

Khảo sát ảnh hưởng độ mềm của nút khung và hiệu ứng P-delta đến ứng xử của kết cấu

Nguyễn Thị Bích Thủy^{1*}

¹ Khoa Kỹ thuật Xây dựng-Trường Đại học Bách khoa Tp. HCM-Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

TỪ KHOẢ

Độ mềm nút khung
Hiệu ứng P-delta
Ứng xử của kết cấu
Chuyển vị
Nội lực
Mô-men – góc xoay

TÓM TẮT

Độ mềm của nút khung có ảnh hưởng tương đối lớn đến sự làm việc của khung, đến độ cứng chung của toàn bộ kết cấu, cũng như đến sự phân bố lại nội lực trong các cấu kiện hội tụ tại nút, sự biến dạng của các phần tử kết cấu xung quanh nút. Tác giả bài báo đã tiến hành khảo sát sự làm việc của khung, có xét ảnh hưởng của độ mềm nút khung, theo các hệ quả, cụ thể là: sự thay đổi chu kỳ dao động của khung, sự thay đổi chuyển vị đỉnh khung, sự phân bố lại nội lực của các cấu kiện trong khung. Ngoài ra, tác giả còn khảo sát ảnh hưởng của hiệu ứng P – delta đến sự làm việc của khung với nhiều trường hợp độ cứng khác nhau của nút khung. Từ đó, cho thấy sự cần thiết của việc xét đến độ mềm nút khung và hiệu ứng P-delta trong công tác thiết kế kết cấu khung.

KEYWORDS

Flexible frame Node
P-delta effect
Structural Behavior
Displacement
Internal force
Moment – rotation

ABSTRACT

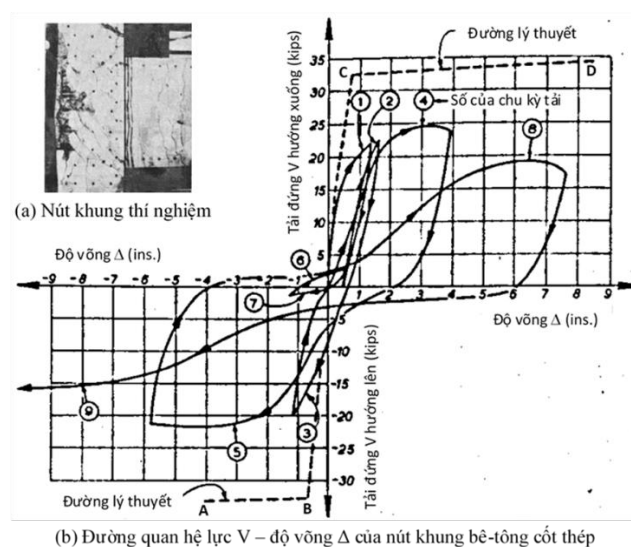
The flexibility of the frame nodes affect relatively large the behavior of the frame, the overall stiffness of the entire structure, as well as the redistribution of internal forces in the converging components at the node, the deformation of the structural elements around the node. The author of the article conduct the considerations of the operation of the frame, taking into account the influence of the flexibility of the frame nodes, according to the consequences, specifically: changes in the oscillation period of the frame, changes in the displacement of the top of the frame, and redistribution of internal forces of the elements in the frame. In addition, the author also consider the influence of the P-delta effect on the operation of the frame with many cases of stiffness of the frame node. From there, it shows the necessity of considering the flexibility of the frame node and the P-delta effect in the design of frame structures.

1. Đặt vấn đề

Độ mềm của liên kết nút khung, kể cả bê tông cốt thép và thép, ảnh hưởng tới sự làm việc của toàn bộ kết cấu công trình, vẫn luôn là một vấn đề mà các kỹ sư xây dựng quan tâm, nhất là khi kết cấu chịu tải trọng lặp [1, 2]. Chẳng hạn, khi xem xét biểu đồ quan hệ giữa lực tác dụng và độ võng như trên Hình 1 [3]: thí nghiệm nút khung bê-tông cốt thép có dầm công-xôn chịu tải trọng V và có chuyển vị là Δ , và quan hệ lực – chuyển vị là phi tuyến, Hình 1(a). Mặt khác, khi chịu tải trọng lặp thì độ cứng của nút càng ngày càng suy thoái, biến dạng dẻo ngày càng phát triển, điều này thể hiện qua biểu đồ quan hệ lực – chuyển vị thể hiện ở Hình 1(b): đường ABCD là ứng xử theo lý thuyết và đường 1-9 là ứng xử trong thí nghiệm của nút khung khi chịu tải trọng lặp.

Nhiều nhà nghiên cứu khác đã khảo sát tính mềm của nút khung dựa vào quan hệ mô men uốn – góc xoay và đã đưa ra các mô hình lý thuyết khác nhau để mô phỏng quan hệ giữa mô men uốn – góc xoay của nút khung như trên Hình 2 [4-6]. Trong Hình 2(a), quan hệ giữa mô men – góc xoay được mô tả như một quan hệ đàn hồi tuyến tính, thông qua một giá trị độ cứng không đổi. Mô hình này được đưa vào trong phần mềm SAP2000, version 25. Ngoài ra còn một số các mô hình

khác, trong đó người ta thay thế đường cong bằng các đoạn thẳng, như trên các Hình 2(b), 2(c), 2(d) [6].



Hình 1. Đường quan hệ giữa lực tác dụng và biến dạng trong thí nghiệm nút khung [3].

Chẳng hạn, Batho và Lash [6] đã đưa ra mô hình hai tham số như sau:

$$\theta_{rot} = a \cdot M^b \quad (1)$$

trong đó:

θ_{rot} là góc xoay của liên kết; M là mô men uốn tác dụng lên liên kết; a và b là các tham số của đường cong biểu diễn quan hệ giữa θ_{rot} và M. Độ cứng (tiếp tuyến) của liên kết được xác định theo công thức:

$$k_{rot} = \frac{dM}{d\theta_{rot}} = \frac{1}{a \cdot b \cdot M^{b-1}} \quad (2)$$

với điều kiện $a > 0, b > 1$.

Goldberg, Richard (1963) cũng đã đề xuất một mô hình ba tham số, trong đó các góc xoay của liên kết θ_{rot} và độ cứng k_{rot} phụ thuộc vào giá trị độ cứng ban đầu K_i , mô men giới hạn M_u và hệ số phụ thuộc hình dạng của liên kết n [6]:

$$\theta_{rot} = \frac{|M|}{K_i} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{M}{M_u}\right)^n} \quad (3)$$

$$k_{rot} = \frac{dM}{d\theta_{rot}} = \frac{K_i \left[1 - \left(\frac{M}{M_u}\right)^n\right]^2}{1 + (n-1) \cdot \left(\frac{M}{M_u}\right)^n} \quad (4)$$

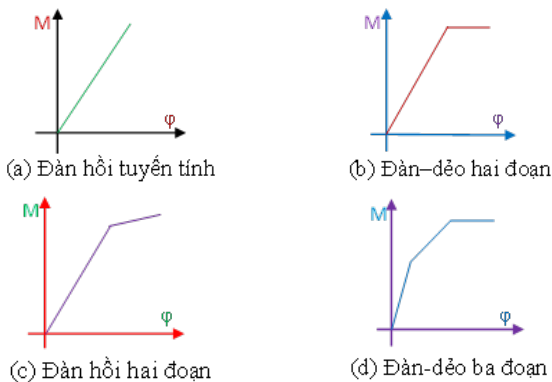
Các tác giả Kishi và Chen (1987) cũng đề xuất mô hình ba tham số tương đối giống của Goldberg, Richard, khác nhau ở số mũ của biểu thức dưới mẫu [6]:

$$\theta_{rot} = \frac{M}{K_i \cdot \left[1 - \left(\frac{M}{M_u}\right)^{1/n}\right]} \quad (5)$$

với độ cứng tiếp tuyến của liên kết được xác định theo công thức được đề xuất năm 1993

$$k_{rot} = \frac{dM}{d\theta_{rot}} = K_i \cdot \left[1 - \left(\frac{M}{M_u}\right)^n\right] \quad (6)$$

Ngoài ra, còn có tác giả đề xuất các mô hình hàm mũ. Trong bài báo này, tác giả sẽ sử dụng mô hình đàn hồi tuyến tính được cài đặt sẵn trong SAP2000 để khảo sát ảnh hưởng của độ mềm của nút tới sự làm việc của kết cấu khung.



Hình 2. Một số mô hình biểu diễn quan hệ Mô men – góc xoay trong nút khung [6].

Bên cạnh ảnh hưởng của độ mềm nút khung, tác giả còn xem xét ảnh hưởng của hiệu ứng P-delta, là một hiệu ứng phi tuyến tính trong kết cấu, xảy ra do sự thay đổi hình học của cấu trúc dưới tác động của tải trọng dọc (P) kết hợp với độ lệch ngang (Δ). Lúc này trong kết cấu

phát sinh thêm mô men uốn phụ bằng $P \times \Delta$, làm tăng nội lực trong kết cấu, khiến nó dễ bị mất ổn định hơn so với trường hợp bỏ qua hiệu ứng này.

2. Các quan niệm về độ mềm của nút khung

2.1. Quan niệm vùng cứng tại nút khung (Rigid End Offset)

Theo quan niệm này, vùng giao nhau giữa dầm và cột, như trên Hình vẽ 3(a), là cứng tuyệt đối, dầm sẽ được liên kết vào cột ở mặt ngoài tiết diện cột, xem như có một vùng cứng được tạo ra tại nút. Theo quan niệm này, biến dạng của dầm chỉ xảy ra trong khoảng nhịp thông thủy giữa hai mặt cột, trong vùng cứng không xảy ra biến dạng. Tương tự, đối với cột cũng chỉ xảy ra biến dạng từ mặt trên dầm tầng dưới đến mặt dưới dầm tầng trên mà thôi. Góc giữa dầm và cột được bảo toàn trong quá trình biến dạng của cột và dầm. Điều này thực tế làm cho chiều dài của các cấu kiện như dầm và cột trong tính toán được thu ngắn lại, chứ không phải tính đến tìm trục định vị. Quan niệm này có thể không an toàn, vì thực tế nút có độ cứng hữu hạn, chứ không thể vô hạn như giả thiết [7, 8].

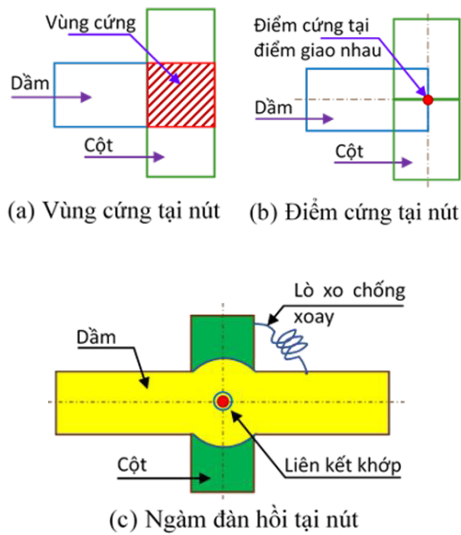
2.2. Quan niệm điểm cứng tại nút khung (Center Line to Center Line)

Ở đây, quan niệm là các cấu kiện quy tụ tại nút sẽ kéo dài tới tận giao điểm của các trục cấu kiện, tức là dầm không chỉ dừng ở mặt ngoài của cột mà được coi như kéo dài tới tận tim của cột, như trên Hình 3(b), hay nói cách khác, đoạn cấu kiện dầm từ mặt ngoài cột đến tim cột có cùng các đặc trưng và tải trọng của dầm. Cũng quan niệm tương tự như vậy đối với cột. Như vậy, các cấu kiện quy tụ tại nút được coi như giao nhau chỉ tại một điểm nút. Điều này thiên về an toàn, bởi vì ảnh hưởng của kích thước vùng giao nhau tại nút không được xét tới, làm giảm độ cứng thực tế của nút [7, 8].

2.3. Quan niệm liên kết đàn hồi tại nút khung (Panel Zone Spring)

Trong thực tế, độ cứng của nút khung có thể ứng xử không hoàn toàn là một vùng cứng hay là một điểm cứng, lúc này, độ mềm của nút có thể mô phỏng hoặc khai báo trong chương trình tính toán tùy theo kinh nghiệm và trách nhiệm của từng người thiết kế. Ví dụ như đối với trường hợp kết cấu bê tông cốt thép, người ta nhận thấy độ mềm của nút khung không hẳn là vùng cứng hay điểm cứng, mà nằm giữa quan niệm vùng cứng và điểm cứng thì khá phù hợp.

Ngoài ra, có thêm quan niệm khác nữa về liên kết đàn hồi tại nút khung: quan niệm cột và dầm có thể quay tự do với nhau qua một liên kết khớp tại điểm giao giữa các trục của các cấu kiện và một lò xo chống xoay, như trên Hình 3(c). Độ cứng của lò xo này thường có giá trị tham chiếu đến độ cứng của các cấu kiện quy tụ, ví dụ nếu tại nút khung mà cấu kiện cột có độ cứng hơn dầm (vì trong nút khung, cột thường có tiết diện lớn hơn dầm, để bảo đảm nguyên tắc cột khỏe dầm yếu) thì độ cứng của lò xo chống xoay sẽ tham chiếu theo độ cứng của cấu kiện cột [9, 10].



Hình 3. Các mô hình biểu diễn các quan niệm độ mềm của nút khung.

3. Bài toán khảo sát ứng xử của khung – phân tích kết quả

3.1. Khảo sát khung bê-tông cốt thép

Tác giả tiến hành khảo sát sự làm việc của một kết cấu khung phẳng 10 tầng 2 nhịp, chiều cao mỗi tầng 3.5 m, chiều dài mỗi nhịp 8m, Hình 4. Tiết diện cột khung sẽ được lấy như sau: 3 tầng dưới cùng là 70x100 cm, tầng 4, 5 và 6 là 60x80 cm, 4 tầng trên còn lại có tiết diện 50x60 cm. Tiết diện tất cả các dầm lấy là 40x60 cm. Giả sử khung chịu tải trọng thường xuyên theo phương đứng trên dầm là 60 kN/m; tải trọng tạm thời 30 kN/m; tải trọng gió lên mỗi khung là 8 kN/m phía đón gió và 5 kN/m phía hút gió; và tải trọng động đất, sử dụng bản ghi gia tốc động đất tại Corralit.

Tác giả sử dụng phần mềm SAP2000 Ultimate 64 bit version 25 để mô phỏng sự làm việc của khung có kể đến ảnh hưởng đặc tính mềm

nút khung, cũng như ảnh hưởng của hiệu ứng P-Delta, bằng các tiện ích khác nhau, tương ứng với các quan niệm khác nhau về độ mềm của nút khung được trình bày ở trên. Để mô tả độ mềm của nút khung, vị trí tính toán của đầu dầm đối với cột sẽ được khai báo theo các trường hợp: ở mặt ngoài của tiết diện cột, ở tim cột, hay ở vị trí nào đó giữa hai vị trí trên thông qua một hệ số vùng cứng (Rigid Zone Factor, viết tắt là RZF), nếu đặt $RZF = 1$, nút sẽ làm việc như một vùng cứng như đã nêu ở mục 2.1., nếu đặt $RZF = 0$, nút sẽ làm việc như một điểm cứng như đã nêu ở mục 2.2., nếu đặt $RZF = 0.5$, nút sẽ làm việc như một liên kết đàn hồi như đã nêu ở mục 2.3. Để kể đến hiệu ứng P-delta, sử dụng dạng bài toán tĩnh, song được phân tích dưới dạng phi tuyến, với tham số phi tuyến hình học P-delta [11-13].



Hình 4. Mô hình khung khảo sát.

Ứng xử của các khung, có cùng kích thước và chịu tải trọng đã mô tả bên trên, theo các quan niệm khác nhau về độ mềm của nút khung (vùng cứng, điểm cứng, liên kết đàn hồi) và xét đến hiệu ứng P-delta sẽ được mô phỏng lần lượt qua sáu sơ đồ khung và được mô tả trong (Bảng 1).

Bảng 1. Các sơ đồ khung và các đặc tính mềm của nút khung.

Sơ đồ khảo sát	RZF, P-delta	Mô tả đặc tính mềm nút khung và hiệu ứng P-delta
1	$RZF = 1,0$	Nút là một vùng cứng, không xét hiệu ứng P-delta
2	$RZF = 0,5$	Nút là vùng bán cứng, không xét hiệu ứng P-delta
3	$RZF = 0,0$	Nút là một điểm cứng, không xét hiệu ứng P-delta
4	$RZF = 1,0$ & P-delta	Nút là một vùng cứng, có xét hiệu ứng P-delta
5	$RZF = 0,5$ & P-delta	Nút là vùng bán cứng, có xét hiệu ứng P-delta
6	$RZF = 0,0$ & P-delta	Nút là một điểm cứng, có xét hiệu ứng P-delta

Mỗi sơ đồ khảo sát sẽ chịu tổ hợp tải gồm các tải đứng và tải ngang (tải gió hoặc tải động đất) đồng thời, các đại lượng sẽ được khảo sát trong mỗi sơ đồ bao gồm:

- Chu kỳ dao động của công trình.
- Chuyển vị tại đỉnh công trình.
- Nội lực (chủ yếu là mô men uốn) ở các cột tại chân công trình.
- Gia tốc đỉnh của công trình.

- Lực cắt đáy công trình khi chịu động đất.

3.2. Các kết quả khảo sát ứng xử của khung và các nhận xét

Trong phần so sánh các kết quả ứng xử, các kết quả tính toán của sơ đồ 1 sẽ được lấy làm chuẩn để so sánh cho các sơ đồ khung còn lại.

3.2.1. Chu kỳ dao động của công trình của các sơ đồ khung (xét mode 1)

Chu kỳ dao động của sáu sơ đồ khung và so sánh sự chênh lệch theo phần trăm (%) về chu kỳ dao động, về độ cứng ngang của các khung với sơ đồ 1, cho trong (Bảng 2). Qua số liệu trong bảng, có thể nhận thấy độ mềm của nút khung có ảnh hưởng đáng kể đến chu kỳ dao động của công trình, chẳng hạn, so sánh giữa sơ đồ 3 ($RZF = 0.0$) với sơ đồ 1 ($RZF = 1.0$), chu kỳ của công trình tăng khoảng 7 %, có nghĩa là độ cứng của công trình đã giảm khoảng 13 %. Khi kể thêm ảnh hưởng của hiệu ứng P-delta, độ cứng của công trình còn giảm nhiều hơn nữa, cụ thể là chênh lệch giữa sơ đồ 4 và sơ đồ 1: chu kỳ dao động tăng gần 8% và độ cứng ngang của công trình giảm khoảng 14 %; hoặc so sánh hai trường hợp cực đoan nhất (sơ đồ 6 và sơ đồ 1): chu kỳ dao động ở sơ đồ 6 tăng hơn 18 %, điều này cho thấy độ cứng theo phương ngang của khung đã giảm khoảng 29 %.

3.2.2. Chuyển vị đỉnh công trình (tổ hợp tải có tải trọng gió)

Chuyển vị đỉnh công trình của sáu sơ đồ khung trong trường hợp này thể hiện ở Hình 5 và so sánh sự chênh lệch theo phần trăm (%) của các khung với sơ đồ 1 cho trong (Bảng 3). Có thể nhận thấy ảnh hưởng rõ rệt của độ mềm nút khung tới chuyển vị của đỉnh khung khi chịu tải trọng gió, độ chênh lệch về chuyển vị đỉnh khung tăng gần 27 % (giữa sơ đồ 3 và sơ đồ 1). Trong trường hợp kể đến ảnh hưởng của hiệu ứng P-delta, chuyển vị đỉnh giữa sơ đồ 4 và sơ đồ 1 cũng tăng khoảng 5 %; hay sự chênh lệch có thể lên tới 41% giữa sơ đồ 6 và sơ đồ 1. Điều này có thể là một minh chứng cho nhận định ở trên về sự thay đổi độ cứng theo phương ngang của khung.

3.2.3. Mô men uốn trong khung (tổ hợp tải có tải trọng gió)

Biểu đồ mô men uốn của sáu sơ đồ khung trong trường hợp này thể hiện ở Hình 6 và so sánh sự chênh lệch mô men uốn lớn nhất tại các chân cột ở tầng dưới cùng, theo phần trăm (%) của các khung với sơ đồ 1 cho trong (Bảng 4).

Khi chỉ kể đến ảnh hưởng độ mềm của nút, có thể thấy giá trị mô men uốn lớn nhất trong ba cột dưới của khung tăng hơn 10 % giữa sơ đồ 3 và sơ đồ 1. Nếu xét thêm ảnh hưởng của hiệu ứng P-delta, mô men giữa sơ đồ 4 và sơ đồ 1 cũng tăng hơn 5 %. Với trường hợp bất lợi nhất

(giữa sơ đồ 6 và sơ đồ 1), có thể nhận thấy giá trị mô men uốn lớn nhất do gió trong khung tăng lên gần 16 %, một lượng chênh lệch không thể bỏ qua khi tính toán công trình.

3.2.4. Chuyển vị đỉnh công trình (tổ hợp tải có tải trọng động đất)

Chuyển vị đỉnh công trình của sáu sơ đồ khung trong trường hợp này thể hiện ở Hình 7 và so sánh sự chênh lệch theo phần trăm (%) của các khung với sơ đồ 1 cho trong (Bảng 5).

Trong trường hợp chỉ xét tới độ mềm của nút khung, chuyển vị đỉnh công trình thay đổi giá trị chuyển vị lên tới 24-25 % giữa sơ đồ 3 và sơ đồ 1. Lượng thay đổi chuyển vị đỉnh công trình khi chịu động đất lên tới khoảng 30 % (so sánh sơ đồ 6 với sơ đồ 1), một lượng thay đổi tương đối lớn khi ảnh hưởng của hiệu ứng P-delta được xem xét thêm.

3.2.5. Mô men uốn trong khung (tổ hợp tải có tải trọng động đất)

Biểu đồ biến đổi mô men uốn của sáu sơ đồ khung trong trường hợp này thể hiện ở Hình 8 và so sánh sự chênh lệch mô men uốn lớn nhất tại các chân cột ở tầng dưới cùng, theo phần trăm (%) của các khung với sơ đồ 1 cho trong (Bảng 6).

Khi chịu động đất, mô men uốn lớn nhất trong ba cột dưới cùng thay đổi tới gần 12 % giá trị khi có xét tới độ mềm của nút khung (sơ đồ 3 so với sơ đồ 1). Tuy nhiên, khi kể đến hiệu ứng P-delta, hầu như giá trị mô men uốn lớn nhất không chịu ảnh hưởng của hiệu ứng P-delta.

3.2.6. Lực cắt đáy (tổ hợp tải có tải trọng động đất)

Giá trị lực cắt đáy của sáu sơ đồ khung trong trường hợp này thể hiện ở Hình 9 và so sánh sự chênh lệch lực cắt đáy, theo phần trăm (%), của các khung với sơ đồ 1 cho trong (Bảng 7).

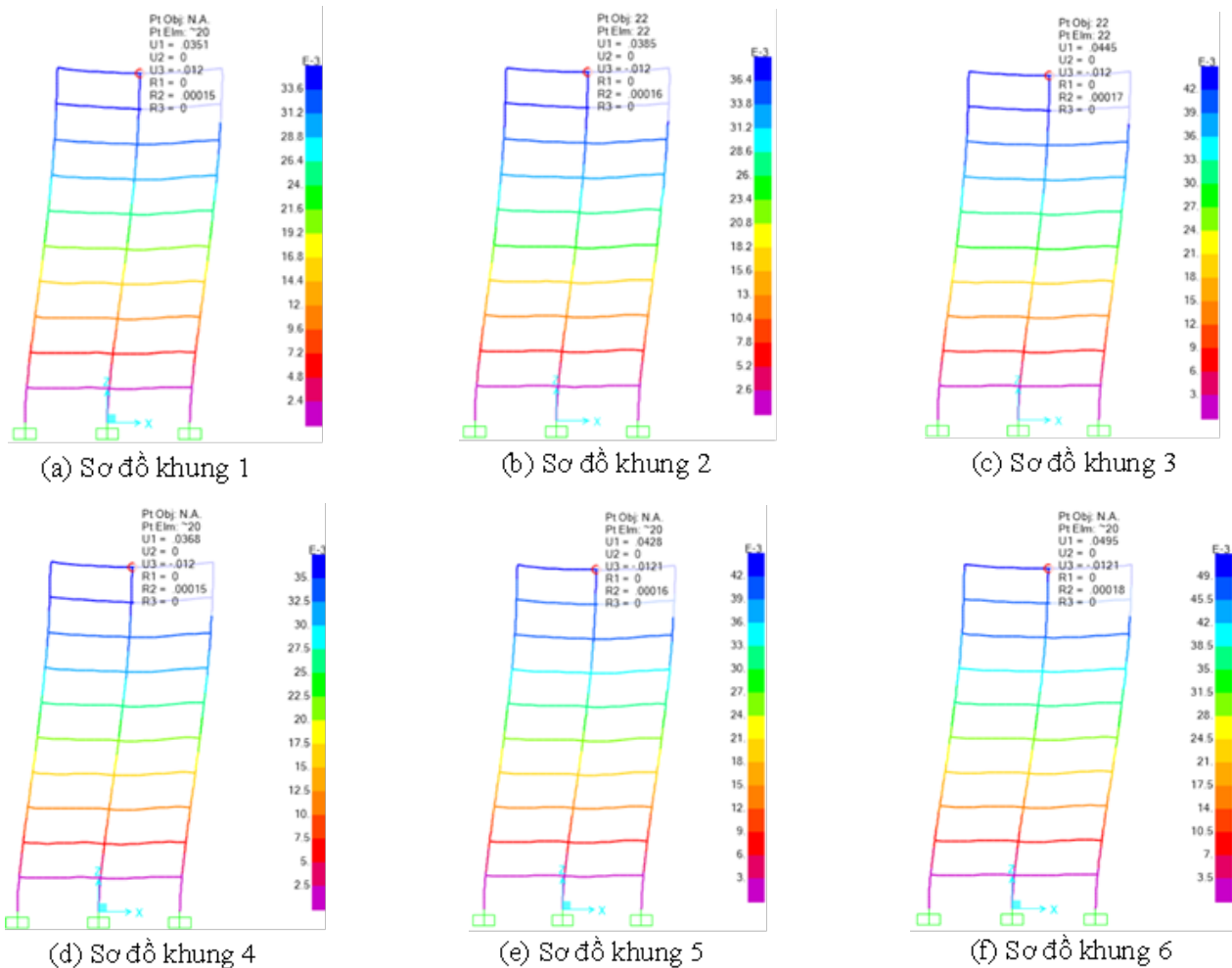
Giá trị hoàn toàn không thay đổi, lực cắt đáy không chịu ảnh hưởng của độ mềm nút khung và hiệu ứng P-delta.

3.2.7. Gia tốc đỉnh công trình (tổ hợp tải có tải trọng động đất)

Biểu đồ biến đổi gia tốc đỉnh của sáu sơ đồ khung trong trường hợp này thể hiện ở Hình 10 và so sánh sự chênh lệch gia tốc đỉnh, theo phần trăm (%) của các khung với sơ đồ 1 cho trong (Bảng 8).

Bảng 2. Chu kỳ dao động của các sơ đồ khung và so sánh.

Sơ đồ khảo sát	RZF, P-delta	Chu kỳ dao động (sec)	So sánh chu kỳ dao động (%)	So sánh độ cứng khung (%)
1	RZF = 1,0	3,698	100,00	100,00
2	RZF = 0,5	3,854	103,58	93,20
3	RZF = 0,0	4,008	107,06	87,25
4	RZF = 1,0 & P-delta	4,029	107,73	86,17
5	RZF = 0,5 & P-delta	4,235	112,67	78,79
6	RZF = 0,0 & P-delta	4,439	118,69	70,98



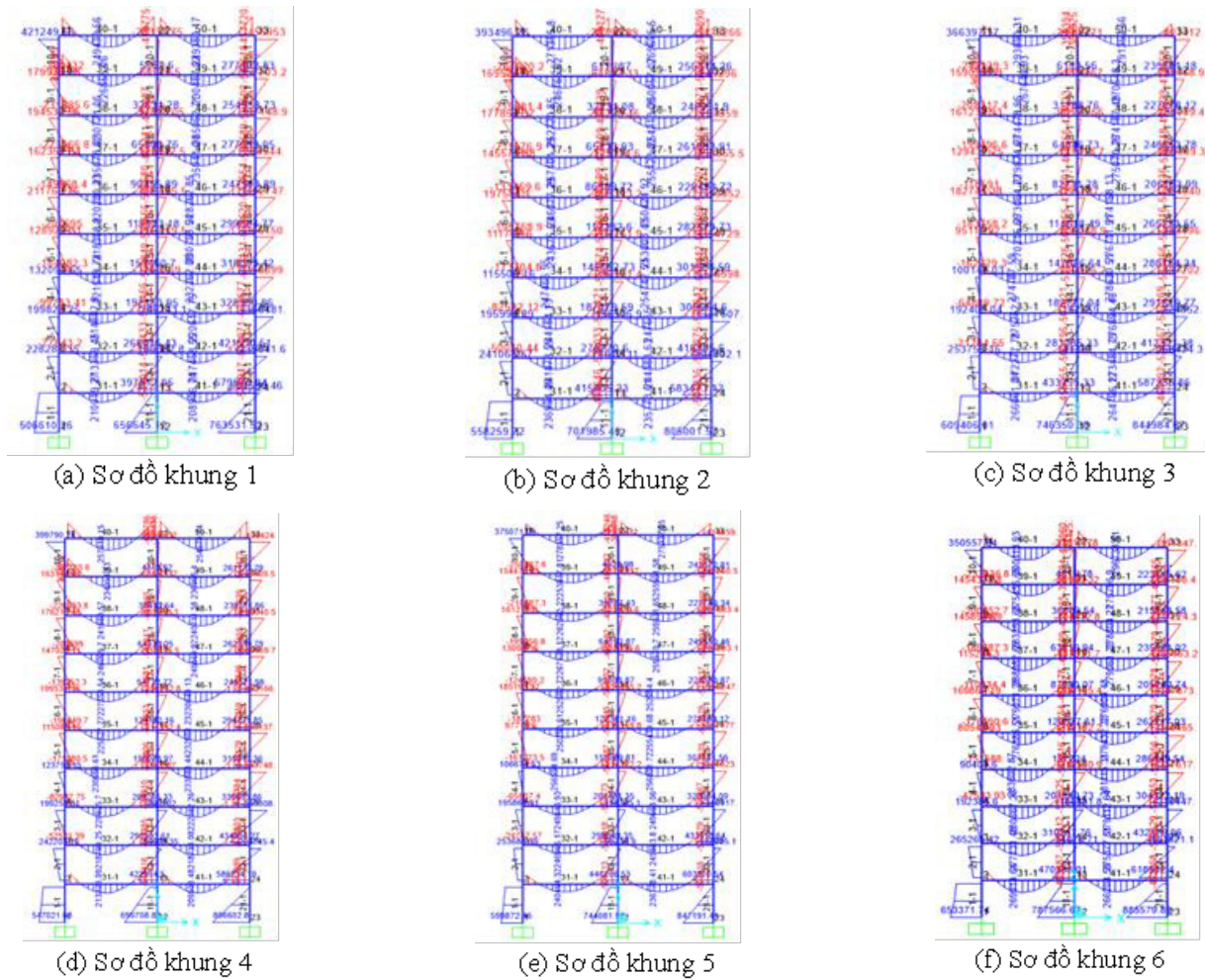
Hình 5. Sơ đồ biến dạng của khung có tải trọng gió.

Bảng 3. Chuyển vị đỉnh (có tải gió) của các sơ đồ khung và so sánh.

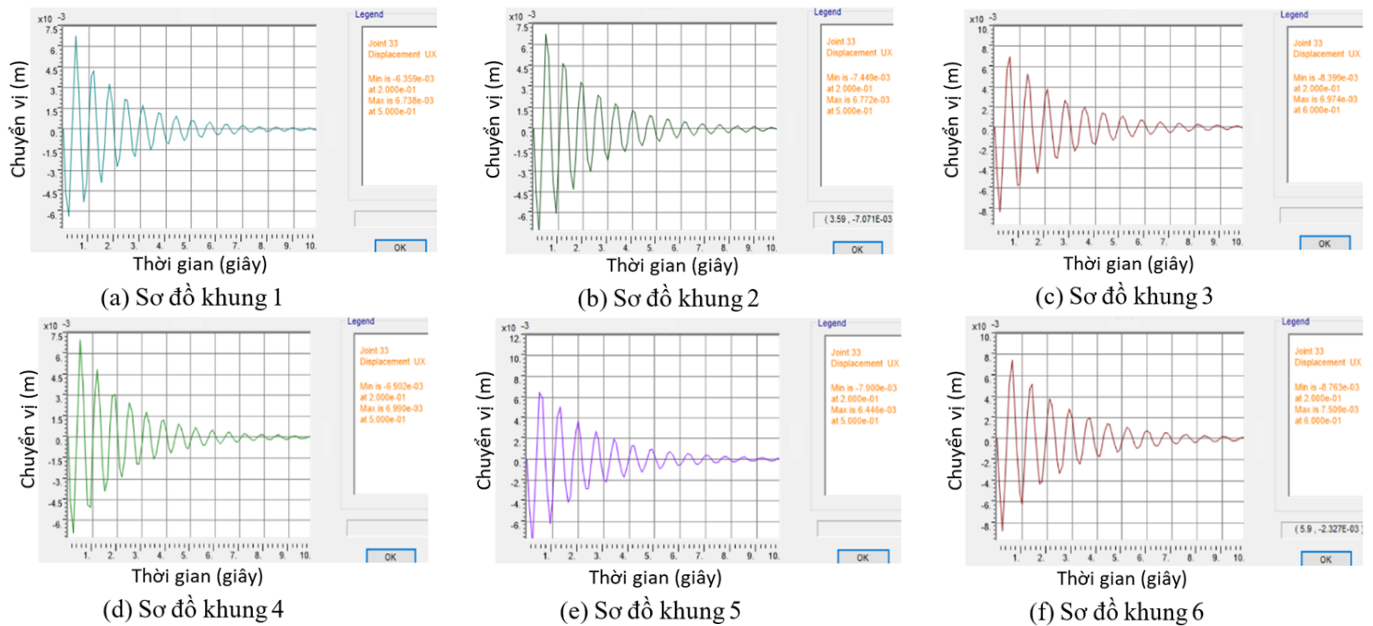
Sơ đồ khảo sát	RZF, P-delta	Giá trị chuyển vị đỉnh lớn nhất (m)	So sánh chuyển vị đỉnh (%)
1	RZF = 1,0	0,0351	100,00
2	RZF = 0,5	0,0385	109,69
3	RZF = 0,0	0,0445	126,78
4	RZF = 1,0 & P-delta	0,0368	104,84
5	RZF = 0,5 & P-delta	0,0428	121,94
6	RZF = 0,0 & P-delta	0,0495	141,03

Bảng 4. Mô men uốn tại các chân cột của các sơ đồ khung và so sánh.

Sơ đồ khảo sát	RZF, P-delta	Giá trị mô men uốn lớn nhất tại các chân cột (kNm)	So sánh mô men uốn (%)
1	RZF = 1,0	763,531	100,00
2	RZF = 0,5	805,001	105,43
3	RZF = 0,0	844,984	110,67
4	RZF = 1,0 & P-delta	806,602	105,64
5	RZF = 0,5 & P-delta	847,191	110,95
6	RZF = 0,0 & P-delta	885,579	115,98



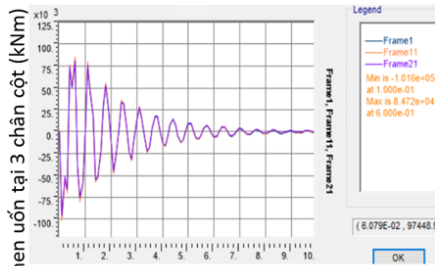
Hình 6. Biểu đồ mô men uốn trong khung có tải gió.



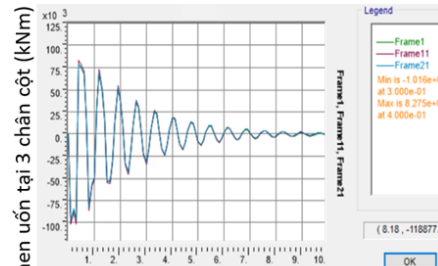
Hình 7. Sơ đồ biến dạng của khung có tải trọng động đất.

Bảng 5. Chuyển vị đỉnh (có tải động đất) của các sơ đồ khung và so sánh.

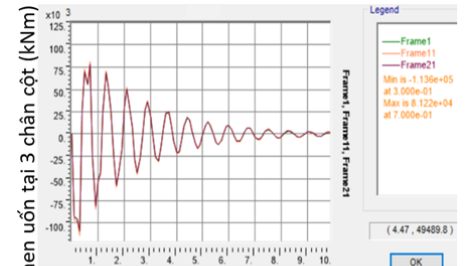
Sơ đồ khảo sát	RZF, P-delta	Giá trị chuyển vị đỉnh lớn nhất (m)	So sánh chuyển vị đỉnh (%)
1	RZF = 1,0	0,00674	100,00
2	RZF = 0,5	0,00745	110,53
3	RZF = 0,0	0,00840	124,63
4	RZF = 1,0 & P-delta	0,00699	103,71
5	RZF = 0,5 & P-delta	0,00790	117,21
6	RZF = 0,0 & P-delta	0,00876	130,00



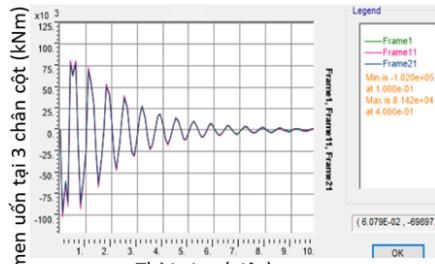
Thời gian (giây)
(a) Sơ đồ khung 1



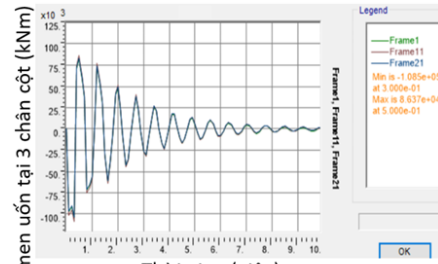
Thời gian (giây)
(b) Sơ đồ khung 2



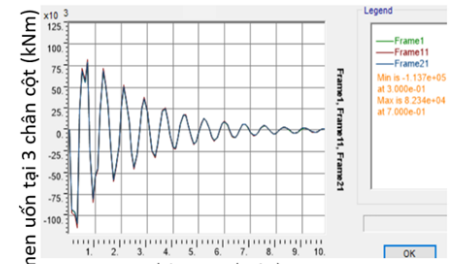
Thời gian (giây)
(c) Sơ đồ khung 3



Thời gian (giây)
(d) Sơ đồ khung 4



Thời gian (giây)
(e) Sơ đồ khung 5

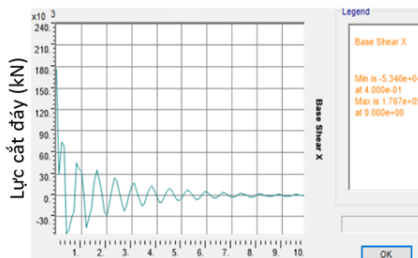


Thời gian (giây)
(f) Sơ đồ khung 6

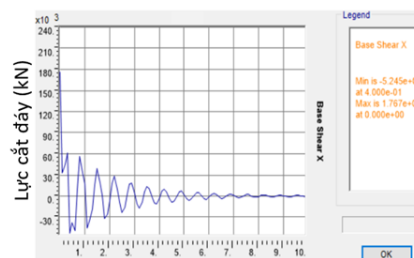
Hình 8. Biểu đồ biến đổi mô men uốn trong ba cột dưới cùng có tải động đất.

Bảng 6. Mô men uốn tại 3 chân cột tầng dưới cùng của các sơ đồ khung và so sánh.

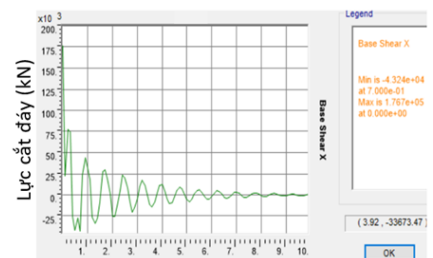
Sơ đồ khảo sát	RZF, P-delta	Giá trị mô men uốn lớn nhất tại chân cột (kNm)	So sánh mô men uốn (%)
1	RZF = 1,0	101,6	100,00
2	RZF = 0,5	101,6	100,00
3	RZF = 0,0	113,6	111,81
4	RZF = 1,0 & P-delta	102,0	100,39
5	RZF = 0,5 & P-delta	108,5	106,79
6	RZF = 0,0 & P-delta	103,7	111,90



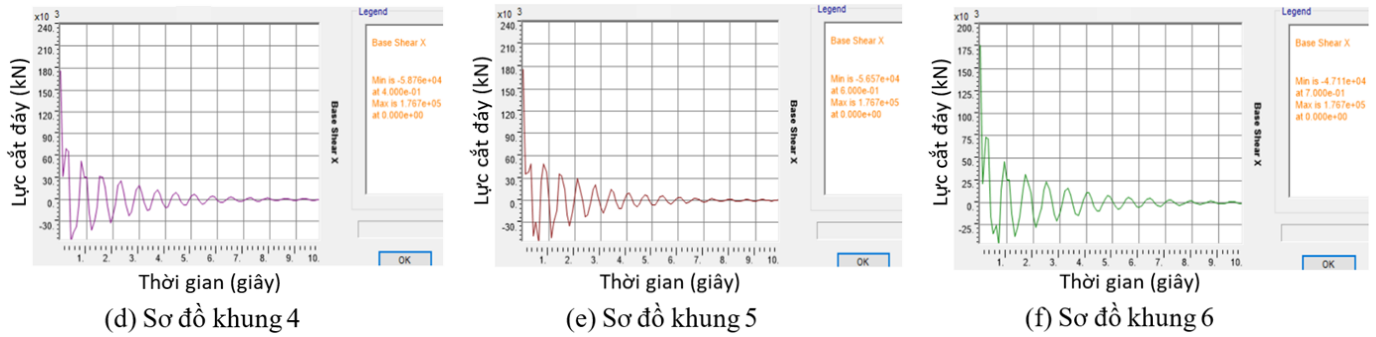
Thời gian (giây)
(a) Sơ đồ khung 1



Thời gian (giây)
(b) Sơ đồ khung 2



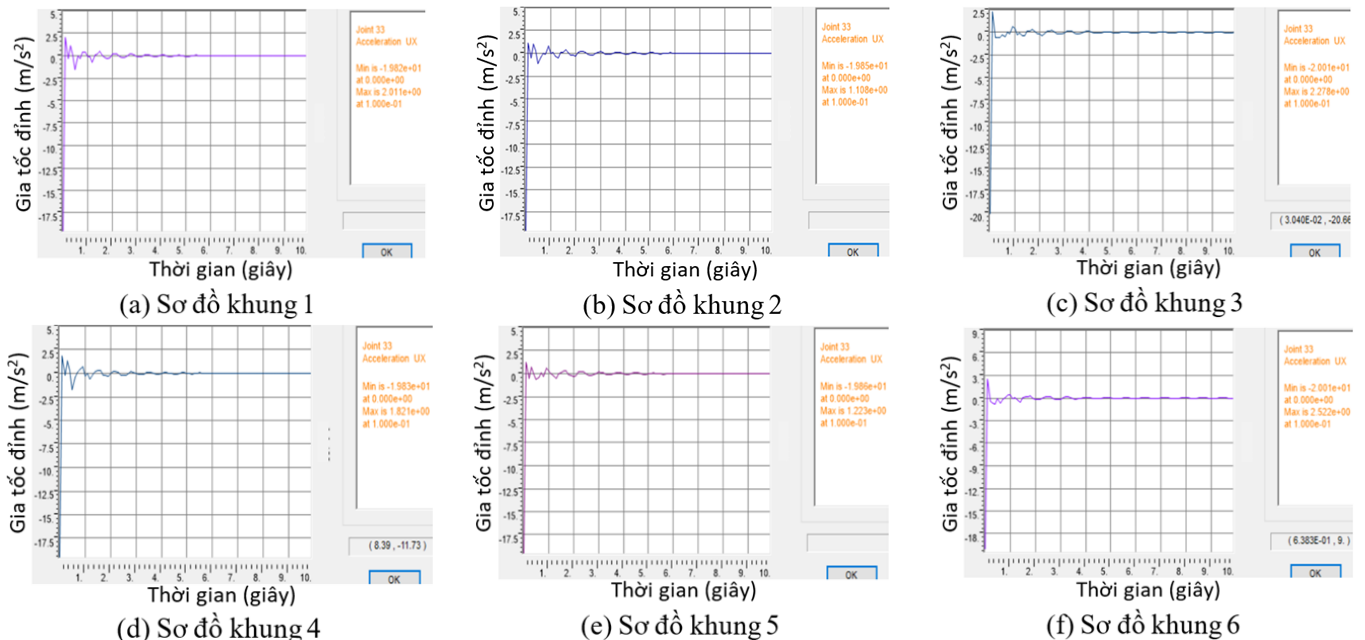
Thời gian (giây)
(c) Sơ đồ khung 3



Hình 9. Biểu đồ lực cắt đáy của khung có tải động đất.

Bảng 7. Giá trị lực cắt đáy lớn nhất của các sơ đồ khung và so sánh.

Sơ đồ khảo sát	RZF, P-delta	Giá trị lực cắt đáy lớn nhất của các khung (kN)	So sánh lực cắt đáy (%)
1	RZF = 1,0	176,7	100,00
2	RZF = 0,5	176,7	100,00
3	RZF = 0,0	176,7	100,00
4	RZF = 1,0 & P-delta	176,7	100,00
5	RZF = 0,5 & P-delta	176,7	100,00
6	RZF = 0,0 & P-delta	176,7	100,00



Hình 10. Biểu đồ gia tốc đỉnh của sơ đồ khung khi chịu động đất.

Bảng 8. Gia tốc đỉnh do tải động đất của các sơ đồ khung và so sánh.

Sơ đồ khảo sát	RZF, P-delta	Giá trị gia tốc đỉnh do tải động đất (m/s²)	So sánh gia tốc đỉnh (%)
1	RZF = 1,0	1,982	100,00
2	RZF = 0,5	1,985	100,15
3	RZF = 0,0	2,001	100,95
4	RZF = 1,0 & P-delta	1,983	100,05
5	RZF = 0,5 & P-delta	1,986	100,20
6	RZF = 0,0 & P-delta	2,001	100,95

Giá trị gia tốc ở đỉnh công trình gần như không đổi khi chịu tải động đất, cho thấy gia tốc đỉnh gần như không chịu ảnh hưởng của độ mềm nút khung cũng như hiệu ứng P-delta.

3.3. Đánh giá chung

Độ mềm của nút khung có ảnh hưởng đáng kể đến chu kỳ dao động của công trình, chênh lệch khoảng 7 %, làm thay đổi độ cứng ngang của công trình có thể tới 13 %. Minh chứng rõ nhất cho việc giảm độ cứng này là chuyển vị đỉnh của công trình khi chịu gió cũng tăng lên theo tỷ lệ tương ứng, khoảng 27 %, khi chịu động đất con số này là khoảng 24-25 %. Mô men uốn khi chịu tải gió khi kể đến độ mềm của nút khung tăng khoảng 10 %, khi chịu động đất khoảng 12 %. Tuy nhiên, các đại lượng khác như gia tốc đỉnh công trình, lực cắt đáy công trình, năng lượng truyền vào công trình khi chịu động đất hầu như không chịu ảnh hưởng của yếu tố độ mềm của nút khung.

Khi ảnh hưởng hiệu ứng P-delta được xem xét bổ sung vào độ mềm của nút khung, thì chu kỳ dao động của khung có thể tăng lên tới 18 %, điều đó sẽ kéo theo độ cứng ngang của công trình sẽ giảm khoảng 29 %. Khi đó, đỉnh công trình có giá trị chuyển vị tăng thêm khi chịu tải gió cũng cùng giá trị đó, khoảng 41 %, còn khi chịu động đất, con số này là khoảng 30 %. Về mô men uốn của ba cột dưới cùng của khung, trường hợp chịu tải trọng gió khi kể đến ảnh hưởng của hiệu ứng P-delta, giá trị sẽ tăng thêm 16 % so với sơ đồ 1 (sơ đồ nút cứng được dùng để tham chiếu). Tuy nhiên, trong trường hợp động đất, các đại lượng như gia tốc đỉnh công trình, mô men lớn nhất ở ba cột dưới cùng, lực cắt đáy gần như không chịu ảnh hưởng của hiệu ứng P-delta.

4. Kết luận

Từ lâu, các kỹ sư xây dựng đã nhận thấy nút khung có độ mềm nhất định, chứ không cứng tuyệt đối như lâu nay vẫn mô phỏng trong các mô hình tính toán thiết kế. Độ mềm nút khung, như biểu hiện trong ví dụ khảo sát của bài báo, là có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử của kết cấu, cụ thể là độ cứng của khung, từ đó làm gia tăng chu kỳ dao động công trình, tăng chuyển vị ngang của đỉnh công trình và mô men uốn ở chân công trình trong các trường hợp kết cấu chịu tải trọng ngang (như gió và động đất). Do vậy, tác giả đề nghị cần thiết đưa độ mềm của nút khung vào sơ đồ khi mô hình hoá kết cấu để tính toán thiết kế.

Hiệu ứng P-delta trong kết cấu cũng là một hiệu ứng thường xuyên tác động lên công trình, tuy nhiên dường như cũng hay bị bỏ quên khi mô hình hoá kết cấu. Theo khảo sát trong bài báo này, tác giả nhận thấy hiệu ứng P-delta bổ sung tác dụng làm giảm độ cứng của kết cấu, kéo theo gia tăng chu kỳ dao động, tăng chuyển vị ngang, tăng giá trị mô men uốn trong các cột dưới cùng (do gió). Tác giả cũng đề xuất đưa hiệu ứng P-delta vào trong mô hình khi mô phỏng kết cấu, nhất là trong trường hợp nhà cao tầng, lực nén dọc trong các cột ở các tầng dưới lớn, hiệu ứng P-delta có khả năng thể hiện rõ hơn.

Ngoài ra, tác giả cũng xin lưu ý còn có những yếu tố khác nữa cũng ảnh hưởng đến sự làm việc của kết cấu công trình, chẳng hạn sự lệch tâm giữa cột trên và cột dưới (trong trường hợp nhà nhiều tầng), hiện tượng từ biến của vật liệu, hiện tượng P-delta do biến dạng cục bộ của cấu kiện chịu nén, sự xuất hiện và phát triển vết nứt (đối với kết cấu bê tông cốt thép)... nên cũng cần có những nghiên cứu khảo sát để có thể đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố này đến ứng xử của kết cấu, nhằm phản ánh đầy đủ hơn sự làm việc của kết cấu công trình.

Lời cảm ơn

Tác giả xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện để tác giả hoàn thành nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

- [1]. M.E. Kartal, H.B. Başağa & A. Bayraktar, M. Muvařık, "Effects of Semi-Rigid Connection on Structural Responses", *Electronic Journal of Structural Engineering*, 2010, vol.10. <https://ejsei.com/EJSE/article/view/122>
- [2]. Võ Mạnh Tùng, Nguyễn Lê Ninh, "Biến dạng của nút khung bê tông cốt thép chịu động đất", *Tạp chí KHCN Xây dựng*, 4/2017.
- [3]. R. Park, T. Paulay, *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons – A Wiley InterScience Publication, 2009.
- [4]. M. Miotto, M. K. El Debs, Ana Lúcia H. de Cresce El Debs, "Analysis of a semi-rigid connection for precast concrete", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 2/2010, Vol.163(issue 1):41-51 DOI: 10.1680/stbu.2009.163.1.41
- [5]. Fu-Hsiang Wu, Wai-Fah Chen, "A design model for semi-rigid connections", *Engineering Structures*, 4/1990, Vol.12 (Issue 2):88-97 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0141029690900131>
- [6]. Nguyễn Hải Quang, Lê Dũng Bảo Trung, Vũ Quốc Anh, "Tổng quan về các mô hình liên kết nửa cứng trong kết cấu khung thép", *Tạp chí Xây dựng – Bộ Xây dựng - ISSN 2734-9888*, 04/2022.
- [7]. Beyhan Bayhan, Gokhan Ozdemir, Polar GunKan, "Impact of Joint Modeling Approach on Performance Estimates of Older-Type RC Buildings", *Sage Journals*, 6/2017, Vol.33(issue 3), DOI: 10.1193/092616EQS159M
- [8]. Timothy M Cameron, A.C. Thirunavukarasu, Mohamed El-Sayed, "Optimization of frame structures with flexible joints", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2/2014, Vol. 19:204-213. DOI: 10.1007/s001580050103
- [9]. S. J. P. J. Marques Filho; Borowitz, "Flexibility modeling of reinforced concrete concentric frame joints", *IBRACON – Structures and Materials Journal*, 6/2013, Vol.6(3). <https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000300002>
- [10]. R.AROCH, *Practical demonstration of the use of joint flexibility in steel frame design*, Springer Nature, 8/2000. <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-010-0950-8>
- [11]. Computers & Structures Inc., "Structural Engineering Software", <https://www.csiamerica.com/products/sap2000/videos/modeling>
- [12]. Computers & Structures Inc., "Structural and Earthquake Engineering Software SAP2000", <https://www.csiamerica.com/products/sap2000/videos/modeling>.
- [13]. Computers & Structures Inc, "CSI Analysis Reference Manual", 11/2017