

MỘT SỐ KẾT QUẢ NỔI BẬT TRONG NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VÀ LÝ THUYẾT VỀ PHƯƠNG PHÁP ĐƯỜNG TRUYỀN LỰC THAY THẾ CHỐNG SỤP ĐỔ LŨY TIẾN

TS. PHẠM ANH TUẤN

Viện KHCN Xây dựng

Tóm tắt: Với rủi ro ngày càng tăng từ các cuộc tấn công khủng bố nhằm vào các cơ sở chính phủ và công trình công cộng ngày nay trên thế giới, tầm quan trọng của việc bảo vệ các công trình khỏi các sự cố nghiêm trọng như vậy, bao gồm cả sự sụp đổ lũy tiến ngày càng cấp thiết. Tuy nhiên, việc thiết kế các kết cấu chống sụp đổ lũy tiến hoàn toàn dựa vào khả năng chịu uốn là không kinh tế, vì sụp đổ lũy tiến là một sự kiện có xác suất xảy ra thấp. May mắn thay, các nghiên cứu hiện nay chỉ ra rằng trong kết cấu bê tông cốt thép luôn tồn tại một số cơ chế chịu lực thứ cấp, thường bị bỏ qua trong các thiết kế kết cấu chịu các tải trọng thông thường. Các cơ chế thứ cấp này, tùy thuộc vào vị trí của cột bị mất và loại cấu kiện, có thể được sử dụng để giảm thiểu sự nhạy cảm của công trình với việc sụp đổ. Bài báo này cung cấp một cái nhìn tổng quan về những nghiên cứu mới đối với các cơ chế chịu lực khả thi, bao gồm hiệu ứng Vierendeel (uốn của dầm), hiệu ứng vòm chịu nén, hiệu ứng màng chịu nén, hiệu ứng dây căng, hiệu ứng màng chịu kéo, trong việc chống lại sự sụp đổ lũy tiến của các kết cấu BTCT.

Từ khóa: sụp đổ lũy tiến, đường truyền lực thay thế, hiệu ứng vòm chịu nén, hiệu ứng màng chịu nén, hiệu ứng dây căng, hiệu ứng màng chịu kéo

Abstract: With increasing risks of terrorist attacks to public and governmental facilities around the world, the importance of protecting buildings from such crucial events, including progressive collapse, is increasingly urgent. However, designing against progressive collapse while totally relying on flexural mechanism is uneconomical, because progressive collapse is a very rare event. Luckily, recent studies show that there are some upper-bound load-resisting mechanisms in reinforced concrete structures which are normally neglected in conventional structural design. These secondary mechanisms, developed depending on the location of the lost column and the type of structure, can be

used to mitigate the threat of collapse. This paper provides an overview of current studies on possible load-resisting mechanisms, including Vierendeel action (flexural behavior), compressive arch action, compressive membrane action, catenary action, tensile membrane action, in resisting progressive collapse for RC structures.

1. Mở đầu

Sụp đổ lũy tiến (SDLT) được định nghĩa bởi tiêu chuẩn ASCE 7[1] như sự lan truyền của một sự cố cục bộ ban đầu từ cấu kiện này sang cấu kiện khác, cuối cùng dẫn đến sự sụp đổ của toàn bộ kết cấu hoặc một phần lớn không tương xứng (so với hư hỏng cục bộ ban đầu) của nó. Trong thập niên 90, mối đe dọa về tấn công khủng bố bằng vũ khí chết người cũng như bằng chất nổ gia tăng nhanh chóng, tạo nên một yêu cầu bức thiết trong việc phát triển các phương pháp tính toán thiết kế công trình chống SDLT. Vụ việc tòa nhà liên bang Murrah bị sập một phần vào tháng 4 năm 1995 do nổ xe bom, và vụ sụp đổ thảm kịch của tòa tháp đôi Trung tâm Thương mại Thế giới vào tháng 9 năm 2001 ở New York được coi như những ví dụ điển hình cho những mối đe dọa này (hình 1). Hiện nay, nhận thức của công chúng với nguy cơ SDLT đã được nâng cao rất nhiều. Chính phủ Mỹ đã ban hành nhiều quy định và hướng dẫn để đối phó với nguy cơ này. Trong đó, các hướng dẫn của Tổng cục quản lý (GSA 2003) [2] và của Bộ Quốc phòng (DoD UFC 4-023-03) [3] được biên soạn nhằm bảo vệ các công trình của chính phủ cũng như các cơ sở quan trọng trước nguy cơ SDLT. Trong phạm vi của các quy định và tiêu chuẩn này, hai phương pháp tính toán được sử dụng rộng rãi nhất là phương pháp gián tiếp (indirect method) và phương pháp trực tiếp (direct method). Phương pháp tính toán gián tiếp yêu cầu kết cấu công trình phải có một mức độ giằng nhất định giữa các cấu kiện với nhau để đảm bảo khả

năng huy động của hiệu ứng dây căng hoặc màng chịu kéo, cũng như để tăng cường tính liên tục và tính dẻo của kết cấu. Tuy nhiên, phương pháp này không yêu cầu phân tích cụ thể ứng xử kết cấu. Trong khi đó, phương pháp trực tiếp yêu cầu tiến hành phân tích ứng xử kết cấu dưới tác dụng cụ thể của tải trọng bất thường. Phương pháp này đề ra hai quy trình thiết kế: Đường truyền lực thay thế

(ĐTLTT) – Alternate load path, và Thiết kế cấu kiện chính (TKCKC) – Key element design. Nếu như ĐTLTT cho phép một sự hư hại cục bộ xảy ra và hệ kết cấu còn lại sẽ được phân tích và thiết kế để chống lại sự lan truyền của phá hoại, thì phương pháp TKCKC chỉ tập trung vào việc kiểm tra các kết cấu chính của công trình trước các tải trọng đặc biệt sinh ra bởi những nguy cơ cụ thể.



a) Tòa nhà Liên bang sụp đổ (1995)



b) Trung tâm thương mại thế giới bị tấn công (2001)

Hình 1. Sự kiện mang tính biểu tượng của sụp đổ lũy tiến

Phương pháp ĐTLTT được thực hiện dựa vào giả thiết mất cột đột ngột, trong đó một cấu kiện cột hoặc tường chịu lực chính bị loại bỏ cưỡng bức ra khỏi hệ kết cấu do một nguyên nhân bất thường như tải nổ hoặc va chạm. Sau đó, hệ kết cấu còn lại sẽ được phân tích để kiểm tra xem việc thay đổi đường truyền lực do mất một kết cấu đỡ chính có gây ra sụp đổ hay không, và hệ cấu kiện xung quanh có đảm bảo được liên kết theo phương ngang đủ cứng cho phần kết cấu bị ảnh hưởng hay không. Phương pháp ĐTLTT không quan tâm đến nguyên nhân cụ thể gây ra sự mất cột ban đầu. Vì vậy nó được coi như một phương pháp thiết kế không cần phụ thuộc vào nguyên nhân (threat-independent) và được chấp nhận rộng rãi trong cộng đồng thiết kế và nghiên cứu khi đánh giá khả năng chống SĐLT của công trình. Trong kết cấu BTCT truyền thống, hệ khung dầm-cột được xem là những cấu kiện chính để chống lại SĐLT. Vì vậy, kết cấu này đã được sử dụng rất nhiều trong các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng gần đây.

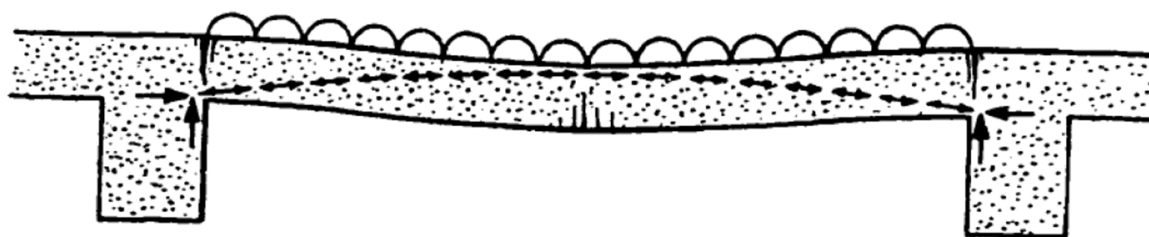
Các hướng dẫn thiết kế hiện nay (GSA và DoD) đề xuất thiết kế kết cấu dựa trên các phần

mềm thiết kế kết cấu thương mại (ETABS và SAP2000), trong đó, ứng xử chịu uốn của kết cấu được xem là cơ chế chịu lực chính. Kết cấu được cho phép làm việc vượt qua giới hạn của trạng thái đàn hồi khi kể đến sự hình thành của các khớp dẻo cũng như góc xoay giới hạn của các khớp dẻo này. Tuy nhiên, do các sự kiện sụp đổ lũy tiến có xác suất xảy ra thấp, dẫn tới việc thiết kế công trình sẽ trở nên không kinh tế khi chỉ dựa hoàn toàn vào ứng xử uốn để chống lại việc sụp đổ do mất cột. Vì vậy, khi tính toán sức kháng của công trình chống lại SĐLT, các cơ chế giới hạn trên của khả năng chịu lực (upper bound resistance) cần được xem xét để giúp giảm mức độ nghiêm trọng của sự sụp đổ, cũng như đảm bảo tính kinh tế của thiết kế. Bài báo này trình bày các kết quả của những nghiên cứu gần đây về các cơ chế truyền lực tiềm năng trong kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) để chống lại SĐLT, bao gồm hiệu ứng vòm chịu nén (HUVCN) và hiệu ứng dây căng (HUDC) trong hệ dầm 2D, hiệu ứng màng chịu nén (HUMCN) và hiệu ứng màng chịu kéo (HUMCK) trong sàn làm việc hai phương (hiệu ứng 3D).

2. Định nghĩa HUVCN và HUDC

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra một cơ chế truyền lực thay thế trong giới hạn chuyển vị nhỏ dựa trên hiệu ứng nén giúp tăng khả năng chịu tải vượt quá giới hạn chảy dẻo do uốn được quy ước là UHVCN hoặc HUMCN. Hình 2 mô tả một sàn hoặc dầm BTCT bị ngăn cản theo phương dọc trục và chịu tải trọng phân bố đều. Khi chuyển vị của dầm dưới tác động của tải trọng thẳng đứng là tương đương nhỏ, và hai đầu dầm được liên kết để ngăn

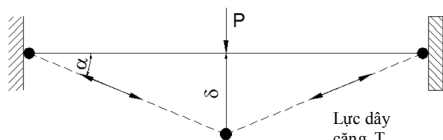
cản/hạn chế chuyển vị ngang cũng như chuyển vị xoay của nút, dẫn đến việc hình thành một lực nén ở trong dầm, giúp góp phần cân bằng với lực tác dụng theo phương đứng, từ đó giúp tăng cường khả năng chịu lực của dầm. Ứng xử này được gọi là hiệu ứng vòm chịu nén (HUVCN), thường được sử dụng để mô tả hiện tượng vòm trong các sàn một phương hoặc dầm 2D trong khi hiệu ứng màng chịu nén (HUMCN) thường dành cho các sàn làm việc theo hai phương (3D).



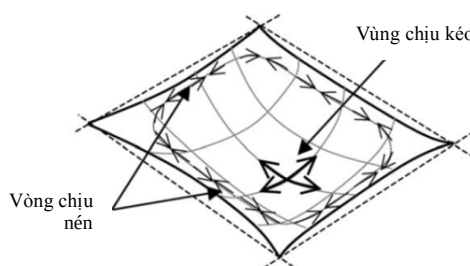
Hình 2. Sơ đồ phát triển hiệu ứng vòm chịu nén để chống lại tải trọng tập trung [4]

Sau khi dầm BTCT bị hạn chế theo phương dọc trục đạt đến tải trọng cực đại, sức kháng sẽ giảm do hư hỏng vật liệu (đập vỡ bê tông vùng chịu nén) hoặc mất ổn định hình học. Nếu gối ngăn cản chuyển vị ngang và chiều dài neo thép vào gối là đủ, lực dọc trong dầm sẽ dần thay đổi từ nén sang kéo. Lực dọc trục này có thể cung cấp thêm khả năng chịu tải, hoạt động như lực của một dây cáp chịu kéo trong trạng thái chuyển vị lớn, như

trong hình 3a. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng dây căng (HUDC) trong dầm. Đối với các sàn theo hai phương, hiện tượng này được gọi là hiệu ứng màng chịu kéo (HUMCK), và có thể phát triển ngay cả khi không có các ngăn cản chuyển vị ngang ở biên do việc hình thành một vòng chịu nén ở biên của sàn, có tác dụng cân bằng lực với các lực kéo xuất hiện ở lưới màng chịu kéo tại tâm của sàn (hình 3b).



a) HUDC trong dầm bị hạn chế chuyển vị dọc trục



b) HUMCK trong sàn hai phương

Hình 3. Sơ đồ phát triển hiệu ứng dây căng và màng chịu kéo của kết cấu BTCT

3. Các nghiên cứu thực nghiệm điển hình về ĐTLT

Su và cộng sự [5] đã thí nghiệm 12 dầm gấp đôi nhịp BTCT với các tỷ lệ cốt thép chịu uốn và tỷ lệ nhịp trên chiều cao khác nhau để đánh giá hiệu quả của UHVCN trong phòng ngừa SĐLT. Kết quả thí nghiệm chỉ ra rằng: (1) UHVCN có thể tăng khả

năng chịu tải khi chảy dẻo lên tới 78,6% dựa trên kết quả đo được của mẫu thí nghiệm. UHVCN đạt hiệu quả lớn hơn trong các mẫu với tỷ lệ nhịp trên chiều cao dầm nhỏ; (2) tác động của UHVCN tăng lên với tỷ lệ nhịp trên chiều cao dầm giảm dần và tỷ lệ cốt thép chịu uốn giảm; (3) để tận dụng lợi thế của UHVCN, các dầm có tiết diện cao và tỷ lệ cốt

thép dọc thấp nên được sử dụng trong thiết kế kết cấu.

Lew và cộng sự [6] đã tiến hành hai thí nghiệm khung cột dầm tỷ lệ 1:1 (ký hiệu là IMF và SMF) để nghiên cứu khả năng chịu lực của các khung BTCT dưới kích bản mất cột giữa. Hai mẫu IMF và SMF tương ứng đại diện cho một phần của hệ khung kết cấu của tòa nhà 10 tầng được thiết kế theo ACI 318 dưới dạng khung chịu mô men trung bình (IMF) và khung chịu mô men đặc biệt (SMF). Kết quả kiểm tra chỉ ra rằng UHVCN có thể tăng khả năng chịu tải của khung IMF và SMF tương ứng là 10,9% và 15,6%.

Yu và Tan [7] đã thí nghiệm 6 cụm cấu kiện cột dầm BTCT, bao gồm hai dầm đơn, một nút giữa và hai cuống cột. Tương tự như các thí nghiệm được thực hiện bởi Su [5], các mẫu thử được kiểm tra đúng theo kích bản loại bỏ cột giữa. Hiệu quả của UHVCN và UHDC để ngăn chặn sụp đổ lũy tiến đã được ghi nhận rõ ràng. Thí nghiệm này chỉ ra rằng: (1) UHVCN có thể tăng khả năng chịu uốn tính toán dựa trên cơ chế khớp dẻo thông thường; (2) UHVCN là một cơ chế chịu lực giới hạn trên có lợi cho dầm với chuyển vị nhỏ vì HUDC đòi hỏi biến dạng lớn (bắt đầu ở khoảng chuyển vị một lần chiều cao dầm); (3) UHVCN đạt được giá trị cực đại tại chuyển vị nút giữa là 0,18-0,46 lần chiều cao của dầm.

Để tính đến cả ảnh hưởng của các nhịp liên kề và các tầng phía trên tầng có cột bị mất, một thí nghiệm tựa tĩnh trên khung phẳng BTCT nhiều nhịp nhiều tầng được tiến hành bởi Yi và cộng sự [8]. Kết quả của thí nghiệm này chỉ rõ ba cơ chế chịu lực khác nhau. Ban đầu, ứng xử đàn hồi thể hiện rõ trong khoảng chuyển vị nhỏ của dầm gấp đôi nhịp. Sau đó, ứng xử dẻo được ghi nhận khi các thanh cốt thép dọc bắt đầu chảy và khớp dẻo hình thành ở hai đầu của dầm ở tầng một. Cuối cùng, HUDC đã phát triển khi ứng xử của kết cấu tăng đáng kể tiến tới trạng thái biến dạng lớn. Kết quả của nghiên cứu này cho thấy HUDC trong các dầm đóng vai trò quan trọng để bảo vệ kết cấu khỏi sự sụp đổ, đồng thời hiệu ứng này cũng phụ thuộc rất nhiều vào các điều kiện hạn chế chuyển vị ở biên ngang.

Trong các loạt thí nghiệm [6, 8], sự sụp đổ được quy định là tại thời điểm khi cốt thép dọc lớp dưới trong dầm gần nút giữa bị đứt. Tiêu chí đánh giá này khá bảo thủ vì cốt thép lớp trên còn lại vẫn

có thể đóng góp cho sự phát triển của HUDC với giá trị tải trọng thẳng đứng cao hơn, như đã được kiểm chứng trong [7].

Để nghiên cứu việc huy động HUDC trong các kết cấu khung dầm-cột dưới các điều kiện biên khác nhau, hai thí nghiệm khung được thực hiện bởi Lim và cộng sự [9]. Hai mẫu, được đặt tên là FR và PR, có chung thiết kế hình học và cốt thép, ngoại trừ các điều kiện biên ở hai đầu của mẫu là khác nhau. Trong khi FR đại diện cho khung BTCT với biên cả hai phía bị hạn chế hoàn toàn (mất cột giữa), khung PR chỉ bị hạn chế hoàn toàn ở một bên và bên còn lại bị hạn chế một phần (đại diện cho mất cột cạnh cột biên). Kết quả thí nghiệm đã làm sáng tỏ sự khác biệt về ứng xử kết cấu giữa hai mẫu liên quan đến HUDC, được huy động khá đầy đủ ở khung bị hạn chế chuyển vị ngang cả 2 phía (FR) ngay cả sau khi đứt cốt thép lớp dưới dầm ở gần nút giữa. Trong khi đó, ở thí nghiệm khung PR, sau khi cốt thép lớp dưới trong dầm bị đứt, cột biên ở phía bị hạn chế một phần bắt đầu di chuyển vào bên trong nhịp, dẫn tới việc HUDC không thể phát triển một cách đáng kể.

Tóm lại, từ các thí nghiệm tựa tĩnh trước đây trên các kết cấu khung dầm-cột BTCT theo kích bản mất cột, sự huy động và phát triển của cả UHVCN và HUDC phụ thuộc rất lớn vào các điều kiện biên, cả về chuyển vị ngang lẫn chuyển vị xoay. Thí nghiệm cho thấy HUDC bắt đầu phát triển khi chuyển vị nút giữa của dầm gấp đôi nhịp đạt tới một lần chiều cao dầm. Sau đó, khi độ võng tiếp tục tăng, cốt thép lớp dưới của dầm gần với nút giữa bị đứt, dẫn đến giảm khả năng chịu tải đột ngột. Chuyển vị tương ứng với phá hoại này ở khoảng 1/8 đến 1/11 nhịp thông thủy. Có thể nói, việc đứt cốt thép chịu ảnh hưởng đáng kể bởi tỷ lệ nhịp trên chiều cao dầm, sự bố trí cốt thép chịu uốn, và cường độ bền của cốt thép. Nếu chuyển vị tiếp tục tăng sau khi đứt các thanh cốt thép [7, 9-11], khả năng chịu tải sẽ tăng trở lại và khả năng chịu tải cuối cùng có thể lớn hơn cả cường độ cực đại được cung cấp bởi các giai đoạn của UHVCN và HUDC trước khi đứt các thanh cốt thép đáy.

4. Nghiên cứu mô phỏng số về ĐTLTT

Bên cạnh nghiên cứu thực nghiệm, một số nghiên cứu về mô phỏng số đã được thực hiện đối

với ứng xử tĩnh của các kết cấu dầm-cột có liên quan đến các hiện tượng phi tuyến như thay đổi hình học dưới chuyển vị lớn, đập vỡ bê tông ở biến dạng lớn, sự chảy dẻo và biến dạng của cốt thép,... Việc xây dựng các mô hình mô phỏng sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) chi tiết, với các phần tử khối dựa dạng vật lý hoặc với các phần tử thớ đơn giản hóa kết hợp rời rạc hóa mô hình nút dầm-cột có thể cho các dự đoán hợp lý so với thí nghiệm thực tế. Các phần mềm PTHH thương mại phổ biến được sử dụng trong nghiên cứu SĐLT gồm có LS-Dyna, Abaqus, DIANA, ANSYS,... Tuy nhiên, các chương trình này chỉ phổ biến trong giới học thuật, ít thịnh hành trong giới kỹ sư kết cấu. Bên cạnh đó, người dùng được yêu cầu phải có trình độ, kỹ năng mô hình hóa cao, kiến thức tốt về PTHH và phải có tài nguyên điện toán lớn khi mô phỏng bằng các phần mềm trên. Trong giai đoạn thiết kế cơ sở khi các kỹ sư cần nghiên cứu các tùy chọn khác

nhau để đi đến các giải pháp kết cấu hợp lý và kinh tế chống lại sự SĐLT, các phương pháp giải tích (lý thuyết) đơn giản hóa (có thể tính bằng tay hoặc sử dụng các vòng lặp đơn giản) được ưu tiên thay vì mô phỏng bằng PTHH.

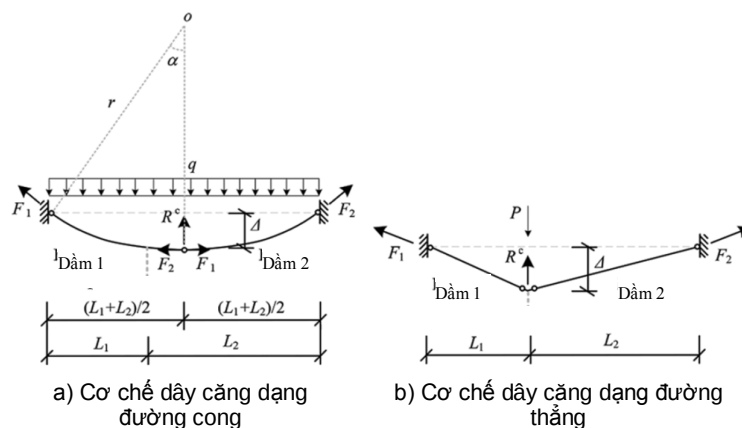
5. Các nghiên cứu bằng phương pháp giải tích (lý thuyết) đơn giản hóa

Để biểu diễn khả năng chịu lực của hiệu ứng vòng nén trong cấu kiện BTCT làm việc một phương (sàn một phương), Park và Gamble [12] đã đề xuất một mô hình để tính toán khả năng hoạt động của hiệu ứng màng chịu nén (HUMCN) và phản lực ngang cực đại tại gối. Một cách tương tự, mô hình này cũng có thể được sử dụng để ước tính khả năng của HUVCN của các kết cấu dầm-cột BTCT. Khả năng của HUVCN trong kết cấu dầm gấp đôi nhịp chịu tải trọng tập trung tại nút giữa được xác định bằng phương trình (1), theo Yu và Tan [13].

$$P = \frac{2}{L_n} \left(0.85f'_c \beta_1 b h \left[\frac{h}{2} \left(1 - \frac{\beta_1}{2} \right) + \frac{\delta}{4} (\beta_1 - 3) + \frac{L_n^2}{2\delta} (\beta_1 - 1) \varepsilon_t + \frac{L_n^2}{2h} \left(1 - \frac{\beta_1}{2} \right) \varepsilon_t + \frac{\delta^2}{8h} \left(2 - \frac{\beta_1}{2} \right) - \frac{\beta_1 L_n^4}{4\delta^2 h} \varepsilon_t^2 \right] - \frac{(T' - T - C'_s + C_s)}{3.4f'_c b} + (C'_s + C_s) \left(\frac{h}{2} - d' - \frac{\delta}{2} \right) + (T' + T) \left(d - \frac{h}{2} + \frac{\delta}{2} \right) \right) \quad (1)$$

trong đó: L_n - nhịp đơn thông thủy của dầm; b và h lần lượt là chiều rộng và chiều cao của dầm; f'_c - cường độ nén của bê tông; β_1 - tỷ lệ độ cao của khối ứng suất tương đương của bê tông với độ cao của trục trung tính tiết diện; T và T' lần lượt là các lực kéo cốt thép của các tiết diện gần nút giữa và nút biên; C_s và C'_s lần lượt là các tổng hợp lực nén của thanh cốt thép của các tiết diện gần nút giữa và nút biên; d và d' lần lượt là khoảng cách từ cốt thép chịu kéo và nén đến thớ bê tông chịu nén cực đại; δ - chuyển vị nút giữa; và ε_t - tổng biến dạng do biến dạng dọc trục và chuyển vị của các gối đỡ.

Đối với HUDC, Li và cộng sự [14] đề xuất các phương trình cho các cơ chế dây căng dạng thẳng và dạng cong bậc hai tương ứng chịu tải tập trung và phân bố, giúp xác định mối quan hệ giữa tải trọng tác dụng R_N và biến dạng tương ứng Δ (hình 4). Khả năng chịu lực của kết cấu được tính toán dựa trên các phương trình (2) và (3) cho các điều kiện tải phân bố và tập trung. Tuy nhiên, mô hình của Li giả định gối tựa ngang là hoàn toàn cứng ở cả hai đầu của dầm gấp đôi nhịp. Điều này rất khó đạt được trong cả các thí nghiệm đã được công bố cũng như trong các kết cấu thực tế. Bên cạnh đó, cơ chế này không phân biệt ứng xử của UHDC trước và sau khi đứt cốt thép lớp dưới trong dầm.



Hình 4. Mô hình ứng xử dây căng [14]

$$R_N = \frac{8F_{1y}}{(L_1+L_2)} \Delta \quad (2)$$

$$R_N = \frac{(L_1+L_2)F_{1y}}{L_1L_2} \Delta \quad (3)$$

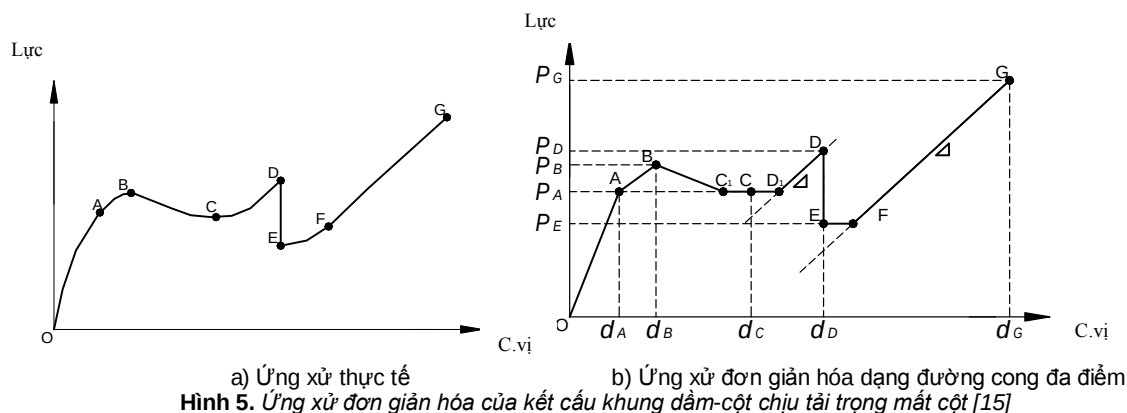
trong đó: L_1 và L_2 - hai nhịp của kết cấu; F_{1y} - lực kéo chảy dẻo của dầm.

Nhằm khắc phục các hạn chế trong mô hình của Li, Phạm và Tan [15] đã đề xuất một quy trình tính toán bán giải tích để dự đoán ứng xử kết cấu của hệ khung dầm-cột, có kể đến ảnh hưởng của HUDC. Phương pháp này đơn giản hóa ứng xử thực của khung dầm-cột BTCT dưới

tải trọng mắt cột đột ngột bằng một hệ đường cong đa điểm (hình 5). Mô hình này được chứng minh là cho kết quả phù hợp so với các kết quả thực nghiệm và kết quả mô phỏng bằng PTHH. Sự phát triển của HUDC trước và sau khi đứt cốt thép dưới của dầm được thể hiện qua hai phương trình sau:

$$P_{D1D}(d) = \beta_1 \frac{F_{top}^y}{L_n} (d - \beta_2 \cdot d_{beam}) + \frac{2M_{mid}}{L_n} \quad (4)$$

$$P_{FG}(d) = \beta_1 \frac{F_{top}^y}{L_n} (d - \beta_2 d_{beam}) \quad (5)$$



Hình 5. Ứng xử đơn giản hóa của kết cấu khung dầm-cột chịu tải trọng mắt cột [15]

Mô hình của Phạm cũng cho thấy trong khi độ cứng chống xoay của gối chỉ ảnh hưởng đến HUVCN ban đầu và ít ảnh hưởng đến các ứng xử còn lại, thì độ cứng ngang của gối có tác dụng lớn đối với cả HUVCN và HUDC tiếp sau đó. Các yếu tố khác như cường độ bê tông, khe hở của mối nối liên kết (chỉ có trong thí nghiệm) hoặc cốt thép lớp dưới của dầm ít ảnh hưởng đến HUDC. Giả thiết gối theo phương ngang tuyệt đối cứng giúp đơn giản hóa việc tính toán nhưng khó đạt được trong thực tế. Thay vào đó, nếu khả năng chịu lực ngang

tối đa của gối nhỏ hơn phản lực ngang tối đa theo yêu cầu của hệ dầm gấp đôi nhịp, HUDC sẽ không thể phát huy một cách đầy đủ sau khi cốt thép lớp dưới dầm đã đứt.

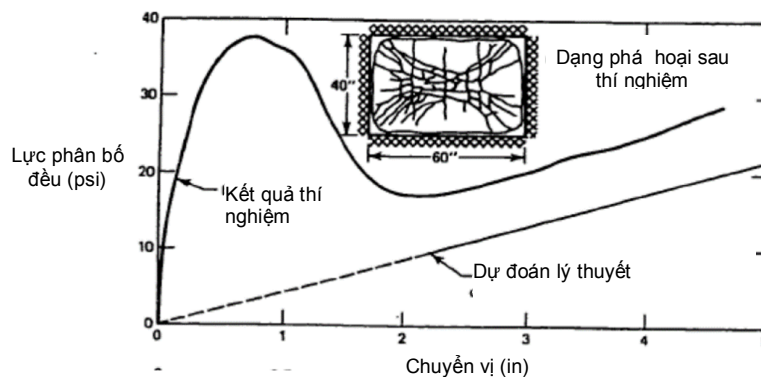
Dựa trên một loạt thí nghiệm cho sàn chịu tải phân bố dưới điều kiện biên tuyệt đối cứng, Park [16] đã xây dựng một mô hình giải tích để tính toán khả năng chịu lực của HUMCK (hình 6). Sự phát triển của màng chịu nén được nhận thấy khi chuyển vị ở khoảng một nửa độ dày của sàn, được theo sau bởi HUMCK cho đến khi các sàn bị phá hoại do

đứt cốt thép song song với nhịp ngắn. Park đề nghị sử dụng tỷ lệ độ võng tương đương 1/10 nhịp ngắn để ước tính một cách thiên về an toàn khả năng

chịu tải cực hạn cho HUMCK. Park cũng đề xuất một phương trình tuyến tính thiên về an toàn cho HUMCK, bỏ qua sự đóng góp của cơ chế chịu uốn:

$$\frac{wL_x^2}{T_x\Delta} = \frac{\pi^3}{\sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} (-1)^{\frac{n-1}{2}} \left(1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{n\pi L_y}{2L_x} \sqrt{\frac{T_x}{T_y}}\right)} \right)} \quad (6)$$

trong đó: w và Δ tương ứng là tải trọng áp dụng và chuyển vị của sàn; L_x và L_y lần lượt là nhịp ngắn và nhịp dài; T_x và T_y lần lượt là các lực chảy dẻo trên mỗi đơn vị chiều rộng theo hướng x và y .

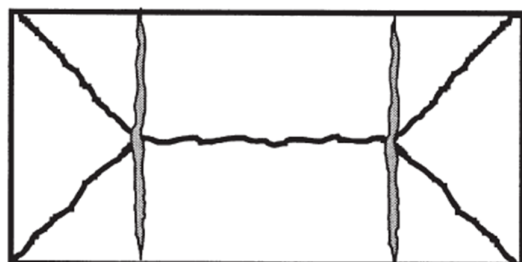


Hình 6. Ứng xử của sàn ngàm hoàn toàn chịu lực phân bố [16]

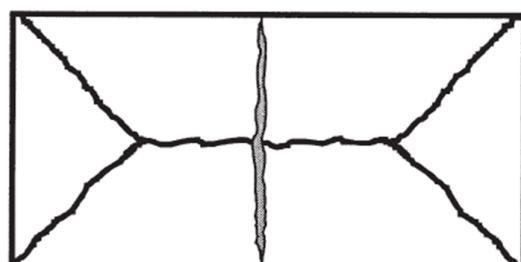
Mô hình Bailey cho các sàn gối đơn giản chịu tải phân bố

Mô hình của Park dựa trên các thí nghiệm về sàn ngàm cứng tại biên. Tuy nhiên, các nghiên cứu thực nghiệm khác đã chỉ ra rằng HUMCK có thể phát triển ngay cả khi không có gối sàn theo phương ngang. Từ đó, Bailey [17] đã phát triển một phương pháp lý thuyết để dự đoán khả năng phát triển

HUMCK của các sàn BTCT trên phương pháp cân bằng lực. Hai dạng phá hoại được xem xét trong mô hình này (hình 8). Sử dụng giả thiết ứng xử cứng-dẻo, sự phân bố các ứng xử chịu uốn và ứng xử màng có thể được tách thành các phần khác nhau trong mặt phẳng (hình 9). Mô hình Bailey cũng cung cấp một phương trình đơn giản để dự đoán biến dạng tối đa do đứt cốt thép (phương trình (7)).

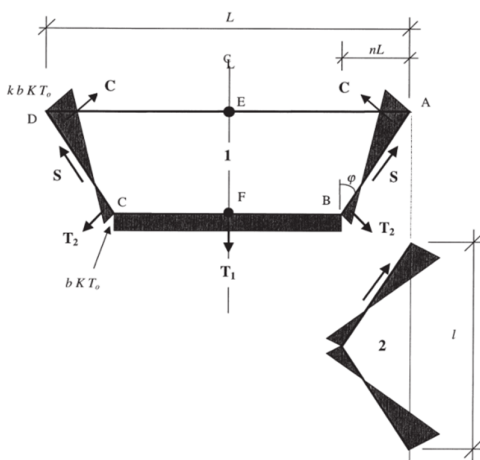


a) Chế độ phá hoại (i) - vết nứt hình thành tại giao điểm của đường chéo



b) Chế độ phá hoại (ii) - vết nứt hình thành ở trung tâm của tấm

Hình 7. Chế độ phá hoại sàn dưới biến dạng lớn [17]

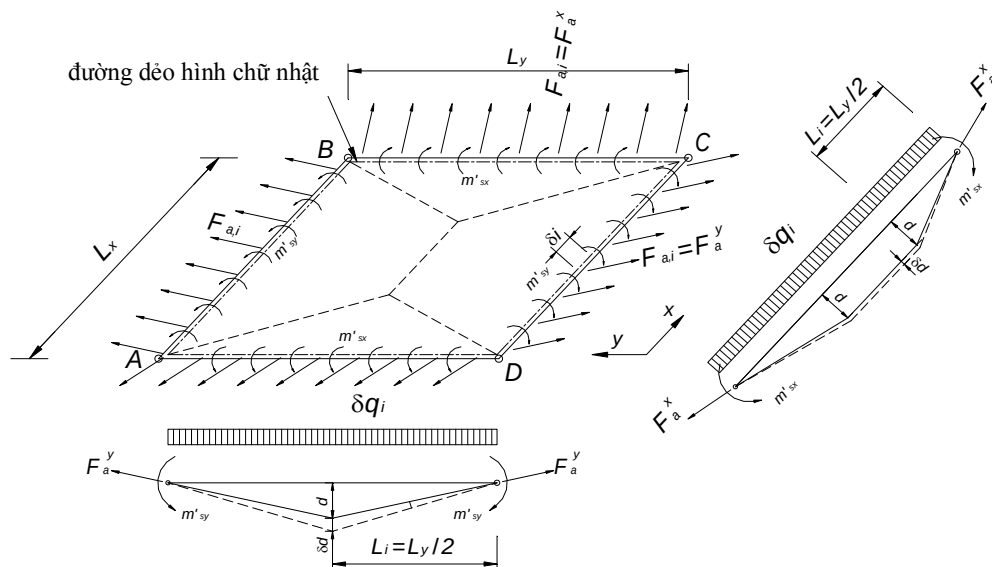


Hình 8. Phân phối ứng suất trong mặt phẳng [17]

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{0.5f_y}{E}\right)_{reinft} \frac{3L^2}{8}} \quad (7)$$

Các thí nghiệm và mô hình của Park và Bailey áp dụng cho các ô sàn độc lập, không kể đến sự có mặt của các dầm nằm trong ô sàn. Trong khi đó, kết cấu dầm-sàn BTCT dưới kích bản mất cột thường tạo nên một hệ dầm-sàn gấp đôi nhịp, và các ĐTLTT phải có khả năng giúp kết cấu vượt qua sự cố gấp đôi nhịp này. Để kể đến ảnh hưởng của dầm trong điều kiện HUMCK được phát huy trong sàn, một phương pháp lý thuyết được đề xuất bởi Pham và Tan [18] để dự đoán khả năng chịu lực của kết cấu dầm-sàn BTCT theo kích bản loại bỏ cột giữa. Mô hình này xem xét cả hai phương pháp ra tải thường được sử dụng trong các nghiên cứu thực nghiệm về SDLT là tải trọng tập trung và phân bố.

Để thiên về an toàn, HUDC trong dầm được bỏ qua và dầm chỉ đóng góp vào khả năng chịu lực dựa trên ứng xử uốn. Trong khi đó, cả ứng xử uốn dựa theo lý thuyết đường dẻo và ứng xử màng chịu kéo được kể đến trong sàn. HUMCK được giả thiết là phát triển dựa trên lực chảy dẻo của cốt thép lớp trên, được bố trí dọc theo các đường dẻo mô men âm của sàn (hình 9). Dầm được coi là phá hoại khi đứt cốt thép dọc trong dầm giữa tại vị trí giữa nhịp hoặc gần mép của các nút dầm-cột ở biên. Mô hình này được chứng minh là hợp lý vì có thể cung cấp các dự đoán an toàn so với các thí nghiệm thực tế. Mô hình này cung cấp một phương pháp thực hành đơn giản để có thể dự đoán nhanh và thiên về an toàn khả năng chịu lực của hệ dầm-sàn khi chịu sự cố SDLT do mất cột giữa.



Hình 9. Lực chảy dẻo của cốt thép lớp trên tại các đường dẻo mô men âm [18]

6. Kết luận

Các nghiên cứu gần đây về các cơ chế giới hạn trên của khả năng chịu lực (upper-bound resistance) để chống lại SĐLT của kết cấu BTCT đã được xem xét và tổng kết trong bài báo này. Qua đó, có thể rút ra được những hiểu biết sau đây:

- (1) Ứng xử uốn (Vierendeel) đóng vai trò quan trọng đối với việc ngăn chặn sụp đổ lũy tiến, đặc biệt là trong các tình huống mất cột góc hoặc cột biên, khi các hiệu ứng khác như HUVCN hoặc HUDC phát huy rất hạn chế. Tuy nhiên, việc phát triển hiệu ứng Vierendeel và duy trì khả năng chịu tải cực hạn dưới tác động của hiệu ứng này phụ thuộc vào khả năng ứng xử của các nút cột dầm ở góc hoặc ở biên. Các nút cột dầm cần được thiết kế và cấu tạo để có thể đạt được hiệu quả trong ứng xử uốn nhờ vào sự tăng cường khả năng chịu cắt và sự chống nở hông cho bê tông được phát huy bởi cốt thép ngang tại các nút.
- (2) Mặc dù HUVCN và HUMCK có thể cải thiện đáng kể khả năng chịu tải của kết cấu BTCT khi chịu SĐLT, vị trí của cột bị mất phải được xác định trước trong quá trình đánh giá khả năng chịu lực của các hiệu ứng này trong thiết kế. Đối với các khung BTCT bị mất cột góc hoặc cột cạnh góc, HUVCN, HUMCK và HUDC có thể không có hiệu quả đáng kể. Các nghiên cứu thực nghiệm bao gồm mô phỏng các điều kiện biên thực tế của các cấu kiện xung quanh nên được thực hiện do hầu hết các thí nghiệm hiện nay chỉ áp dụng các điều kiện biên cứng chống xoay và chống chuyển vị ngang cho các dầm hoặc khung, việc này rất khó đạt được trong công trình thực tế.
- (3) HUDC có thể được phát triển trong giai đoạn chuyển vị lớn nếu ngăn cản chuyển vị ngang của các liên kết bên là đủ khỏe. Tuy nhiên, tương tự như HUVCN, vị trí của cột bị mất ảnh hưởng đến độ tin cậy của HUDC. Nghiên cứu thực nghiệm chỉ ra rằng hiệu ứng này bị hạn chế phát triển trong các khung mất cột góc hoặc cột cạnh góc. Khi mất một cột cạnh góc, sự phá hoại của cột biên hoặc cột góc và sự phá hoại neo của cốt thép dọc dầm ngăn cản sự phát triển của hiệu ứng dây căng.
- (4) Đối với các kết cấu dầm cột, HUDC và HUMCK có thể kết hợp với nhau để chống lại SĐLT tại các chuyển vị lớn. Tuy nhiên, HUMCK trong sàn bắt đầu phát triển sớm hơn nhiều so với hiệu ứng dây căng trong dầm. Đáng chú ý là HUMCK có thể phát huy đáng kể khả năng chịu lực của sàn BTCT ngay cả trong trường hợp mất cột góc hoặc cột biên. Do đó, để thiên về an toàn, có thể bỏ qua sự làm việc của HUDC khi HUMCK được xem xét trong hệ dầm sàn làm việc đồng thời.
- (5) Việc tính toán thiết kế công trình chống lại SĐLT là rất cần thiết trong bối cảnh tình hình thế giới nhiều biến động và chủ nghĩa khủng bố đang có nguy cơ lan rộng. Tuy nhiên, việc sử dụng mô phỏng số bằng PTHH với các phần tử phức tạp như phần tử khối hoặc thớ là một khó khăn đối với các kỹ sư kết cấu thông thường. Do vậy, việc áp dụng các phương pháp tính toán lý thuyết đơn giản hóa và thiên về an toàn là rất cần thiết và cần được phát triển trong thời gian tới đây.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2018.01. Tác giả xin chân thành ghi nhận sự tài trợ này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads for buildings and other structures, *ASCE 7-10. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2010.*
- [2] General Services Administration (2003). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects, *Washington, D.C.,*
- [3] Department of Defense (2013). Design of buildings to resist progressive collapse, *Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-03. Washington, D.C.,*
- [4] Ockleston AJ (1958). Arching Action in Reinforced Concrete Slabs. *The Structural Engineer.*;36:197-201.
- [5] Su Y, Tian Y, Song X (2009). Progressive Collapse Resistance of Axially-Restrained Frame Beams. *ACI Structural Journal.* ;106.

- [6] H. S. Lew YBSP, Mete AS. Experimental Study of Reinforced Concrete Assemblies under Column Removal Scenario. *Structural Journal*.111.
- [7] Yu J, Tan KH (2013). Structural Behavior of RC Beam-Column Subassemblages under a Middle Column Removal Scenario. *Journal of Structural Engineering*;139:233-50.
- [8] Yi WJ, He QF, Xiao Y, Kunnath SK (2008). Experimental study on progressive collapse-resistant behavior of reinforced concrete frame structures. *ACI Structural Journal*;105.
- [9] Lim NS, Lee CK, Tan KH (2015). Experimental studies on 2-D RC frame with middle column removed under progressive collapse. *Proceedings of fib symposium. Copenhagen, Denmark*.
- [10] Sasani M, Kropelnicki J (2008). Progressive collapse analysis of an RC structure. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 17:757-71.
- [11] Yu J, Tan KH (2013). Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of reinforced concrete beam column sub-assemblages. *Engineering Structures*. 55:90-106.
- [12] Park R, Gamble WL (2000). Reinforced concrete slabs: *John Wiley & Sons*.
- [13] Yu J, Tan KH (2010). Progressive collapse resistance of RC beam-column sub. *Proceedings of the third International Conference on Design and Analysis of Protective Structures 2010: advances in protective technology, 10th-12th May. Singapore*.
- [14] Li Y, Lu X, Guan H, Ye L (2014). Progressive Collapse Resistance Demand of Reinforced Concrete Frames under Catenary Mechanism. *ACI Structural Journal*; 111.
- [15] Pham AT, Tan KH (2017). A simplified model of catenary action in reinforced concrete frames under axially restrained conditions. *Magazine of Concrete Research*; 69:1115-34.
- [16] Park R (1964). Tensile membrane behaviour of uniformly loaded rectangular reinforced concrete slabs with fully restrained edges. *Magazine of Concrete Research*;16:39-44.
- [17] Bailey CG (2001). Membrane action of unrestrained lightly reinforced concrete slabs at large displacements. *Engineering Structures*; 23:470-83.
- [18] Pham AT, Tan KH (2019). Analytical model for tensile membrane action in RC beam-slab structures under internal column removal. *Journal of Structural Engineering*;145.
- Ngày nhận bài:** 27/3/2019.
- Ngày nhận bài sửa lần cuối:** 25/4/2019.

**SOME REMARKABLE RESULTS IN EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDIES ON ALTERNATE
LOAD PATH METHOD FOR PROGRESSIVE COLLAPSE MITIGATION**