dầm đặc thông thường, mặt phẳng phá hoại đi qua tâm lỗ mở (hình 2). Theo phương pháp đơn giản được nêu

trong ACI (1995), khả năng chịu cắt của bê tông V_c có thể tính dựa trên tiết diện bê tông như sau (Mansur, 1998)

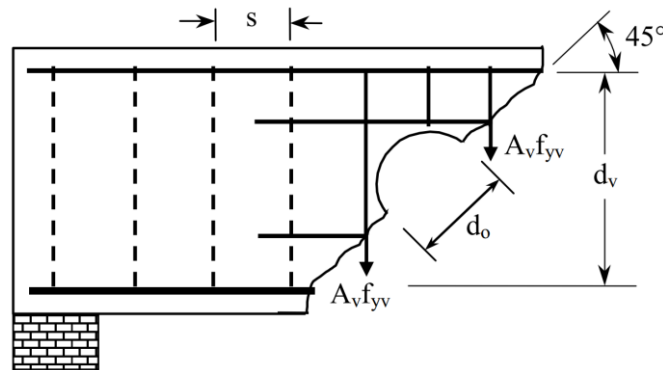
$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w (d - d_o) \quad (3)$$

Trong đó b_w = bề rộng bụng dầm, d = chiều cao làm việc của dầm, d_o = đường kính lỗ mở

Khả năng chịu cắt của cốt thép, V_s , được xác định như hình 2. Có thể thấy rằng tác dụng của cốt đai phát sinh ở mặt phẳng phá hoại nằm về 2 phía của lỗ mở, khoảng phân bố là $(d_v - d_o)$ trong đó d_v là khoảng cách giữa các lớp cốt thép dọc ở phía trên và phía dưới dầm, và d_o là chiều cao của lỗ mở. Do đó:

$$V_s = \frac{A_v f_{yv}}{s} (d_v - d_o) \quad (4)$$

Trong đó: A_v = diện tích của cốt đai; f_{yv} = cường độ của cốt đai



Hình 2: Khả năng chịu cắt, V_s , cung cấp bởi cốt đai

Sau khi xác định được V_c và V_s , lượng thép cần để gia cố xung quanh lỗ mở có thể xác định theo cách thông thường. Lượng thép này được phân bố trong khoảng $(d_v - d_o)/2$ ở hai bên lỗ mở.

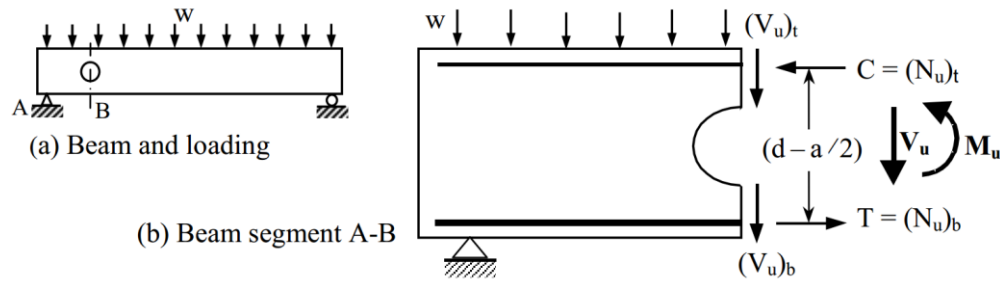
2.2.2. Phá hoại kiểu khung (frame-type)

Phá hoại kiểu khung xảy ra do sự hình thành của 2 vết nứt độc lập chéo nhau, mỗi vết nứt nằm trên một biên dầm ở phía trên và phía dưới lỗ mở như trong hình 1b. Có thể thấy rằng mỗi biên dầm ứng xử độc lập tương tự như các phần tử trong kết cấu khung. Do đó, theo đề xuất của Mansur (1998) mỗi phần biên dầm phải được xử lý độc lập.

Để thiết kế dầm trong kiểu phá hoại này, chúng ta sẽ tách một phần dầm ra để phân tích, như hình 3. Rõ ràng rằng, mô men uốn M_u sẽ được kháng lại bởi cặp ngẫu lực N_u hình thành do ứng suất kéo và nén ở các biên dầm phía trên và dưới lỗ mở. Giá trị N_u được xác định như sau:

$$(N_u)_t = \frac{M_u}{\left(d - \frac{a}{2}\right)} = -(N_u)_b \quad (5)$$

Trong đó d = chiều cao làm việc của dầm; a = chiều cao quy đổi của vùng nén, t và b lần lượt là ký hiệu cho vùng kéo và vùng nén.



Hình 3: Sơ đồ tính toán

Lực cắt V_u phân phối lên hai biên dầm phía trên và dưới lỗ mở theo tỉ lệ tiết diện (Nasser et al., 1967). Do đó:

$$(V_u)_t = V_u \left[\frac{A_t}{A_t + A_b} \right] \quad (6a)$$

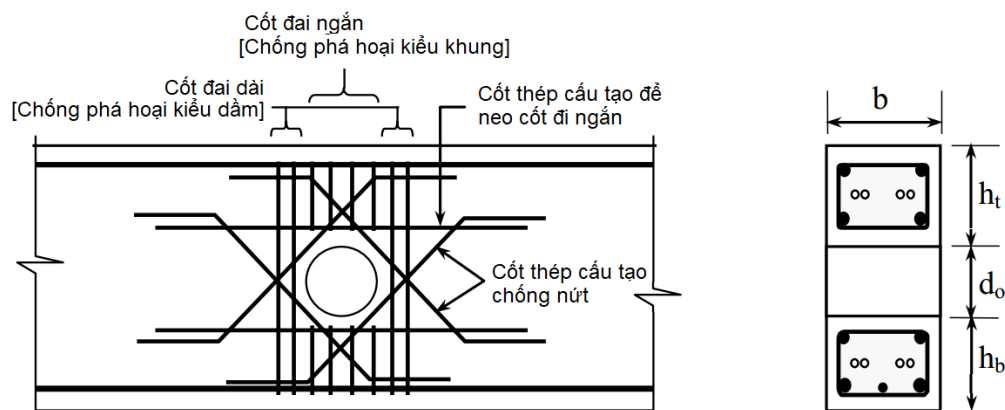
và

$$(V_u)_b = V_u - (V_u)_t \quad (6b)$$

Khi xác định được các thành phần lực dọc và lực cắt, mỗi biên dầm ở trên và dưới lỗ mở có thể được thiết kế theo quy trình tương tự như đối với các dầm đặc thông thường, biên phía trên sẽ chịu cắt và nén, biên phía dưới sẽ chịu cắt và kéo.

2.2.3. Cấu tạo cốt thép

Khi thiết kế, các cốt đai dài có vai trò ngăn ngừa phá hoại kiểu dầm (beam-type) và các cốt đai ngắn ở trên và dưới lỗ mở có vai trò ngăn ngừa phá hoại kiểu khung (frame-type). Các thanh thép cấu tạo được bố trí để neo các cốt đai ngắn. Để ngăn chặn vết nứt, cần bổ sung thêm các thanh thép theo phương chéo xung quanh lỗ mở. Việc bố trí các thanh thép gia cường được thể hiện như hình 4.



Hình 4: Cấu tạo cốt thép xung quanh lỗ mở nhỏ

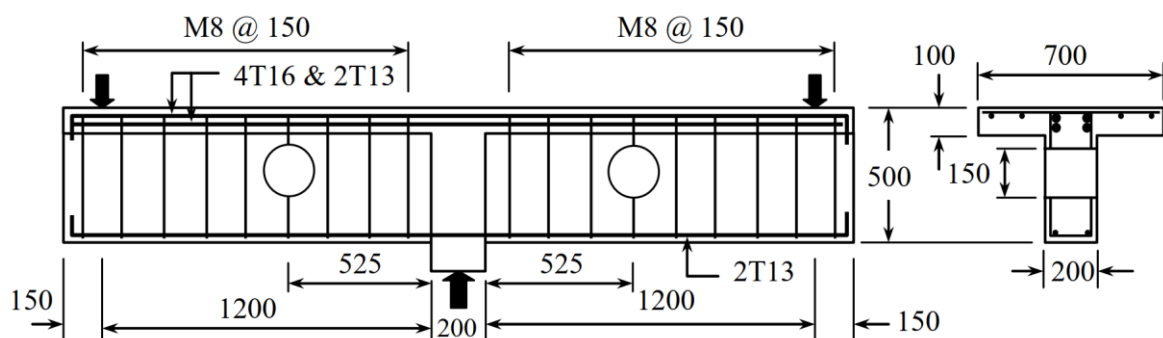
2.3. Tạo lỗ mở trên các dầm hiện trạng

Rõ ràng việc tạo lỗ mở trên dầm mang đến những nguy cơ nhất định. Nếu được thiết kế ngay từ đầu thì các nguy cơ có thể được khắc phục bằng phương pháp tính toán - cấu tạo được đề cập ở phần trên.

Tuy nhiên, câu chuyện không luôn luôn như vậy. Khi bố trí các đường ống cho công trình vừa mới xây dựng, nhà thầu M&E thường đưa ra yêu cầu khoan các lỗ mở vì mục đích đơn giản hóa cho việc sắp xếp đường ống. Đứng trước yêu cầu đó, người kỹ sư kết cấu thường khó đưa ra quyết định. Tất nhiên, theo quan điểm của chủ đầu tư thì việc khoan các lỗ mở như thế mang lại nhiều lợi ích, nhưng người kỹ sư kết cấu phải chịu nhiều rủi ro do việc đó có thể dẫn đến thiếu an toàn cũng như không đảm bảo điều kiện sử dụng.

Một tình huống khác là khi đánh giá hiện trạng các công trình cũ, các cấu kiện có thể sẽ bị khoan rút lõi để xác định cường độ của bê tông. Tất nhiên các lỗ này sau đó sẽ được lấp lại bằng vật liệu phù hợp. Nhưng nếu công trình đó vẫn tiếp tục đưa vào sử dụng, thì câu hỏi là việc lấp lại như thế có đủ để khôi phục mức độ an toàn và khả năng làm việc như thiết kế ban đầu hay không. Trong những nghiên cứu gần đây (Mansur et al., 1999), nhiều thí nghiệm đã được thực hiện để trả lời cho câu hỏi các lỗ khoan lấy lõi có ảnh hưởng như thế nào đối với dầm hiện trạng.

Thí nghiệm gồm 4 dầm tiết diện chữ T mô phỏng trường hợp vùng dầm chịu mô men âm của dầm; tất cả các dầm dài 2.9m có một gối tại vị trí chính giữa mô tả gối đỡ của dầm liên lục. Tiết diện dầm là 200x500mm; cánh chữ T rộng 700mm dày 100mm. Các lỗ mở được bố trí đối xứng, đường kính 150mm, vị trí cách mép gối đỡ 525mm. Cốt thép trong các dầm được bố trí như hình 5.



Hình 5: Cấu tạo cốt thép của dầm thí nghiệm thực hiện bởi Mansur (1999)

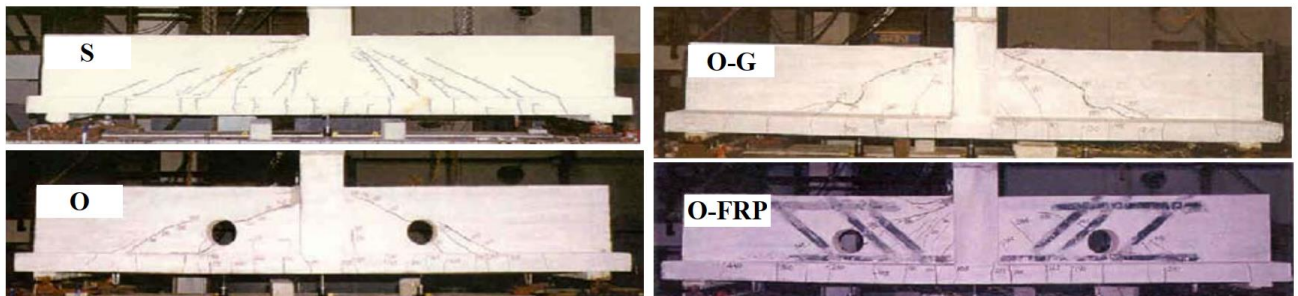
Trong bảng 1, ký hiệu S để chỉ dầm không có lỗ mở, với mục đích làm tham chiếu để đánh giá các dầm có lỗ mở. Dầm có lỗ mở ký hiệu là O. Ký hiệu O-G để chỉ dầm có lỗ mở nhưng được lấp kín bằng vữa không co ngót. Cuối cùng, O-FRP là ký hiệu của dầm có lỗ mở và được gia cường bằng tấm polyme sợi các bon bên thành dầm.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm của Manser (1999)

Dầm	Cường độ bền tông f_c' (MPa)	Tải trọng khi xuất hiện vết nứt (kN)	Tại tải trọng sử dụng (*)		$P_u / P_{u(S)}$
			Bề rộng vết nứt (mm)	Độ võng (mm)	
S	30.8	200	0.27	4.38	1.000
O	29.7	134	>1.00	5.57	0.713
O-G	37.9	195	0.98	4.91	0.820
O-FRP	37.1	215	0.25	3.57	1.003

* Tải trọng sử dụng được giả thiết bằng tải trọng tới hạn của dầm $S / 1.7$

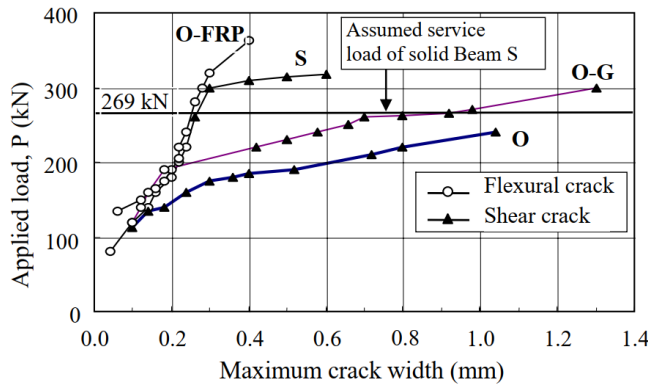
Các kiểu vết nứt của dầm khi phá hoại được thể hiện như hình 6. Có thể thấy dầm O có kiểu vết nứt tương tự như với dầm đặc S. Vết nứt chính đi qua tâm lỗ mở là nguyên nhân dẫn đến phá hoại dầm. Dầm O-G (có lỗ được lấp đầy bởi vữa co ngót) ứng xử tương tự dầm O ngoài việc vết nứt phát triển xung quanh lỗ mở. Ngược lại, dầm O-FRP (được gia cường bởi tấm polyme sợi các bon) ứng xử hoàn toàn tương tự như đối với dầm đặc S, chỉ khác là nó có số vết nứt nhỏ ít hơn so với dầm S.



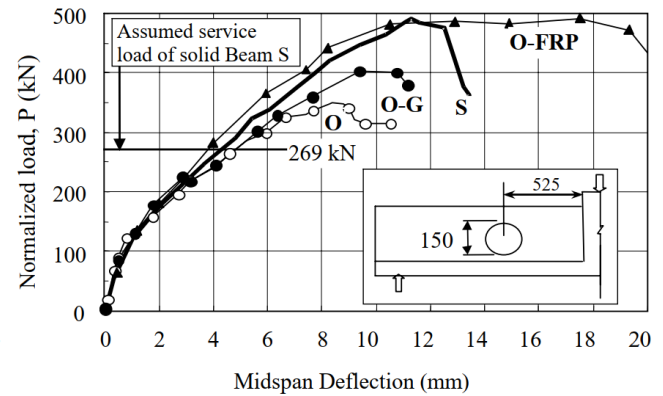
Hình 6: Dạng vết nứt trên các dầm thí nghiệm thực hiện bởi Mansur (1999)

Bề rộng vết nứt và độ võng giữa dầm ở các cấp tải được thể hiện như trong các hình 7 và 8. Bảng 1 là tóm tắt kết quả chính của thí nghiệm. Lấy phản ứng của dầm S làm tham chiếu đánh giá, có thể thấy rằng việc tạo một lỗ mở trên dầm sẽ dẫn đến các vết nứt xuất hiện sớm hơn, bề rộng vết nứt lớn hơn ở tất cả các giai đoạn gia tải (hình 7), độ cứng sau khi nứt cũng bé hơn (hình 8). Điều này cho thấy rằng việc tạo lỗ mở trên các dầm hiện trạng làm ảnh hưởng khá nhiều tới mức độ an toàn cũng như khả năng làm việc của dầm.

Việc lấp kín lỗ mở bằng vữa không co ngót như dầm O-G có thể cải thiện được chất lượng của dầm so với trường hợp dầm O, tuy nhiên các chỉ tiêu về độ võng và vết nứt vẫn vượt khá nhiều so với dầm đặc thông thường S. Trong khi đó, việc gia cường bằng FRP cho thấy có thể khôi phục hoàn toàn khả năng làm việc của dầm so với nguyên trạng.



Hình 7: Đường cong tải trọng - vết nứt



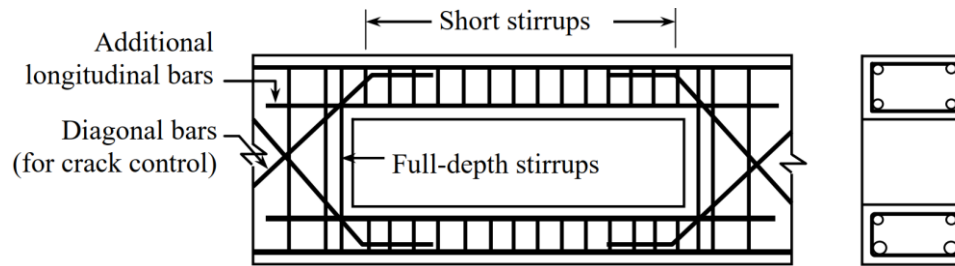
Hình 8: Đường cong tải trọng - độ võng

Kết quả thí nghiệm cho thấy việc tạo lỗ mở lên các dầm hiện trạng ảnh hưởng nhiều đến khả năng làm việc của dầm. Bên cạnh đó, việc lấp kín lỗ mở bằng vữa không co ngót không thể khôi phục được độ bền và độ cứng ban đầu của dầm. Tuy nhiên, rủi ro có thể được giảm thiểu bằng cách giới hạn kích thước lỗ mở và tránh việc lỗ mở cắt qua các thanh thép đai. Trong mọi trường hợp, người thiết kế phải phân tích đánh giá cẩn thận tình huống. Không nên tạo các lỗ mở trên dầm hiện trạng trừ khi dầm ngay từ đầu đã được thiết kế với độ bền lớn hơn yêu cầu, hoặc được gia cường phù hợp.

3. Dầm có các lỗ mở lớn hình chữ nhật

Tương tự như đối với các dầm có lỗ mở nhỏ, việc tạo các lỗ mở lớn ở trên dầm tại các vùng uốn thuần túy không làm ảnh hưởng đến khả năng chịu uốn của dầm miễn là không làm ảnh hưởng đến kích thước vùng nén của dầm tại trạng thái giới hạn, và sự mất ổn định khi chịu nén của vùng nén được ngăn ngừa bằng cách giới hạn chiều dài của lỗ mở (Mansur và Tan, 1999)

Tuy nhiên trong thực tế các lỗ mở thường được bố trí gần vị trí các gối đỡ nơi có lực cắt lớn. Trong trường hợp này, các thí nghiệm đã chỉ ra rằng nếu không bố trí đủ cốt thép xung quanh lỗ mở hoặc có cấu tạo không phù hợp sẽ dẫn đến sự phá hoại sớm hơn so với thiết kế khi không xét đến lỗ mở (Siao và Yap, 1990). Khi được cấu tạo phù hợp, bao gồm các thanh thép bổ sung ở bề mặt các biên gần lỗ mở, kèm các cốt đai ngăn ở mỗi vùng biên dầm, như hình 9. Khi đó, mỗi biên dầm phía trên và dưới lỗ mở ứng xử như một dầm độc lập và phá hoại xảy ra là phá hoại dẻo như trong hình 10. Thí nghiệm cho thấy cơ chế phá hoại bao gồm 4 nút dẻo hình thành tại mỗi đầu của các biên dầm.



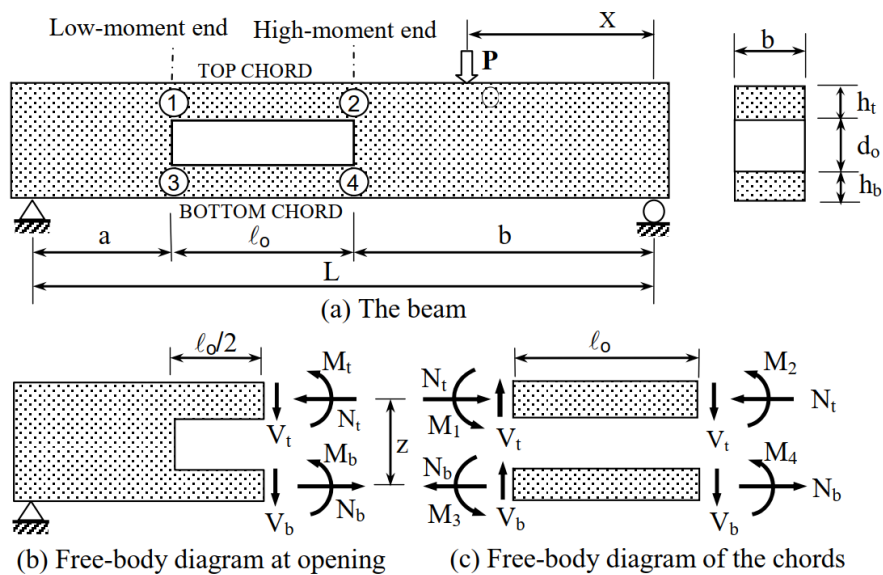
Hình 9: Cấu tạo cốt thép phù hợp cho các lỗ mở



Hình 10: Trạng thái phá hoại dẻo của dầm dưới tác dụng đồng thời của mô men và lực cắt

3.1. Phân tích

Các thí nghiệm đã tạo tiền đề hình thành phương pháp phân tích để dự đoán độ bền của các dầm có lỗ mở lớn (Mansur 1984), dựa trên việc phân tích tải trọng phá hoại trong đó các điều kiện cơ bản như điều kiện cân bằng, điều kiện phá hoại dẻo và cơ cấu phá hoại được thỏa mãn đồng thời. Bài toán xác định tải trọng phá hoại cho trường hợp dầm đơn giản chịu tải trọng tập trung P đặt trên tiết diện đặc cách gối đỡ một đoạn X như hình 11.



Hình 11: Dầm có lỗ mở lớn chịu tác dụng đồng thời của mô men và lực cắt

3.1.1. Điều kiện cân bằng

Thực hiện mặt cắt đi qua lỗ mở và tách các biên dầm trên và dưới lỗ mở như trên các hình 11b và 11c. Các biên chưa biết bao gồm lực dọc (N_t và N_b), mô men uốn (M_t và M_b), và lực cắt (V_t và V_b) tồn tại trên các biên trên và biên dưới của dầm. Chúng ta có 3 phương trình cân bằng như sau:

$$M_t + M_b + Nz = M_m \quad (7)$$

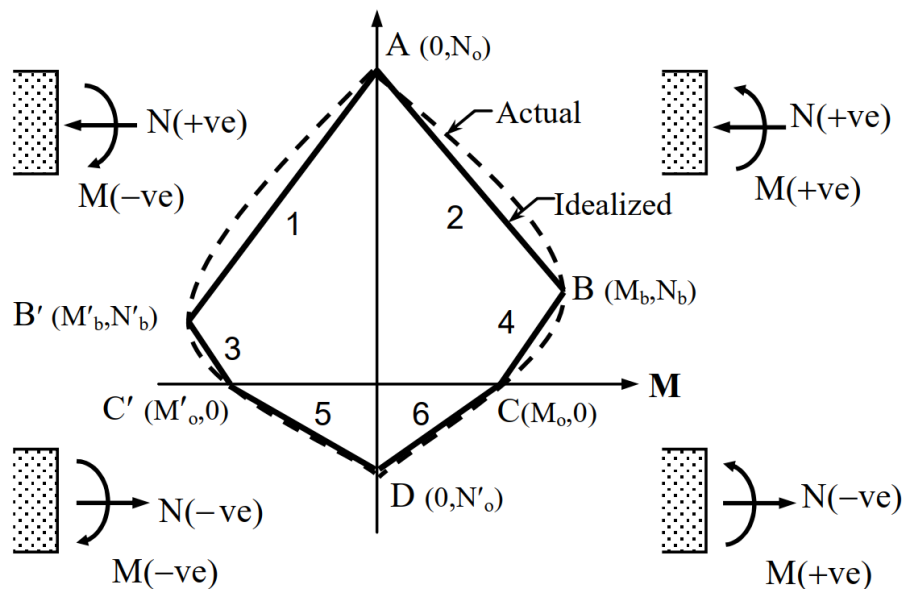
$$N_t + N_b = 0 \quad (8)$$

$$V_t + V_b = V_m \quad (9)$$

Trong đó M_m và V_m nội lực tính toán của dầm. Các phương trình trên đảm bảo dầm ở trạng thái cân bằng tĩnh định.

3.1.2. Điều kiện phá hoại dẻo

Các hình 11b và 11c cho thấy các biên dầm chịu tác động đồng thời của mô men, lực cắt và lực dọc. Do đó, để giải quyết bài toán chúng ta sẽ xây dựng biểu đồ tương tác. Giả thiết rằng trong các biên dầm được bố trí đủ lượng cốt đai cần thiết để chịu cắt; thì biểu đồ tương tác M-N như hình 12 đủ để xác định được điều kiện bền của các biên dầm.

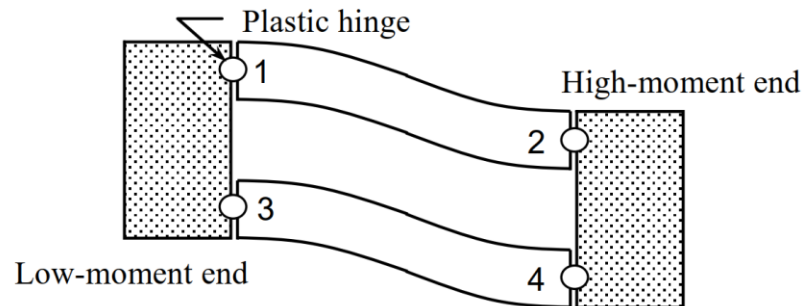


Hình 12: Các đường tuyến tính để xấp xỉ hóa đường cong của biểu đồ tương tác

Các biên dầm trên và dưới lỗ mở được tính toán như các cấu kiện chịu nén và kéo lệch tâm, biểu đồ tương tác của chúng được xây dựng dựa trên quan hệ biến dạng - ứng suất tại trạng thái giới hạn của dạng phá hoại dẻo. Để đơn giản, đường cong của biểu đồ tương tác được xấp xỉ hóa bằng các đoạn thẳng liền mạch như trong hình 12.

3.1.3. Cơ cấu phá hoại

Cơ cấu phá hoại phù hợp với các kết quả thí nghiệm, bao gồm các khớp dẻo được hình thành trên các biên dầm tại vị trí góc của lỗ mở như trong hình 13



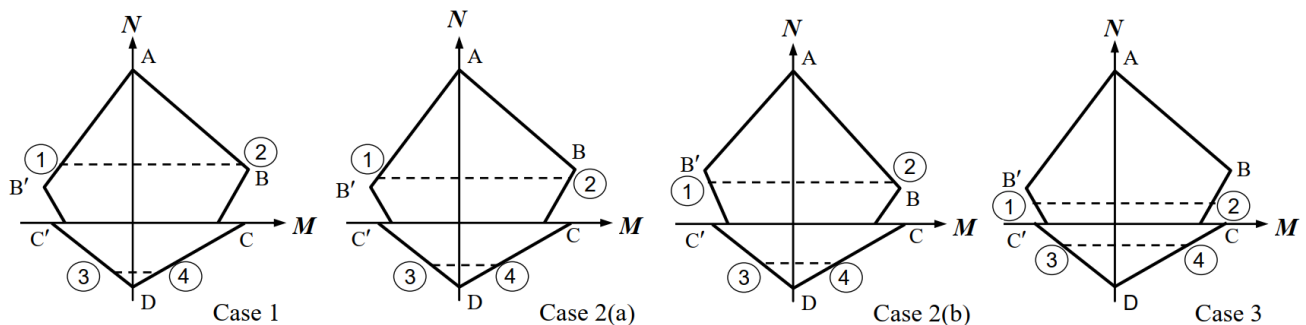
Hình 13: Giả thiết về cơ cấu phá hoại của dầm có lỗ mở lớn

3.1.4. Giải quyết bài toán

Giả thiết rằng các tiết diện dầm phía bên ngoài lỗ mở là cứng, và cơ cấu phá hoại đúng như trên hình 13, các khớp dẻo lần lượt được ký hiệu từ 1 đến 4.

Khi dầm chịu mô men dương, biên dầm phía trên sẽ chịu nén còn biên dầm phía dưới sẽ chịu kéo, các lực kéo và nén này dĩ nhiên cân bằng với nhau. Do đó, một phần biểu đồ tương tác phía trên trục M (vùng có $N > 0$) sẽ được áp dụng cho biên trên của dầm, còn phần biểu đồ phía dưới trục M sẽ được áp dụng cho biên dưới của dầm.

Thông thường, các biên dầm sẽ không được thiết kế giống đúc như nhau, nên biểu đồ tương tác của chúng cũng khác nhau. Biểu đồ tương tác sẽ không đối xứng, nghĩa là $M_b \neq M_b'$, $N_b \neq N_b'$ và $M_o \neq M_o'$ (xem hình 12). Do đó, có 4 khả năng của biểu đồ tương tác cho các khớp dẻo 1, 2 được thể hiện ở các trường hợp 1, 2(a), 2(b) và 3 trong hình 14. Trong tất cả các trường hợp, khớp dẻo 3 đều nằm trên đoạn $C'D$ và khớp dẻo 4 đều nằm trên đoạn CD . Lưu ý rằng nếu biên trên của dầm được thiết kế đối xứng, thì chỉ cần xét các trường hợp 1 và 3.



Hình 14: Các trường hợp có thể xảy ra cho cơ cấu phá hoại của dầm

Dựa vào các thông tin trên, Mansur và nhóm nghiên cứu (1984) đã lập một phần mềm để xác định tải trọng phá hoại của dầm.

Khi các biên dầm được bố trí đủ cốt thép, thì dầm có thể phá hoại ở các tiết diện ngoài phạm vi lỗ mở. Do đó tải trọng phá hoại P_u xác định được từ phương pháp trình bày ở trên sẽ phải bé hơn tải trọng gây ra phá hoại tại các phần tiết diện đặc, nếu không các giả thiết tính toán không còn phù hợp nữa.

3.2. Thiết kế

Thiết kế dầm có lỗ mở cũng giống như các cấu kiện thông thường đều phải kiểm tra độ bền và các điều kiện về sử dụng: độ võng và vết nứt. Bên cạnh đó cần bố trí cốt thép tại các góc của lỗ mở để phòng ngừa các vết nứt do tập trung ứng suất.

3.2.1. Kiểm tra độ bền

Mặc dù phương pháp phân tích ở đã đề cập ở trên có thể giải quyết trực tiếp bài toán, tuy nhiên nó vẫn khá phức tạp do phải thực hiện một loạt các biểu đồ. Nó phức tạp ở chỗ để xây dựng được biểu đồ tương tác thì cần biết được bố trí cốt thép, trong khi số trường hợp bố trí cốt thép thì rất đa dạng. Do đó cần đơn giản hóa thiết kế nhất có thể để giảm thiểu số trường hợp tính toán.

Như đề cập ở trong mục 3.1.1, bài toán là siêu tĩnh và chúng ta chỉ có 3 phương trình cân bằng trong khi có đến 6 ẩn số; do đó cần bổ sung thêm 3 phương trình nữa để có thể tìm được các ẩn. Vấn đề này có thể giải quyết như sau.

Khi cốt thép tại các biên dầm được bố trí đối xứng thì mô men ở mỗi đầu biên dầm (vị trí xuất hiện khớp dẻo) sẽ bằng nhau ở trạng thái hình thành khớp dẻo. Do đó $M_1 = M_2$ và $M_3 = M_4$. Từ sơ đồ tính toán hình 11c có thể nhận thấy rằng điểm uốn (có $M = 0$) nằm ở vị trí giữa của mỗi biên dầm (tâm của lỗ mở), do đó $M_t = 0$ và $M_b = 0$, công thức 7 có thể viết lại thành

$$Nz = M_m \quad (10)$$

Nếu lực cắt V_m của dầm tại vị trí tiết diện đi qua tâm lỗ mở được phân phối lên các biên dầm với theo một quy luật nào đó, nghĩa là nếu:

$$V_t = k_v V_m \quad (11)$$

Trong đó k_v là hằng số xác định, thì bài toán trở về bài toán tĩnh định, và các tiết diện nguy hiểm (đầu mỗi biên dầm) chịu tác dụng đồng thời của mô men, lực dọc, và lực cắt có thể thiết kế như thông thường theo quy định của các tiêu chuẩn thiết kế.

Tuy nhiên, có 3 đề xuất khác nhau liên quan đến việc phân phối lực cắt lên các biên dầm. Đầu tiên là của Lorensten (1962) cho rằng phần biên chịu nén sẽ chịu toàn bộ lực cắt còn phần biên chịu kéo sẽ chỉ làm việc như thanh giằng và không chịu cắt. Quan niệm này có lẽ sẽ đúng khi mà lỗ mở gần với mặt dưới của dầm. Đề xuất thứ 2 là của Nasser (1967), và của Reagan và Warwaruk (1967) cho rằng

lực cắt phân phối theo tỉ lệ diện tích tiết diện của các biên dầm. Đề xuất thứ 3 là của Barney (1977) cho rằng lực cắt phân phối phụ thuộc độ cứng chống uốn của các biên dầm. Được thể hiện như sau:

$$\text{Lorensten (1962):} \quad k_v = 0 \quad (12)$$

$$\text{Nasser et al. (1967):} \quad k_v = A_t / (A_t + A_b) \quad (13)$$

$$\text{Barney et al. (1977):} \quad k_v = I_t / (I_t + I_b) \quad (14)$$

Quy trình thiết kế bao gồm các bước sau:

Bước 1: xác định cốt thép dọc cho biên dầm chịu nén

Ban đầu, giả thiết là dầm không có lỗ mở và thực hiện tính toán cốt thép dọc cho dầm. Nếu dầm chịu mô men dương, cốt thép tính toán được sẽ bố trí ở mặt dưới của dầm. Cốt thép ở mặt trên dầm sẽ ít hơn so với cốt thép mặt dưới và thường được bố trí suốt chiều dài dầm, bao gồm cả vị trí của lỗ mở. Do đó, lớp cốt thép trên của biên dầm chịu nén là đã biết. Sử dụng một lượng tương tự cho lớp dưới của biên chịu nén với mục đích gia cường phục hồi độ bền của dầm dưới sự xuất hiện của lỗ mở.

Bước 2: xác định lực cắt chịu bởi biên dầm chịu nén

Bởi vì cốt thép dọc trong biên dầm chịu nén đã biết, và lực dọc tác dụng lên nó được xác định bởi công thức 10, nên khả năng chịu mô men của biên chịu nén có thể xác định được bằng các cách thông thường. Do tính đối xứng nên khả năng chịu uốn dưới tác dụng của mô men dương và mô men âm là giống nhau. Vì vậy, từ sơ đồ tính toán hình 11c, lực cắt truyền lên biên chịu nén được xác định như sau:

$$(V_u)_t = 2(M_u)_{t,2} / l_o \quad (15)$$

Trong đó l_o là chiều dài lỗ mở.

Bước 3: xác định nội lực và thiết kế biên dầm chịu kéo

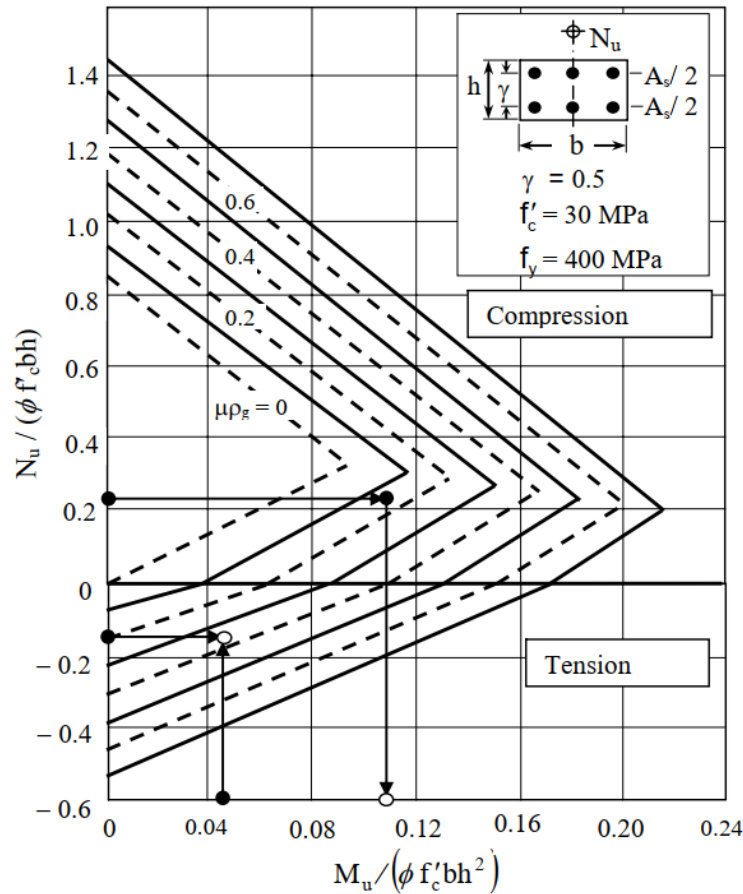
Lực cắt do biên dầm chịu kéo chịu sẽ bằng tổng lực cắt trừ đi phần lực cắt do biên dầm chịu nén chịu. Do cốt thép được bố trí đối xứng nên điểm uốn (có mô men = 0) sẽ nằm ở vị trí chính giữa của các biên dầm. Mô men ở tiết diện nguy hiểm (góc lỗ mở) được xác định như sau:

$$(M_u)_b = (V_u)_b \frac{l_o}{2} \quad (16)$$

Lực dọc trong biên chịu nén được xác định qua công thức 10, từ đó có thể tính toán được cốt thép dọc khi đã có mô men và lực dọc. Cốt thép sẽ được cộng thêm với lượng thép vốn có ở lớp dưới khi tính toán cho dầm đặc, và được bố trí đối xứng như đã trình bày ở các phần trước. Thiết kế chịu cắt tương tự như đối với cấu kiện thông thường.

Việc thiết kế cấu kiện chịu nén uốn, kéo uốn được thực hiện dễ dàng thông qua sử dụng biểu đồ tương tác (sử dụng hệ số giảm độ bền $\phi = 0.9$) cho cấu kiện bố trí cốt thép đối xứng, biểu đồ đã được đơn giản hóa bằng các đường thẳng như trong hình 15, trong đó $\mu = f_y / 0.85f_c'$ và $\rho = 2A_s / bh$. Quy

trình thiết kế đơn giản như trình bày ở trên được thể hiện trong hình này theo hướng mũi tên với vòng tròn rỗng là mục tiêu.



Hình 15: Biểu đồ thiết kế điển hình

3.2.2. Thiết kế chống nứt

Đa số ý kiến đều cho rằng vết nứt có thể được khống chế bằng cách bố trí cốt thép đai ở 2 bên của lỗ mở và các thanh thép chéo xung quanh lỗ mở như thể hiện trong hình 9. Tuy nhiên các ý kiến không thống nhất về số lượng và đường kính của các thanh thép này. Theo Nasser (1967) đặt cốt thép chéo là đủ để khống chế được vết nứt. Lượng cốt thép ở mỗi góc của lỗ mở có thể được xác định như sau:

$$A_d = \frac{\eta V_m}{\phi} \frac{1}{f_{yd} \sin \theta} \quad (17)$$

trong đó η = hệ số tập trung ứng suất, lấy bằng 2; ϕ = hệ số giảm độ bền, f_{yd} = cường độ cốt thép, và θ = góc nghiêng của thanh thép so với trục dọc của dầm

Theo Barney (1977) chỉ cần sử dụng cốt đai là có thể kiểm soát vết nứt, lượng cốt đai được tính bằng:

$$A_v = \frac{V_m}{\phi} \frac{1}{f_{yv}} \quad (18)$$

Rõ ràng nếu chỉ bố trí 1 trong 2 loại thép trên là khá cực đoan. Những nghiên cứu của đại học Singapore (Mansur 1984) cho thấy việc kết hợp cả cốt đai và thép chéo gia cường ở góc lỗ với hệ số tập trung ứng suất bằng 2 là hợp lý hơn.

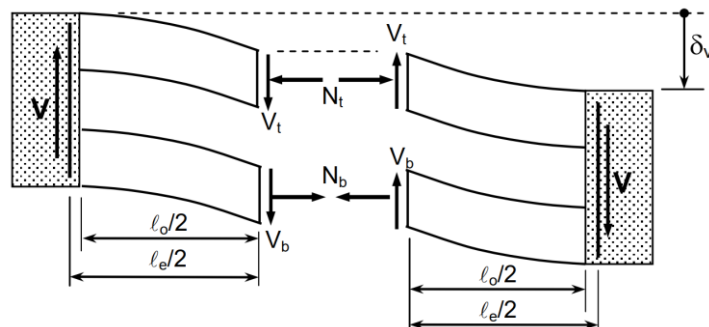
3.2.3. Kiểm tra võng

Rất khó để xác định một tỉ lệ nhịp / chiều cao dầm với mục đích đảm bảo giới hạn độ võng như đối với các dầm thông thường. Do đó, độ võng của dầm có lỗ mở lớn cần được tính toán và kiểm tra so sánh với giá trị giới hạn. Phương pháp đơn giản để xác định độ võng lớn nhất dưới tác dụng của tải trọng sử dụng đối với dầm đơn giản có lỗ mở được trình bày dưới đây (Barney 1977)

Sơ đồ như trong hình 16 xem xét các biên dầm như các thanh giằng giữa các phần cứng ở hai bên lỗ mở. Chiều dài làm việc l_e được lấy an toàn là khoảng cách giữa các thanh thép đai ở hai biên lỗ mở. Để phản ánh kết quả thu được từ thí nghiệm (hình 10), các điểm uốn (mô men = 0) được giả thiết là nằm chính giữa các biên dầm (tâm lỗ mở). Do đó mỗi nửa của các biên dầm ứng xử như một thanh công xôn như hình 16. Đặt tên mô men quán tính của các biên dầm lần lượt là I_t và I_b , chuyển vị tương đối của đầu này lỗ mở so với đầu kia dưới tác dụng của lực cắt V được xác định như sau:

$$\delta_v = \frac{V l_e^3}{12 E_c (I_t + I_b)} \quad (21)$$

Trong đó E_c là mô đun đàn hồi của bê tông. I_t được xác định dựa trên tiết diện nguyên của biên trên trong khi I_b cần được xác định có kể đến ảnh hưởng của vết nứt



Hình 16: Sơ đồ tính toán độ võng tại vị trí lỗ mở (Barney et al., 1977)

Giá trị độ võng lớn nhất của dầm được xác định theo công thức:

$$\delta = \delta_w + \delta_v \quad (22)$$

Trong đó δ_w là độ võng dầm khi không xét đến lỗ mở

Ngoài ra, có thể sử dụng phương pháp phân tích chính xác hơn được đề xuất bởi Mansur 1992. Phương pháp này xem xét dầm như là một cấu kiện có các tiết diện vị gián đoạn, gồm các phần đặc

và phần rỗng được hiệu chỉnh độ cứng; sau đó sử dụng phương pháp Direct Stiffness Method để xác định độ võng của dầm. Mansur và Tan (1999) cũng đã xuất bản tài liệu hướng dẫn lựa chọn kích thước và vị trí bố trí lỗ mở.

3.3. Dầm có nhiều lỗ mở và thiết kế phần cấu kiện giữa các lỗ mở

Đối với dầm có nhiều lỗ mở, ngoài việc tính toán và bố trí cốt thép như trình bày ở trên, cần chú ý thêm tính toán và cấu tạo phần cấu kiện giữa các lỗ mở cạnh nhau.

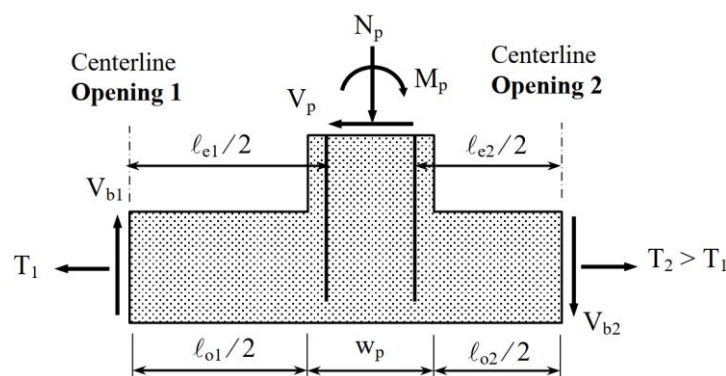
Các thí nghiệm được thực hiện bởi Portland Cement Association (ACI-ASCE, 1973) cho thấy rằng có thể bố trí nhiều lỗ mở trên dầm miễn là phần cấu kiện ở giữa các lỗ mở được thiết kế hợp lý. Hình 17 là thí nghiệm của một dầm chữ T lật ngược có nhiều lỗ mở hình chữ nhật với phần bê tông giữa các lỗ mở được thiết kế đầy đủ cốt thép, thí nghiệm cho đến khi phá hoại dầm (Tan 1996)



Hình 17: Thí nghiệm dầm có nhiều lỗ mở

Để đảm bảo phần bê tông giữa các lỗ mở là đủ cứng, Barney (1977) khuyến cáo rằng các lỗ mở nằm cạnh nhau nên nằm cách nhau một khoảng lớn hơn 2 lần bề rộng dầm. Bên cạnh đó ứng suất cắt tại vị trí đó không được vượt quá $0.17(f'_c)^{0.5}$ (MPa)

Khi hai lỗ mở được đặt gần nhau, phần bê tông giữa hai lỗ mở phải chịu đồng thời lực cắt V_p , lực nén N_p và mô men uốn M_p như hình 18



Hình 18: Lực tác dụng lên phần cấu kiện ở giữa các lỗ mở

Giả thiết là điểm uốn (mô men = 0) nằm ở chính giữa biên dầm, ta có các phương trình cân bằng:

$$V_p = T_2 - T_1 \quad (7)$$

$$N_p = V_{b1} - V_{b2} \quad (8)$$

$$M_p = (T_2 - T_1) \left(d_o + \frac{d_b}{2} \right) - V_{b1} \left(\frac{l_{e1} + w_p}{2} \right) - V_{b2} \left(\frac{l_{e2} + w_p}{2} \right) \quad (9)$$

Sau khi xác định được V_p , N_p và M_p , phần cấu kiện giữa các lỗ mở được thiết kế như cấu kiện thông thường.

4. Kết luận

Bài viết này trình bày một cách ngắn gọn nhưng toàn diện về phân tích và thiết kế dầm bê tông cốt thép có lỗ mở ở bụng dầm dưới tác dụng đồng thời của uốn và cắt, cho thấy ứng xử khác nhau giữa các dầm có lỗ mở hình chữ nhật, hình tròn và dầm có các lỗ mở lớn hình chữ nhật. Bài viết cũng đề cập đến các trường hợp khoan lỗ trên các dầm hiện trạng hay trường hợp đặc biệt như dầm có nhiều lỗ mở lớn. Bài viết cũng chỉ ra rằng phương pháp thiết kế dầm có lỗ mở lớn hình nhật có thể được đơn giản hóa nếu bố trí cốt thép đối xứng trên các biên dầm. Thông tin chi tiết có trong tài liệu duy nhất từ trước cho đến nay đề cập đến lỗ mở trên dầm của Mansur và Tan (1999)