

Nghiên cứu sự làm việc của kết cấu có tầng cứng và nút liên kết tầng cứng - cột biên chịu tải trọng động đất

Nguyễn Hồng Hải*, Nguyễn Hồng Hà

Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng, Bộ Xây dựng

Ngày nhận bài 14/10/2015, ngày chuyển phản biện 21/10/2015, ngày nhận phản biện 30/3/2016, ngày chấp nhận đăng 7/4/2016

Tính toán lý thuyết và thí nghiệm kiểm chứng, từ đó đưa ra những khuyến nghị trong thực hành thiết kế là phương pháp phổ biến và quan trọng đối với nghiên cứu kết cấu chịu tải trọng động đất trên thế giới, nhưng hiện tại vẫn còn hiếm tại Việt Nam. Bài báo trình bày các vấn đề liên quan đến sự làm việc của nút liên kết cột - dầm cứng và thí nghiệm nút này chịu tải trọng ngang lặp đổi chiều được thực hiện tại Phòng thí nghiệm động đất của Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng. Một số nhận xét và kiến nghị rút ra từ kết quả thí nghiệm cũng được trình bày trong bài báo.

Từ khóa: kháng chấn, liên kết cột - dầm cứng, thí nghiệm.

Chỉ số phân loại 2.1

Research on the behavior of structure with outriggers and column - outrigger joints under seismic load

Summary

Theoretical analysis and experimental verification which help make recommendations in design practice are common and important methods for researching structures under earthquake in the world, but still rare in Vietnam currently. This paper presents the issues related to the column - outrigger joint experiment under cyclic loading in the earthquake laboratory of Institute for Building Science and Technology. Some comments and recommendations drawn from the experimental results are also presented in the paper.

Keywords: experiment, outrigger - column joint, seismic resistance.

Classification number 2.1

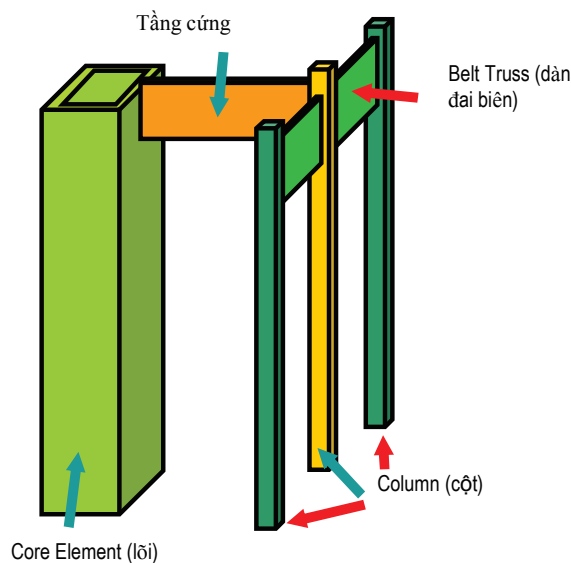
Đặt vấn đề

Trong tính toán thiết kế công trình cao tầng chịu tác động của động đất, sự làm việc của nút liên kết giữa dầm và cột giữ vai trò quan trọng đối với sự làm việc tổng thể của kết cấu. Đối với hệ kết cấu thông thường, khi tính toán thiết kế công trình chịu tác động của động đất, cần ngăn ngừa sự hình thành cơ cấu dẻo ở tầng mềm trong nhà nhiều tầng [1], do vậy, một khái niệm thường được quan tâm và sử dụng rộng rãi trên thế giới trong thiết kế kháng chấn là cột khỏe - dầm yếu [2], theo đó cột được thiết kế với tổng khả năng chịu uốn lớn hơn tổng khả năng chịu uốn của các dầm tại nút liên kết một lượng nhất định tùy thuộc vào các tiêu chuẩn. Tuy nhiên, đối với kết cấu có tầng cứng, khái niệm cột khỏe - dầm yếu không còn được áp dụng [1], kết quả phân tích đối với hệ kết cấu này [3, 4] đã chỉ ra, khớp dẻo được hình thành ở cột trước. Đây là vấn đề cần được đào sâu nghiên cứu cả về lý thuyết và thực nghiệm.

Vấn đề nút liên kết tầng cứng - cột biên cần được quan tâm đối với các công trình nhà cao tầng có sử dụng tầng cứng. Theo các tài liệu kỹ thuật, tầng cứng trong nhà cao tầng thông thường được thiết kế như một hệ dầm ngang, rất cứng [1] (thường gọi là dầm cứng hay tầng cứng) kết nối lõi với các tường và cột ở phía ngoài (hình 1). Theo đó, lõi thường được bố trí ở giữa các cột và dầm cứng phát triển ra các hướng để liên kết lõi và cột. Khi có tải trọng ngang tác dụng vào công trình, các cột được liên kết với tầng cứng có thể ngăn cản góc xoay của lõi làm giảm đáng kể chuyển vị ngang trên đỉnh của lõi [1] so với trường hợp lõi đứng tự do. Nguyên lý làm việc của hệ thống này là sử dụng lõi để

*Tác giả liên hệ: Email: haiibst@gmail.com

chịu hầu hết tải trọng ngang, đồng thời phân khả năng chịu cắt theo phương đứng từ lõi ra cột ngoài thông qua cánh đòn của tầng cứng. Những dầm cứng này liên kết với dàn đai biên (belt truss) kết hợp các cột biên tham gia vào chịu mômen lật. Do đó, khi tải trọng ngang tác động lên công trình, tầng cứng, các cột biên kết hợp cùng với đai biên ngăn cản góc xoay và làm giảm chuyển vị theo phương ngang của kết cấu [1]. Hệ tầng cứng trong nhà cao tầng làm tăng độ cứng của công trình so với hệ kết cấu không dùng tầng cứng. Hệ thống này còn có tác dụng hạn chế sự khác nhau về biến dạng co giãn giữa cột và lõi do tác động môi trường và lực dọc gây ra [1].



Hình 1: hệ kết cấu được bố trí tầng cứng

Căn cứ vào nguyên lý làm việc của hệ kết cấu cao tầng có tầng cứng, nút liên kết tầng cứng - cột biên (dầm cứng, cột mềm) giữ vai trò quyết định đến khả năng làm việc của hệ kết cấu này, do đó cần có nghiên cứu sâu về sự làm việc của các cấu kiện xung quanh tầng cứng, đặc biệt là nút liên kết tầng cứng - cột biên.

Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng đang thực hiện đề tài nghiên cứu sự làm việc của kết cấu nhà siêu cao bằng bê tông cốt thép có tầng cứng chịu tải trọng gió và động đất ở Việt Nam. Thông qua việc tra cứu tài liệu, nhóm đề tài nhận thấy hiện tại đã có khá nhiều nghiên cứu về hệ kết cấu có tầng cứng, cũng đã có những nghiên cứu lý thuyết và cả thiết kế hệ tầng cứng cả trong và ngoài nước nhưng chưa có các nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến ứng xử của nút liên kết giữa dầm cứng với cột và lõi. Tại các vị trí này, nội lực

của cột và lõi có sự thay đổi đột ngột khi chịu tác động của tải trọng động đất [3]. Trong khuôn khổ của bài báo này, chúng tôi trình bày các vấn đề liên quan đến ảnh hưởng của tầng cứng đến sự gia tăng đột biến của nội lực đối với các cấu kiện xung quanh tầng cứng, đặc biệt là các cột biên ngay phía trên và dưới tầng cứng và thí nghiệm kiểm chứng liên kết cột - dầm cứng dưới tác dụng của tải trọng ngang lặp đổi chiều. Mục đích của thí nghiệm là nghiên cứu ứng xử (cường độ, độ cứng và độ dẻo) của liên kết cột - dầm cứng khi chịu tác động của động đất, xem xét dạng phá hoại của nút liên kết này nhằm đánh giá sự phù hợp của tiêu chuẩn thiết kế áp dụng với kết cấu có tầng cứng chịu tải trọng động đất theo các tiêu chí về cường độ, độ dẻo và đặc biệt là cấu tạo chi tiết giữa cột biên với dầm cứng.

Phân tích phi tuyến kết cấu có tầng cứng

Trong thực hành, kết cấu thường được thiết kế chịu tải trọng động đất theo những phương nhất định, thường là hai phương vuông góc, tùy thuộc vào hướng bố trí cấu kiện chịu lực chính trên mặt bằng. Trừ trường hợp đặc biệt, nhà cao tầng thường có kết cấu đối xứng theo mặt bằng, cấu kiện được bố trí với tư duy chịu lực (ngang) theo hướng rõ rệt và bố trí sao cho giảm tối đa ảnh hưởng do xoắn. Với những kết cấu có mặt bằng đối xứng, việc phân tích nghiên cứu ứng xử tổng thể có thể được thực hiện thông qua mô hình đơn giản hóa - mô hình phẳng 2D. Trong trường hợp này, những đặc trưng ứng xử quan trọng của loại kết cấu áp dụng cho công trình đang xét (như đường truyền lực, phân bố biến dạng theo chiều cao, quá trình hình thành khớp dẻo và dạng cơ cấu...) hoàn toàn có thể được đánh giá thông qua mô hình đơn giản 2D. Để nắm rõ cơ chế làm việc của nhà cao tầng có tầng cứng, tác giả đã khảo sát mô hình nhà 55 tầng có 1 tầng cứng ở tầng 34. Kích thước kết cấu đã được thiết kế theo tiêu chuẩn ACI 318-05 với các thông số điều kiện tự nhiên phù hợp với tiêu chuẩn Việt Nam (QCVN 02:2009/BXD). Tính toán ảnh hưởng của vị trí và độ lớn của tầng cứng đối với công trình chịu tác động của động đất dựa theo các tiêu chí về chuyển vị đỉnh và chuyển vị lệch tầng [3] cho thấy, đối với nhà cao tầng có 1 tầng cứng thì tầng cứng ở khoảng giữa công trình cho các giá trị về chuyển vị đỉnh và chuyển vị lệch tầng nhỏ nhất. Khi xem xét tiêu chí về độ lớn của tầng cứng [3], kết quả nghiên cứu cho thấy, tầng cứng có độ cứng chống uốn

càng lớn thì ảnh hưởng của nó đối với chuyển vị đỉnh và chuyển vị lệch tầng càng lớn. Tuy nhiên, do điều kiện thực tế cùng với việc ảnh hưởng đối với cấu kiện xung quanh tầng cứng, đối với từng công trình cụ thể độ lớn và vị trí của tầng cứng cần được thiết kế sơ bộ để hài hòa các tiêu chí mỹ quan và kỹ thuật. Trong kết quả nghiên cứu đối với công trình cụ thể, độ lớn và vị trí của tầng cứng được lựa chọn theo hình 2.

Các thông số thiết kế cơ bản được trình bày dưới đây:

Cấu tạo khung (hình 2)

- Lưới nhịp kết cấu 13 m, 12 m và 13 m; vách giữa $t = 1200$ mm; cột biên 1500×2500 mm, 1500×1800 mm (khu vực tầng cứng) và 1200×1500 mm ở phía trên; dầm các tầng $b \times h = 2000 \times 500$ mm; dầm cứng 800×6500 mm.

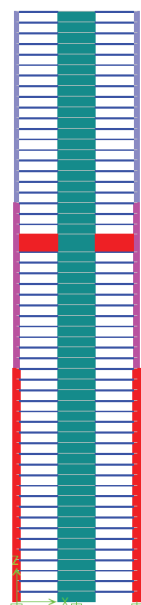
- Tiêu chuẩn thiết kế: ACI 318-05.

- Vật liệu: bê tông $f'c = 28$ MPa; cốt thép $f_y = 490$ MPa.

- Tải trọng: tính tải bao gồm trọng lượng kết cấu và tải trọng lớp hoàn thiện $1,1$ kN/m² ứng với bước khung 9 m; hoạt tải: 2 kN/m²; gió vùng IIB, chuyển sang gió 3 s, 50 năm theo ASCE 7-05 là $96,5$ mph.

- Động đất $agR = 0,103$ g chuyển sang hệ số S_s và S_1 theo ASCE 7-05, $S_s = 0,45$; $S_1 = 0,18$; loại đất nền D; hệ số tầm quan trọng $= 1,0$.

- Tổ hợp tải trọng: $1,4D$; $1,2D + 1,6L$; $1,2D + 1,0L + 1,6W$; $1,2D + 1,0L + 1,0E$.



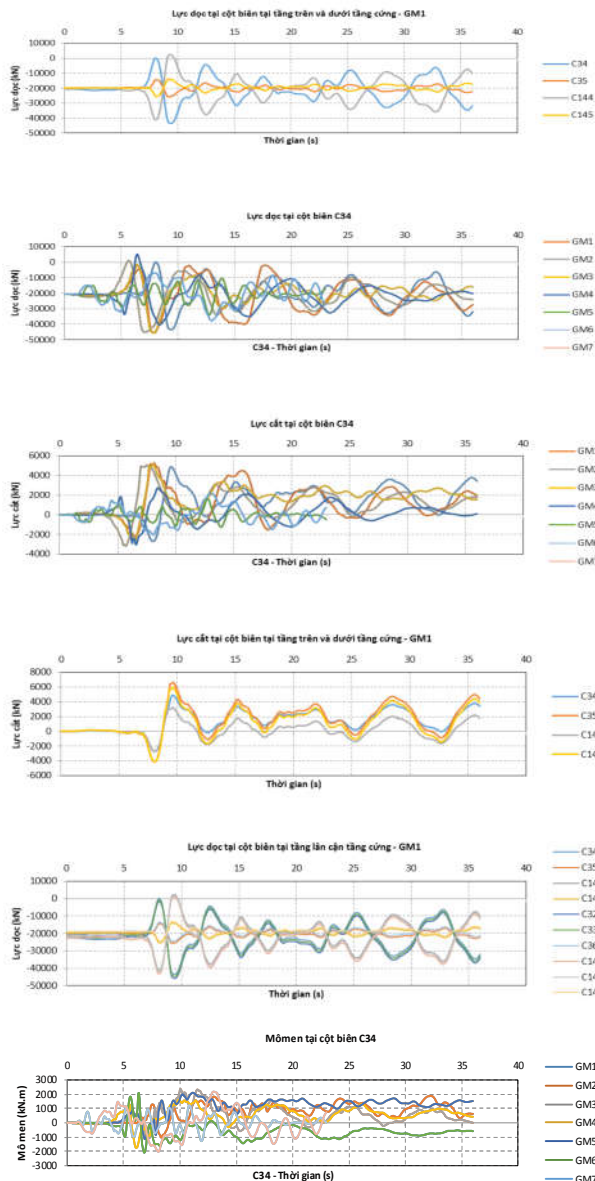
Hình 2: mô hình khảo sát

Trên cơ sở thiết kế sơ bộ, tác giả nghiên cứu sự làm việc của nút khung thông qua phân tích phi tuyến theo lịch sử thời gian dưới tác động của 7 sóng động đất (bảng 1) trong đó có 5 sóng được điều chỉnh từ sóng thực (được lấy từ cơ sở dữ liệu về động đất mạnh PEER - Trung tâm Nghiên cứu về động đất Thái Bình Dương) và 2 sóng nhân tạo (được tạo bởi phần mềm Shake91 [5], có xét đến các đặc trưng nền đất tại Hà Nội). Tất cả các giản đồ gia tốc này được điều chỉnh để phù hợp với phổ thiết kế theo tiêu chuẩn ASCE 7 [6, 7].

Bảng 1: giản đồ gia tốc dùng trong phân tích

TT	Tên (địa điểm)	Giản đồ gia tốc	Phổ phản ứng
1	GM1 Brawley Airport		
2	GM2 El Centro Array #10		
3	GM3 El Centro Array #4		
4	GM4 Holtville Post Office		
5	GM5 Duzce		
6	GM6 Sóng nhân tạo		
7	GM7 Sóng nhân tạo		

Kết quả phân tích bằng phần mềm RUAUMOKO [8, 9] cho thấy, nội lực của các cấu kiện thay đổi theo thời gian và thay đổi theo từng sóng động đất, mỗi sóng động đất tác động cho giá trị khác nhau về nội lực tại từng thời điểm. Đây được cho là sự khác nhau giữa phân tích tĩnh và động, đặc biệt là trong khoảng thời gian đầu khi tác động của động đất là lớn nhất. Hình 3 là kết quả phân tích nội lực (lực dọc, mô men, lực cắt) của cột xung quanh tầng cứng dưới tác động của 7 sóng động đất.



Hình 3: nội lực của cột xung quanh tầng cứng

Lực dọc của cột phía dưới tầng cứng thay đổi với biên độ lớn hơn nhiều so với cột phía trên tầng cứng. Điều này cho thấy ảnh hưởng của tầng cứng đối với lực dọc trong cột là rất lớn, đồng thời việc thay đổi lớn của lực dọc của các cột biên xung quanh tầng cứng trên hình 3 đối xứng nhau qua giá trị lực dọc tĩnh tạo nên hiệu ứng kéo dãn ngăn cản chuyển vị xoay của lõi, làm giảm chuyển vị đỉnh của công trình. Giá trị lực cắt tại các cột phía trên tầng cứng (hình 3) thường cho giá trị rất lớn (C35, C145) so với các cột khác, tăng đột biến so với các cột phía dưới tầng cứng, đồng thời lực cắt tại các cột gần tầng cứng lớn hơn nhiều so với các cột còn lại. Tương tự như vậy, đối với mômen (hình 3) của cột

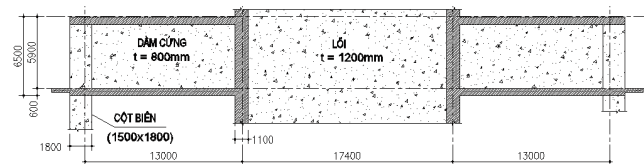
biên ở vị trí sát tầng cứng có sự thay đổi đột ngột so với tầng khác. Đây là sự khác nhau chính giữa hệ kết cấu thông thường so với kết cấu có tầng cứng. Phân tích riêng đối với sóng GM1 tại thời điểm 8 s và 10,2 s, giá trị mô men tại các cột C35 và C145 (cột ngay trên tầng cứng) có giá trị mô men rất lớn so với các cột còn lại (-20340 kN.m của cột C35 so với -288 của cột C34). Phân tích với các sóng khác cũng cho thấy sự gia tăng đột biến về nội lực đối với các cột ngay sát tầng cứng.

Với những kết quả phân tích trên cho thấy, cần có nghiên cứu sâu, thiết kế chi tiết, đặc biệt nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử của nút liên kết này nhằm đưa ra được những khuyến nghị đối với việc thực hành thiết kế các cấu kiện xung quang tầng cứng nói chung và nút liên kết tầng cứng cột biên nói riêng.

Thí nghiệm nút liên kết cột - dầm cứng

Thiết kế mẫu thí nghiệm

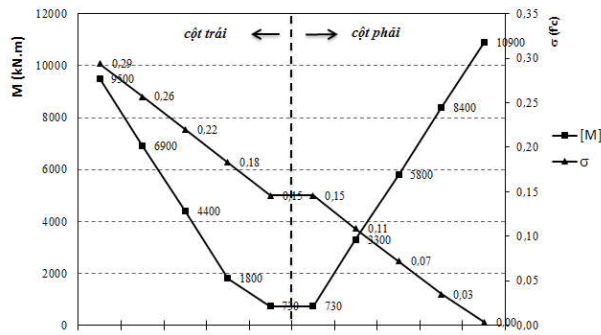
Đối tượng thí nghiệm là nút liên kết cột - dầm cứng được xây dựng dựa trên tham khảo mô hình kết cấu của công trình 55 tầng được điều chỉnh để phù hợp với năng lực Phòng thí nghiệm động đất của Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng. Hình 4 thể hiện kích thước hình học của kết cấu khung tại vị trí tầng cứng.



Hình 4: kích thước hình học của kết cấu khung tại vị trí tầng cứng

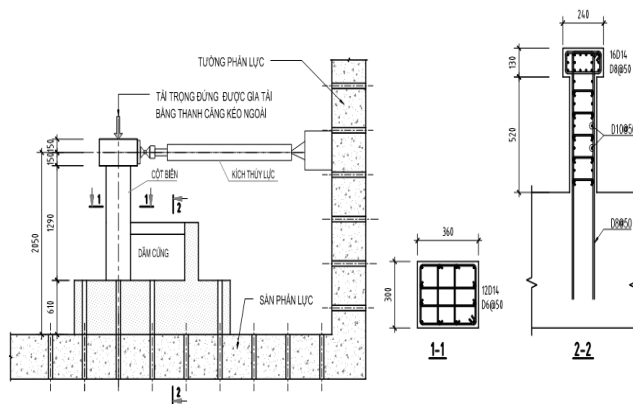
Công trình được thiết kế theo tiêu chuẩn Mỹ ACI 318 [10], dưới tác động của tải trọng động đất, kết cấu có dầm cứng làm việc thông qua cặp ngẫu lực, chuyển mômen lật thành lực dọc tác dụng lên cột biên. Phân tích lý thuyết cho thấy, dầm cứng và cột biên chịu lực đối chiều (hình 5). Ứng suất nén do lực dọc của cột trong trường hợp chỉ có tải trọng đứng khoảng $0,15f'_c$ (f'_c là cường độ chịu nén của mẫu trụ tròn). Với phân tích tĩnh phi tuyến, ứng với điểm tính năng (performance point), ứng suất trong cột ở một phía khoảng $0,25f'_c$, trong khi ứng suất của cột phía còn lại giảm về gần bằng không. Mômen trong 2 cột biên tương đương nhau, khi chịu động đất sẽ đổi chiều từ giá trị bé (khoảng 700 kN.m) tới giá trị lớn (khoảng 10.000

kN.m) và ngược lại. Giá trị ứng suất nén trong cột khoảng từ $0,05f'_c$ đến $0,2f'_c$ thường được áp dụng trong các thí nghiệm cột hoặc liên kết dầm - cột chịu tải trọng động đất ở các nước [11-13].



Hình 5: biến thiên mômen và ứng suất do lực dọc trong cột biên khi chịu động đất

Đối tượng thí nghiệm gồm hai mẫu C1 và C2 với tỷ lệ mô hình 1/5, sử dụng phương pháp gia tải ngang giống nhau, nhưng lực dọc duy trì khác nhau. Ứng suất nén do lực dọc gây ra ở mẫu C1 và C2 lần lượt là $0,1f'_c$ và $0,2f'_c$. Vật liệu mẫu thí nghiệm giống như của mô hình nguyên mẫu, sử dụng bê tông có cường độ $f'_c = 28 \text{ MPa}$ và cốt thép có cường độ chảy dẻo $f_y = 490 \text{ MPa}$. Sơ đồ và cấu tạo của mẫu thí nghiệm xem hình 6.



Hình 6: sơ đồ và cấu tạo của mẫu thí nghiệm

Hệ thống gia tải và quy trình gia tải ngang

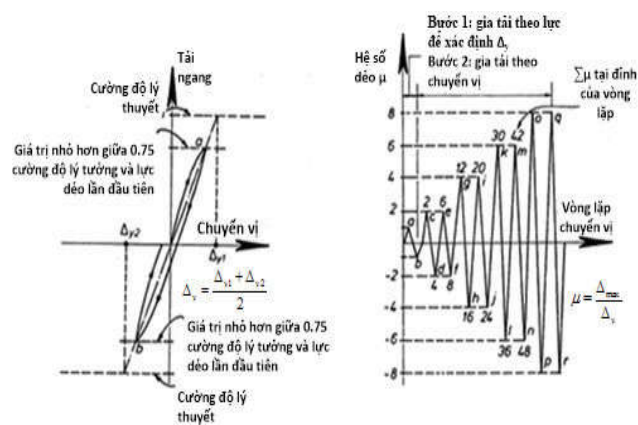
Hệ thống gia tải đứng: tải trọng đứng tác dụng lên cột được chất thông qua thanh bu lông neo kéo trước để tạo lực nén trong cột, lực nén trước trong mẫu C1 và C2 lần lượt là 300 kN và 600 kN.

Hệ thống gia tải ngang: tải trọng ngang tác dụng lên mẫu thí nghiệm thông qua kích thủy lực loại 250 kN (cho mẫu C1) và 500 kN (cho mẫu C2).

Quy trình gia tải ngang: quy trình gia tải mẫu thí nghiệm C1 và C2 được tiến hành theo quy trình đề xuất bởi Park [14] (hình 7), có thể tóm lược như sau:

- Mẫu C1 được duy trì lực dọc không đổi ở mức $0,1f'_c A_g$ (trong đó A_g là diện tích tiết diện nguyên của cột) trong suốt quá trình gia tải tạo chuyển vị ngang theo chu kỳ có độ lớn tăng dần. Quy trình gia tải ngang sẽ gồm 2 chu kỳ đàn hồi (kiểm soát bằng lực) ứng với 75% cường độ chảy. Các chu kỳ sau (kiểm soát bằng chuyển vị) ứng với 2, 4, 6, 8 lần chuyển vị chảy.

- Mẫu C2 có quy trình gia tải ngang tương tự như đối với mẫu thứ nhất, nhưng lực dọc được giữ ở mức tải bằng $0,2f'_c A_g$.



Hình 7: quy trình gia tải của Park

Hệ thống điều khiển và thu nhận số liệu

Toàn bộ quá trình gia tải và ghi số liệu được thực hiện từ phòng điều khiển thông qua máy tính. Số liệu từ các phiên đo biến dạng cốt thép (16 phiên đo biến dạng cốt thép dọc và 8 phiên đo biến dạng cốt đai) và đầu đo LVTD (Linear variable displacement transducer) được thu nhận bởi bộ thu tín hiệu (data logger) 50 kênh. Ngoài ra trong quá trình thí nghiệm, đặc biệt là đối với các bước gia tải quan trọng, sự hình thành vết nứt của mẫu thí nghiệm đều được chụp ảnh và đo vẽ khi dừng tải.

Kết quả thí nghiệm

Ứng xử tổng thể của liên kết cột - dầm cứng

Mặc dù các vết nứt mở xuất hiện từ sớm, nhưng mẫu thí nghiệm có ứng xử đàn hồi cho tới mức chuyển vị ứng với độ lệch tầng khoảng 0,7%. Độ cứng ban đầu

của mẫu C2 lớn hơn mẫu C1, do ảnh hưởng của lực dọc làm tăng cường độ của cột. Các vết nứt xuất hiện nhiều và độ cứng bắt đầu giảm từ mức độ lệch tầng 1%, cho tới 1,5% thì các vết nứt mở rộng và nhiều vết phân bố rộng trên bề mặt nút liên kết (hình 8).



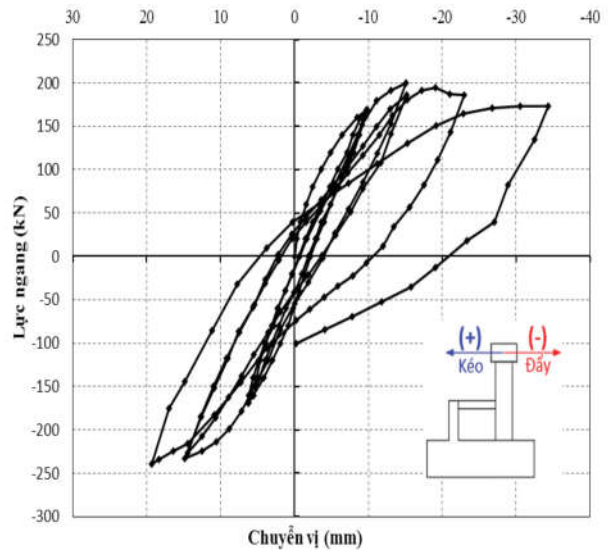
(a) mẫu C1
(b) mẫu C2
Hình 8: hình ảnh hình thành vết nứt của mẫu thí nghiệm

Thép dọc bắt đầu xuất hiện chảy dẻo ở mức độ lệch tầng 1,5%, các vết nứt kéo sâu vào phía trong phạm vi phần dầm cứng, kết cấu làm việc ổn định cho tới chuyển vị ở mức độ lệch tầng 2% thì bê tông bắt đầu vỡ. Tại mức chuyển vị 2,5-2,7%, bê tông chân cột bị nén vỡ hoàn toàn và bong tách để lộ cốt thép. Tuy nhiên, cho tới thời điểm này đường cong trễ vẫn ổn định, mặc dù độ cứng và cường độ có sự suy giảm.

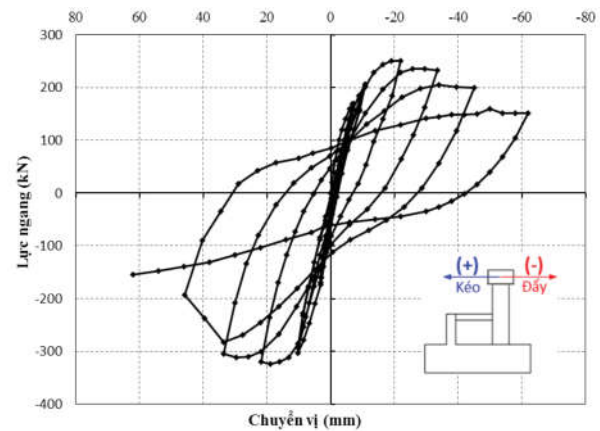
Tại mức chuyển vị lớn nhất 4,4% (mẫu C1) và 5,4% (mẫu C2), sự phá hoại bê tông chân cột phát triển lên phía trên cột và sâu bên dưới liên kết dầm cứng, đặc biệt là với mẫu C2. Tại thời điểm dừng thí nghiệm, các vết nứt chéo hình thành rõ rệt, do ảnh hưởng của ứng suất cắt.

Ứng xử trễ, sự suy giảm cường độ và độ cứng

Đường cong trễ của mẫu thí nghiệm liên kết cột - dầm cứng thể hiện đặc trưng hấp thụ phân tán năng lượng tốt và ổn định (hình 9, 10). Riêng đối với mẫu thí nghiệm C1, phần bên trái đường cong (ứng với trạng thái gia tải kéo vào phía trong dầm cứng) thể hiện sự khác biệt trong ứng xử. Hiện tượng này xảy ra do ảnh hưởng của năng lực kích yếu đối với chiều gia tải kéo mẫu, dẫn đến không xem xét được hoàn toàn khả năng biến dạng của chiều kéo mẫu. Hiện tượng này không xảy ra ở mẫu C2 khi kích 500 kN được thay cho kích 250 kN.



Hình 9: đường cong ứng xử trễ của mẫu thí nghiệm C1



Hình 10: đường cong ứng xử trễ của mẫu thí nghiệm C2

Ảnh hưởng của lực dọc đối với cường độ của liên kết được thể hiện rõ qua kết quả thí nghiệm. Cường độ lớn nhất của mẫu C2 và C1 đạt 315 kN và 247 kN, ứng với lực nén duy trì $0,1f_c'$ (300 kN) và $0,2f_c'$ (600 kN) trong các mẫu. Hiện tượng này phù hợp với tính toán lý thuyết theo tiêu chuẩn. Bên cạnh đó, do đặc điểm cấu tạo không đối xứng của liên kết cột - dầm cứng, từ đường cong thí nghiệm có thể thấy cường độ của liên kết theo chiều đẩy thấp hơn cường độ ứng với chiều kéo, 200 kN so với 247 kN của mẫu C1 và 250 kN so với 315 kN của mẫu C2. Ảnh hưởng ngăn cản của dầm cứng đối với biến dạng của khu vực chân cột đã gây ra hiện tượng trên. Bên cạnh đó, kết quả thí nghiệm cũng cho thấy ảnh hưởng bất lợi của lực nén lớn.

Liên kết ứng xử cơ bản là đàn hồi khi chuyển vị tương đương với độ lệch tăng ở mức $\pm 0,25\%$. Khi độ lệch tăng tăng lên, sự giảm độ cứng được biểu hiện ở các chu kỳ hồi tải. Sự suy giảm mạnh về cường độ và độ cứng xảy ra ở các chu kỳ ứng với độ lệch tăng ở mức $\pm 1,5\%$ trở lên. Với mẫu C1, cường độ giảm 13% giữa giá trị lớn nhất đạt được ứng với độ lệch tăng 1,9% và giá trị cường độ tại mức độ lệch tăng 4,3%. Đối với mẫu C2, mức độ suy giảm cường độ lớn hơn 40%, khi so sánh giá trị cường độ ứng với mức độ lệch tăng 2,6% và 7,7%. Mặc dù vậy, khi cường độ suy giảm quá 20% [14] thì kết cấu đã được xem là phá hoại, trong trường hợp này là ứng với độ lệch tăng 5,7%. Xu hướng suy giảm cường độ nhanh hơn ở mẫu C2 so với mẫu C1 là do ảnh hưởng của lực dọc (mẫu C2 chịu nén ở mức $0,2f'_c$ so với $0,1f'_c$ của mẫu C1).

Vùng nén lớn hơn trong mặt cắt tiết diện cột, đồng thời yêu cầu biến dạng bê tông lớn hơn ở cùng mức tải. Do vậy, bê tông đạt biến dạng cực hạn sớm hơn kéo theo sự suy giảm cường độ.

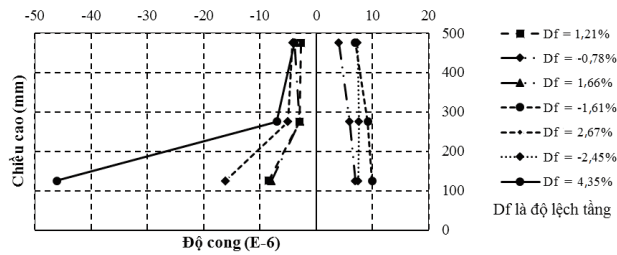
Độ dẻo

Độ dẻo của cấu kiện được xác định bằng tỷ số giữa chuyển vị lớn nhất tại thời điểm phá hoại và chuyển vị ứng với lúc cốt thép đạt giới hạn chảy. Theo kết quả thí nghiệm, độ dẻo của liên kết cột - dầm cứng trong khoảng từ 2,5-2,9. Trong đó chuyển vị lớn nhất và chuyển vị chảy bằng 35 mm và 12 mm, 42 mm và 17 mm, tương ứng với mẫu C1 và C2, cho thấy ảnh hưởng của lực dọc tới độ dẻo của liên kết. Liên kết sẽ có độ dẻo cao hơn khi ứng suất nén thấp, và ngược lại độ dẻo sẽ giảm khi cột chịu lực nén lớn hơn.

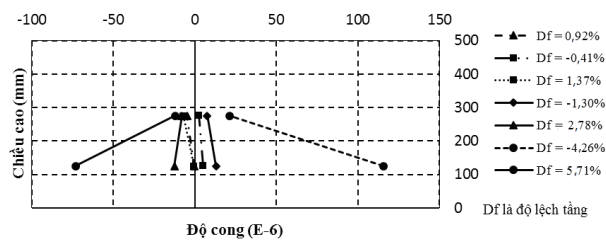
Đánh giá kết cấu dựa trên tính năng

Biểu đồ biến thiên độ cong của mẫu cột C1 và C2 được thể hiện trên hình 11 và hình 12. Với mẫu C2, do không bố trí được đầu đo cho phần trên của cột, nên biểu đồ độ cong chỉ thể hiện được phần chân cột. Có thể nhận thấy sự không đối xứng của phân bố độ cong phía đẩy và kéo của mẫu do tính không đối xứng của liên kết. Nhìn chung, độ cong ở phía kéo lớn hơn phía đẩy. Với mẫu C2 có điểm dị biệt tại chiều đẩy độ cong tăng đột biến ứng với mức độ lệch tăng 4,26%, có thể do ảnh hưởng của việc bê tông bị nén vỡ mạnh tại mức

chuyển vị này. Chiều cao đoạn hình thành khớp dẻo của cột khoảng 200 mm dưới chân cột, bằng $0,25H$, trong đó H là chiều cao của cột.

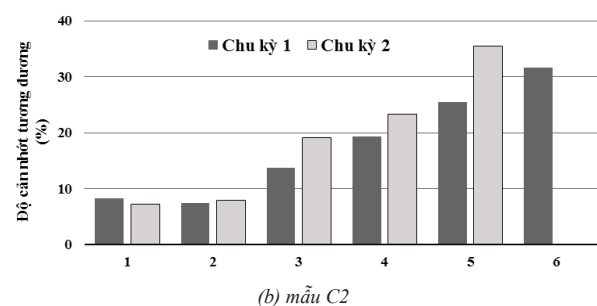
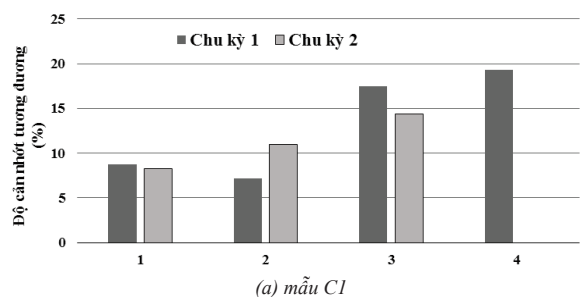


Hình 11: biểu đồ biến thiên độ cong theo chiều cao mẫu thí nghiệm C1



Hình 12: biểu đồ biến thiên độ cong theo chiều cao mẫu thí nghiệm C2

Đặc tính phân tán năng lượng của mẫu liên kết có thể được đánh giá thông qua độ cản nhót tương đương của mỗi chu kỳ gia tải. Các chu kỳ sau có mức tiêu tán năng lượng cao hơn. So sánh độ cản nhót của chu kỳ đầu của 4 vòng gia tải đầu tiên cho thấy, ảnh hưởng của lực dọc tới khả năng tiêu tán năng lượng của liên kết là không đáng kể.



Hình 13: độ cản nhót tương đương mẫu thí nghiệm

Kết luận và kiến nghị

Bài báo đã trình bày các nội dung liên quan đến phân tích tính toán và thí nghiệm liên kết nút cột - dầm cứng của hai mẫu thí nghiệm được thực hiện tại Phòng thí nghiệm động đất Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng. Qua đó, có thể rút ra một số nhận xét và kiến nghị sau:

- Thiết kế liên kết cột - dầm cứng tuân thủ tiêu chuẩn đã cho thấy sự đáp ứng tốt của liên kết về mặt hấp thụ, tiêu tán năng lượng. Bê tông chỉ bắt đầu bị vỡ tách lớp bảo vệ khi chuyển vị ở mức tương đương với độ lệch tầng từ 2% trở lên.

- Dạng phá hoại của liên kết là do uốn kết hợp cắt. Khi nút dầm cứng - cột biên bị phá hoại, bê tông phần đầu dầm cứng (mặt ngoài) và của cột (góc phía trong) bị nén vỡ. Khi thiết kế cần bố trí cốt đai đảm bảo ổn định của thép dọc, tránh suy giảm cường độ của liên kết. Đặc biệt là cốt đai đầu cột ở vùng đi vào dầm cứng.

- Mẫu thí nghiệm có tỷ số nhíp chịu cắt bằng 2,2, ảnh hưởng của biến dạng cắt là đáng kể và dạng phá hoại có sự tham gia rõ rệt của các vết nứt chéo. Việc thiết kế cốt thép chịu cắt của cột tại vị trí tầng cứng là rất quan trọng và càng cần phải lưu ý đối với các kết cấu cột - dầm cứng có tỷ số nhíp chịu cắt thấp hơn.

- Trong thí nghiệm này, độ dẻo của cột (liên kết cột - dầm cứng) khoảng 2,5, trong khi đó phân tích lý thuyết tổng thể công trình có hệ số ứng xử tổng thể là 3,17. Kiến nghị điều chỉnh hệ số ứng xử phù hợp khi thiết kế cột và dầm cứng, và thiết kế sao cho kết cấu khu vực này dư khả năng chịu cắt và đáp ứng độ dẻo kỳ vọng.

- Không nên thiết kế cột ngay sát tầng cứng có nội lực do lực dọc gây ra lớn nhằm tránh suy giảm sớm khả năng làm việc của nút liên kết dầm cứng - cột biên khi chịu động đất mạnh.

Tài liệu tham khảo

- [1] Outrigger Design for High-Rise Buildings (2012), Council on Tall Buildings and Urban Habitat.
- [2] TCVN 9386-1:2012: Thiết kế công trình chịu động đất, Phần 1: Quy định chung, tác động động đất và quy định đối với kết cấu nhà, Nhà xuất bản Xây dựng.
- [3] Nguyễn Hồng Hải (2015), *Nghiên cứu sự làm việc của nhà cao tầng bê tông cốt thép có tầng cứng chịu tác động của động đất ở Việt Nam*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật.
- [4] Herath Nilupa (2011), *Behaviour of outrigger braced tall buildings subjected to earthquake loads*, PhD thesis, Dept. of Infrastructure Engineering, The University of Melbourne.
- [5] I.M. Idriss, J.I. Sun (1992), *User Manual for SHAKE91*, Center for Geotechnical Modelling, Dept. of Civil & Environ. Eng., University of California, Davis, California.
- [6] ASCE 7-05: Minimum Design Load for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers.
- [7] ASCE 7-10: Minimum Design Load for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers.
- [8] J. Athol Carr (2007), *Ruaumoko - Volume 1: Theory*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [9] Athol J. Carr (2007), *Ruaumoko - Volume 2: User Manual for the 2-Dimensional Version*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [10] ACI 318: Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI Committee 318.
- [11] Bing Li, Tso - Chien Pan, Cao Thanh Ngoc Tran (2009), "Effects of Axial Compression Load and Eccentricity on Seismic Behavior of Nonseismically Detailed Interior Beam-Wide Column Joints", *ASCE*.
- [12] N. Laura Lowes, E. Dawn Lehman, C. Anna Birely, A. Daniel Kuchma, R. Christopher Hart, P. Kenneth Marley (2012), "Behavior, Analysis, and Design of Complex Wall Systems", *NEESR*.
- [13] H. Rodrigues, H. Varum, A. Arêde (2012), "A comparative analysis of energy dissipation and equivalent viscous damping of RC columns subjected to uniaxial and biaxial loading", *Engineering Structures*, **35**, pp.149-164, Elsevier.
- [14] R. Park (1988), "Ductility evaluation from laboratory and analytical testing", *Proceedings of the 9th world conference on earthquake engineering*, vol.3.