

**SO SÁNH ỨNG XỬ KHUNG THÉP CÓ LIÊN KẾT NỬA CỨNG PHI TUYẾN
THEO MÔ HÌNH RICHARD - ABBOTT VÀ MÔ HÌNH LUI - CHEN
CHỊU TẢI TRỌNG ĐỘNG**

COMPARISON DYNAMIC BEHAVIOR OF SEMI - RIGID CONNECTIONS STEEL
FRAME ACCORDING TO RICHARD - ABBOTT MODEL AND LUI - CHEN MODEL

NGUYỄN HẢI QUANG^{a,*}, LÊ DŨNG BẢO TRUNG^b, VŨ QUỐC ANH^b

^akhoa Xây dựng, Trường Đại học Điện lực

^bkhoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

*Tác giả đại diện: Email: vquocanh@gmail.com

Ngày nhận 02/3/2024, Ngày sửa 26/3/2024, Chấp nhận 30/3/2024

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2024.vi.vol1-5>

Tóm tắt: Bài báo trình bày hai mô hình liên kết nửa cứng được dùng phổ biến trong phân tích ứng xử khung thép liên kết nửa cứng phi tuyến chịu tải trọng động đó là mô hình Richard - Abbott và mô hình Lui - Chen. So sánh đường cong quan hệ mô men và góc xoay của cùng một liên kết theo mô hình Richard - Abbott và mô hình Lui - Chen. Đề xuất thuật toán cập nhật độ cứng liên kết để tính toán khung thép liên kết nửa cứng phi tuyến. Thuật toán đề xuất đã được kiểm chứng bằng cách so sánh kết quả tính toán khung thép liên kết nửa cứng tuyến tính bằng chương trình tính ASSF bằng ngôn ngữ Matlab do nhóm tác giả lập với phần mềm SAP 2000. Đưa ra thí dụ tính toán khung thép liên kết nửa cứng phi tuyến chịu tải trọng động và so sánh kết quả tính toán giữa hai mô hình Richard - Abbott và mô hình Lui - Chen và đưa ra nhận xét và kiến nghị.

Từ khóa: Khung thép, liên kết nửa cứng, mô hình Richard - Abbott, mô hình Lui - Chen, tải trọng động.

Abstract: This article presents two semi - rigid connection models commonly used in behavior analysis of semi - rigid connection steel frames subjected to dynamic loads that is the Richard - Abbott model and the Lui - Chen model. Compare the moment and rotation relationship curves of the same connection according to the Richard - Abbott model and the Lui - Chen model. Propose an algorithm to update the stiffness connection to calculate nonlinear semi - rigid connection steel frames. The proposed algorithm is also verified by comparing the results of calculating the semi-rigid linear steel frame using the ASSF calculation

program in Matlab, which created by the authors, with SAP 2000 software. Provide an example of calculation of a nonlinear semi - rigid connected steel frame subjected to dynamic loads and compare the calculation results between the Richard - Abbott model and the Lui - Chen model and give comments and recommendations.

Keywords: Steel frame, semi - rigid connection, Richard - Abbott model, Lui - Chen model, dynamic loads.

1. Đặt vấn đề

Trong thiết kế kết cấu thép truyền thống, một cách gần đúng và đơn giản khi phân tích nội lực và chuyển vị khung thép, thường giả thiết liên kết giữa dầm và cột là liên kết cứng hoặc liên kết khớp lý tưởng. Tuy nhiên, trường hợp mô hình được coi là cứng, nhưng thực tế trong liên kết đó vẫn có độ đàn hồi nhất định do biến dạng của các phần tử được liên kết và biến dạng cục bộ của các phân tử nối như bulông, tấm nối... Qua kết quả của nhiều nghiên cứu thực nghiệm và sự làm việc thực tế của kết cấu, thấy rằng liên kết giữa dầm và cột trong kết cấu thép bằng liên kết bu lông và ngay cả liên kết hàn đều có độ đàn hồi nhất định. Vì vậy mô hình liên kết nửa cứng cần được đưa vào để tính khung.

Khi giả thiết là liên kết cứng, đã bỏ qua độ đàn hồi của liên kết, thông thường các chuyển vị tính toán của khung đều nhỏ hơn thực tế, trái lại nội lực của các tiết diện gàn nút thường có giá trị lớn hơn, do đó tiết diện dầm và kích thước liên kết cũng lớn hơn so với yêu cầu. Khi giả thiết liên kết cứng để tính khung, mô men lớn nhất trong dầm thường là mô men gối, nhưng nếu xét đến độ đàn hồi của liên kết tất sẽ có sự phân bố lại mô men trong dầm: liên

kết nửa cứng sẽ làm cân bằng mô men tại gối và mô men ở giữa nhịp. Ngược lại trong trường hợp dầm liên kết khớp với cột, mô men lớn nhất trong dầm xuất hiện tại giữa nhịp và mô men gối bằng không, nhưng nếu sử dụng liên kết nửa cứng sẽ có tác dụng cân bằng được mô men giữa gối và nhịp. Nói cách khác: mô men lớn nhất trong dầm đã giảm đi. Vì thế việc sử dụng liên kết nửa cứng có khả năng làm giảm trọng lượng của toàn bộ khung, chủ yếu là do đã giảm được kích thước của dầm.

Để mô tả đặc điểm ứng xử phi tuyến giữa quan hệ mô men - góc xoay liên kết nửa cứng, có hai mô hình phổ biến là mô hình dạng đường cong và mô hình dạng đa tuyến [1], [2]. Mô hình dạng đường cong tiêu biểu như: mô hình Richard - Abbott, mô hình Lui - Chen, mô hình Frye - Morris [3],... Mô hình đa tuyến tiêu biểu như: mô hình hai đường thẳng, mô hình ba đường thẳng, mô hình đa tuyến,... Nhiều mô hình để phân tích liên kết nửa cứng đã được xây dựng trên cơ sở xử lý các kết quả thí nghiệm, trong đó có hai mô hình phổ biến thường được sử dụng để phân tích khung thép liên kết nửa cứng phi tuyến cần xét đến là mô hình Richard - Abbott, được sử dụng trong các tài liệu như [4, 5, 6, 7] và mô hình Lui - Chen được sử dụng trong các tài liệu như [4, 5, 8]. Mô hình Lui - Chen được đánh giá có mức độ đáp ứng mô hình phi tuyến của liên kết tốt hơn mô hình Richard - Abbott [2], tuy nhiên cả hai mô hình đều thường được nêu ra trong các tài liệu chuyên khảo về tính toán kết cấu khung thép có liên kết nửa cứng nên độc giả sẽ có những băn khoăn về ứng xử giữa hai mô hình liên kết cũng như sẽ chọn mô hình liên kết nào để tính toán, nghiên cứu.

Để có những so sánh, nhận xét trong tính toán khung thép có liên kết nửa cứng giữa hai mô hình liên kết Richard - Abbott và Lui - Chen, cũng như trả lời cho câu hỏi sẽ lựa chọn mô hình liên kết nào, bài báo này trình bày và thực hiện phương pháp tính toán kết cấu khung thép liên kết nửa cứng theo mô hình Richard - Abbott khi chịu tải trọng động để so sánh với kết quả tính toán khung thép liên kết nửa cứng chịu tải trọng động theo mô hình Lui - Chen được tác giả Quang, N. H trình bày trong [9]. Độ tin cậy của thuật toán đề xuất đã được so sánh kiểm chứng với phần mềm SAP 2000 trong trường hợp khung thép liên kết nửa cứng đàn hồi tuyến

tính chịu tải trọng động.

2. Mô hình quan hệ mô men và góc xoay liên kết nửa cứng

2.1 Mô hình Richard - Abbott

Mô hình bốn tham số được Richard và Abbott (1975) [4] đề xuất. Mô men của liên kết được xác định như sau:

$$M = \frac{(k - k_p)|\theta_c|}{\left[1 + \left|\frac{(k - k_p)|\theta_c|}{M_0}\right|^n\right]^{1/n}} + k_p|\theta_c| \quad (1)$$

$$k_r = \frac{dM}{d\theta_r} \Big|_{|\theta_r|=|\theta_c|} = \frac{(k - k_p)}{\left[1 + \left|\frac{(k - k_p)|\theta_c|}{M_0}\right|^n\right]^{(n+1)/n}} + k_p \quad (2)$$

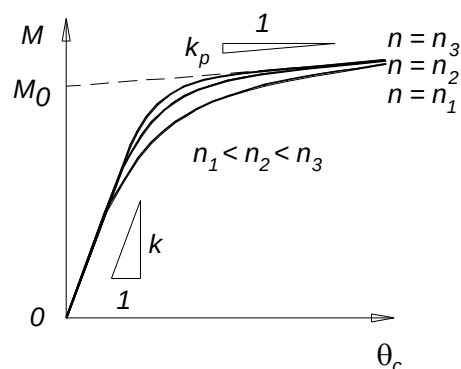
trong đó:

k là độ cứng ban đầu của liên kết;

k_p là độ cứng khi biến dạng của liên kết;

M_0 là giá trị mô men ban đầu tham chiếu;

n là tham số xác định độ nét của đường cong;



Hình 1. Các thuộc tính theo mô hình Richard - Abbott [4]

Mô hình Richard - Abbott (1975) còn được gọi là mô hình bốn tham số vì để xác định được giá trị mô men thì chỉ cần xác định bốn tham số là: độ cứng ban đầu của liên kết; độ cứng khi biến dạng của liên kết; giá trị mô men ban đầu tham chiếu và tham số xác định độ nét của đường cong, các thuộc tính của mô hình trên Hình 1.

2.2 Mô hình Lui - Chen

Lui - Chen (1986, 1988) [4] đề xuất mô hình

hàm mũ được gọi là mô hình hàm mũ Chen - Lui. Mô men của liên kết được xác định như sau:

$$M = M_0 + \sum_{j=1}^n C_j \left[1 - \exp\left(\frac{-|\theta_r|}{2j\alpha}\right) \right] + R_{kf} |\theta_r| \quad (3)$$

Độ cứng tiếp tuyến của liên kết:

$$k_r = \frac{dM}{d\theta_r} \bigg|_{|\theta_r|=|\theta_r|} = \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{2j\alpha} \exp\left(\frac{-|\theta_r|}{2j\alpha}\right) + R_{kf} \quad (4)$$

Độ cứng ban đầu của liên kết được xác định như sau:

$$k_0 = \frac{dM}{d\theta_r} \bigg|_{|\theta_r|=0} = \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{2j\alpha} + R_{kf} \quad (5)$$

trong đó:

M là mô men trong liên kết;

$|\phi_c|$ là giá trị tuyệt đối của góc xoay trong liên kết;

M_0 là mô men ban đầu trong liên kết;

R_{kf} là độ cứng biến dạng - cứng lại (cứng cổ, hoá cứng) của liên kết cũng có thể gọi là độ cứng tăng cứng;

α là hệ số tỷ lệ;

C_j là hệ số điều chỉnh đường cong (curve - fitting) được xác định bằng phương pháp hồi quy;

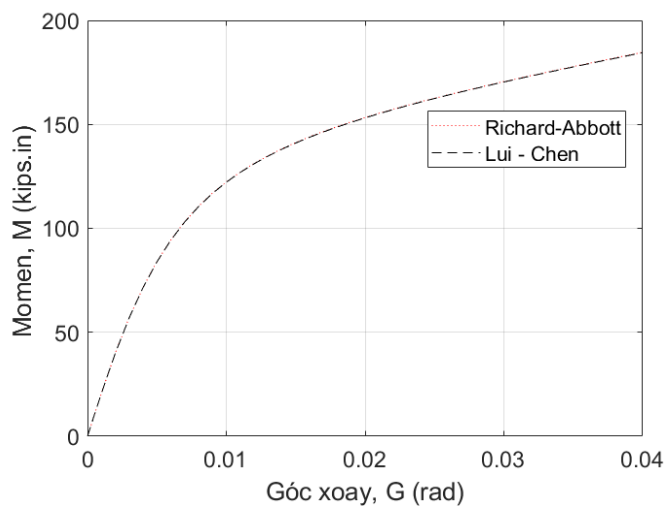
n là số lượng số hạng được xem xét khi hiệu chỉnh đường cong hàm mũ, thông thường $n = 6$, tương ứng $j = 1 \div 6$ [4].

Giá trị các hệ số M_0 , R_{kf} , α , C_j , n được xác định theo cấu tạo của từng loại liên kết, các giá trị này xem trong các sổ tay, tài liệu kỹ thuật tương ứng, điển hình như [10].

2.3 So sánh mô hình liên kết phi tuyến Richard - Abbott và mô hình Lui - Chen

Liên kết giữa dầm với cột được tính toán ứng với số liệu của mô hình Richard - Abbott ($k = 21000$ kip - in/rad; $k_p = 1200$ kip - in/rad; $M_0 = 140$ kip - in, $n = 1,8$; nếu tính với mô hình Lui - Chen có $C_1 = -1,43$; $C_2 = -75,0$; $C_3 = 171,0$; $C_4 = 98,5$; $C_5 = -341,8$; $C_6 = 282,2$; $\alpha = 0,00055$;

$R_{kf} = 1286$; $M_0 = 0$ (các số liệu của liên kết phù hợp đơn vị kips - in) [4]. Quan hệ giữa mô men - góc xoay của cả hai mô hình được thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Quan hệ mô men - góc xoay theo mô hình Richard - Abbott và mô hình Lui - Chen

3. Giải hệ phương trình vi phân

Theo phương pháp phần tử hữu hạn, phương trình dao động của kết cấu như sau [4]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P_t \quad (6)$$

trong đó:

M là ma trận khối lượng;

C là ma trận cản;

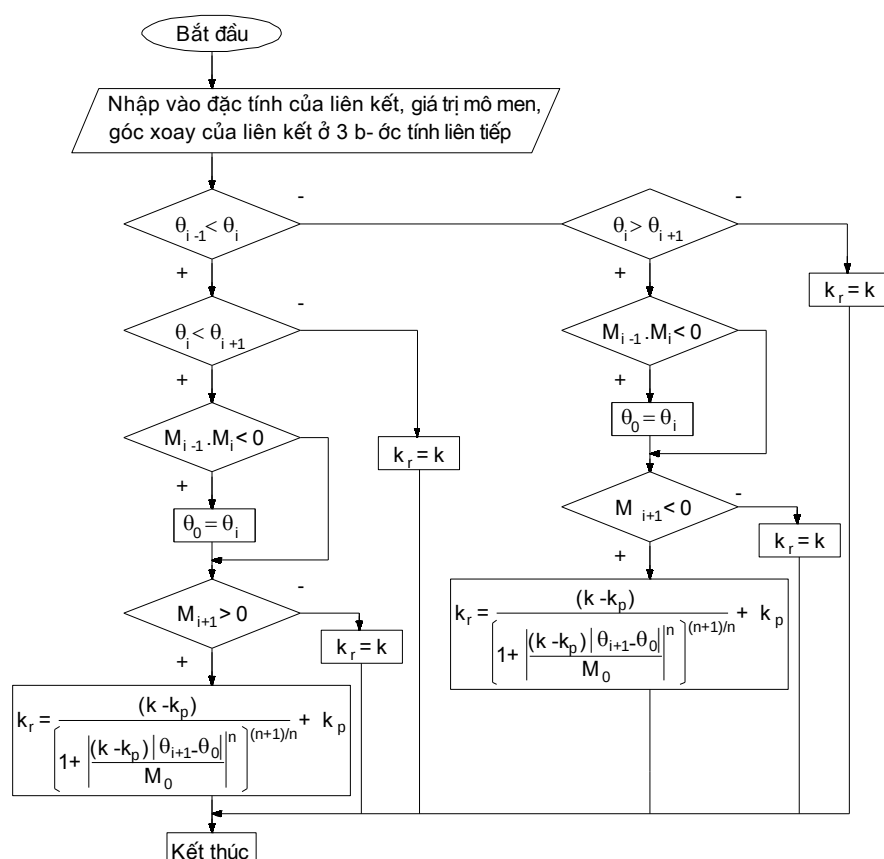
K là ma độ cứng;

P_i là véc tơ tải trọng nút quy đổi;

$u, \dot{u}, \ddot{u}$ lần lượt là véc tơ chuyển vị, vận tốc và gia tốc của các nút khung.

Hệ phương trình (6) là hệ phương trình vi phân phi tuyến, các hệ số M, C, K phụ thuộc vào độ cứng của liên kết, mà độ cứng của liên kết phụ thuộc vào quan hệ giữa mô men và góc xoay của liên kết.

4. Sơ đồ thuật toán cập nhật độ cứng của liên



Hình 3. Sơ đồ khối cập nhật độ cứng của liên kết theo mô hình Richart - Abbott

Sau mỗi bước thời gian tính toán thì phải cập nhật lại độ cứng của từng liên kết. Khi cập nhật cho mỗi một liên kết thì phải đưa vào chương trình con giá trị mô men và góc xoay của liên kết ở ba bước thời gian tính là θ_{i-1}, θ_i và θ_{i+1} để nhằm mục đích xác định quá trình tăng hoặc giảm của quan hệ mô men, góc xoay.

5. Ví dụ tính toán

Xét khung hai tầng một nhịp, các phần tử dầm và cột được làm bằng thép A36 có mô đun đàn hồi $E = 20000 \text{ kN/cm}^2$. Tiết diện của các dầm và cột đều là W5x16, kích thước của các dầm, cột là thép

kết nửa cứng theo mô hình Richart - Abbott

Cập nhật độ cứng của liên kết là một bước quan trọng trong việc tích phân hệ phương trình vi phân phi tuyến của khung thép có liên kết nửa cứng. Trong quá trình chịu tải trọng thay đổi lặp. Quan hệ giữa mô men và góc xoay trải qua các giai đoạn như sau: quá trình tăng mô men và quá trình giảm mô men. Việc cập nhật độ cứng của liên kết được thực hiện như Hình 3.

như trên Hình 4a, các nút đều có khối lượng là $m = 0,04 \text{ kN.s}^2/\text{cm}$ [4].

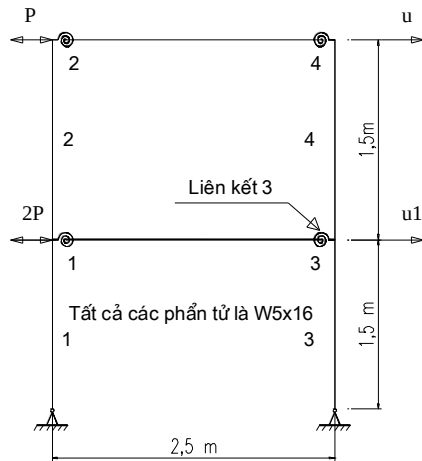
Liên kết giữa cột với móng là khớp, liên kết giữa cột với cột là cứng.

Liên kết giữa dầm với cột được tính toán ứng với số liệu của mô hình Richart - Abbott ($k = 21000 \text{ kip - in/rad}$; $k_p = 1200 \text{ kip - in/rad}$; $M_0 = 140 \text{ kip - in}$, $n = 1,8$; các số liệu của liên kết phù hợp đơn vị kips - in). Quan hệ giữa mô men - góc xoay của các liên kết 1, 2, 3, 4 sau khi quy đổi đơn vị kN.cm - rad được thể hiện như Hình 4b [4]. Liên kết giữa dầm với cột được tính toán ứng với số liệu của mô hình

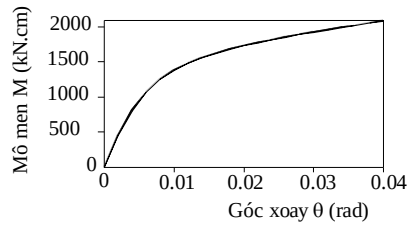
Lui - Chen có $C_1 = -1,43$; $C_2 = -75,0$; $C_3 = 171,0$; $C_4 = 98,5$; $C_5 = -341,8$; $C_6 = 282,2$; $\alpha = 0,00055$; $R_{kf} = 1286$; $M_0 = 0$ (các số liệu của liên kết phù hợp đơn vị kips - in). Các tham số trong hai mô hình được xác định với

dạng liên kết gồm một thép góc $\frac{1}{2}$ in liên kết cánh trên và một thép góc $\frac{1}{2}$ in liên kết cánh dưới của dầm, chi tiết liên kết trong [4, 11].

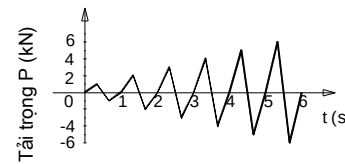
Tải trọng tác dụng thay đổi theo thời gian như trong Hình 4c.



a) Sơ đồ khung



b) Quan hệ Mô men - góc xoay của liên kết

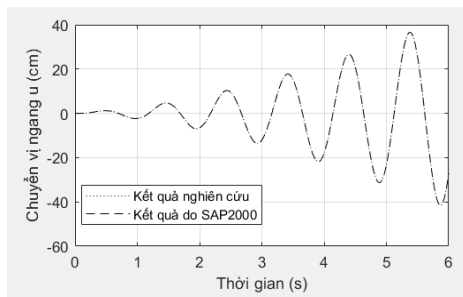


c) Lịch sử thời gian của tải trọng

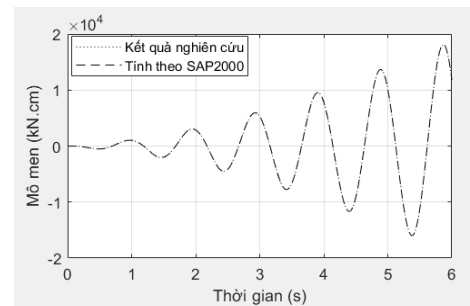
Hình 4. Sơ đồ tính của khung

Thực hiện khảo sát so sánh kết quả của phần mềm ASSF do nhóm tác giả lập và phần mềm SAP 2000 với trường hợp $P = 2$ kN, độ cứng của các

liên kết dầm - cột theo mô hình đàn hồi tuyến tính $k_0 = 234042,9 (kN.cm / rad)$ ta có kết quả như trên Hình 5.



a. Chuyển vị đỉnh u - thời gian

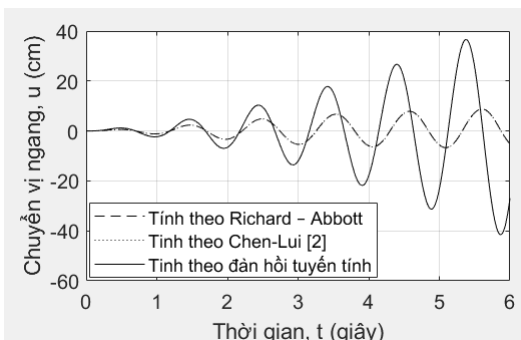


b. Mô men ở liên kết 3 - thời gian

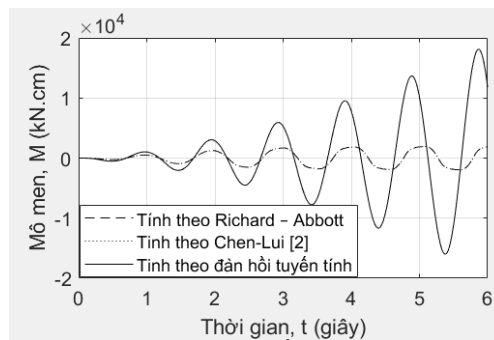
Hình 5. Liên kết nửa cứng theo mô hình đàn hồi tuyến tính tải trọng động

Từ kết quả tính toán trên cho thấy phần mềm ASSF nhóm tác giả lập ra là đáng tin cậy, có thể sử dụng để khảo sát cho trường hợp liên kết dầm - cột là liên kết nửa cứng theo mô hình Richard -

Abbott và mô hình Chen - Lui chịu tải trọng động. Kết quả tính toán khung thép có liên kết nửa cứng với cả hai mô hình được thể hiện ở các hình vẽ dưới đây:



a. Chuyển vị đỉnh - thời gian

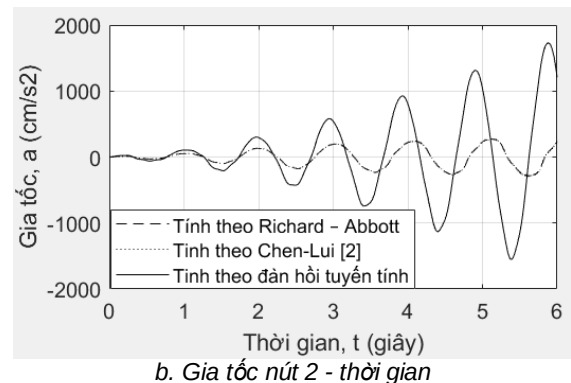
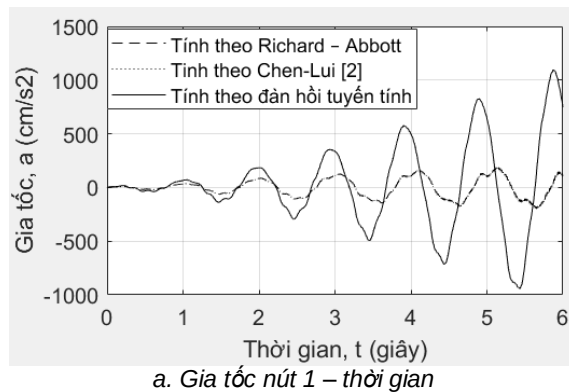


b. Mô men ở liên kết 3 - thời gian

Hình 6. So sánh khi kết cấu chịu tải trọng động theo 3 mô hình liên kết

Từ kết quả tính toán được thể hiện trong Hình 6a cho thấy biên độ dao động của chuyển vị đỉnh khi tính theo mô hình đàn hồi tuyến tính lớn hơn nhiều so với khi tính theo mô hình Lui -

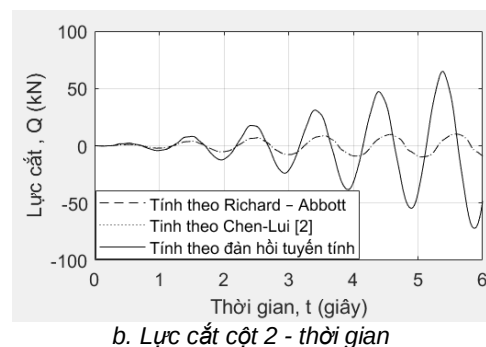
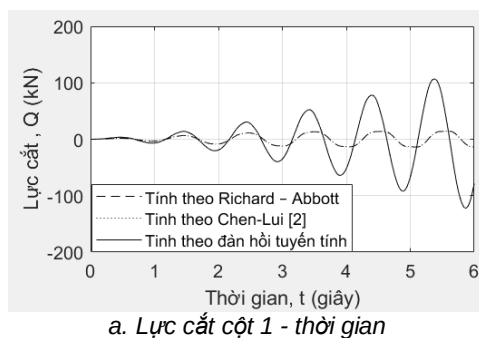
Chen và Richard - Abbott, đồng thời giá trị mô men ở liên kết 3 trên Hình 6b cũng lớn hơn nhiều so với khi tính theo mô hình đàn hồi tuyến tính.



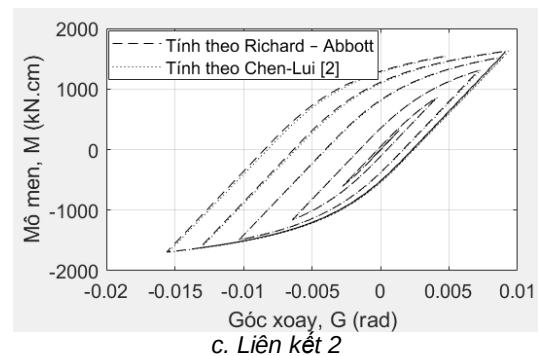
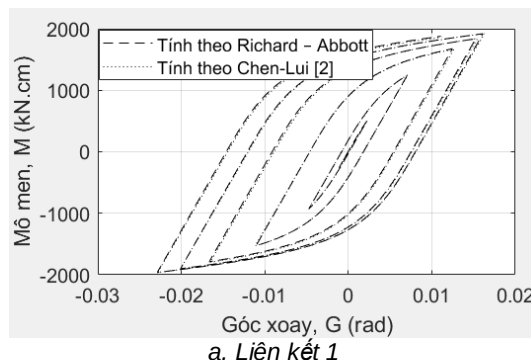
Hình 7. So sánh về gia tốc khi kết cấu chịu tải trọng động

Từ kết quả tính toán thể hiện trong Hình 7 và Hình 8 cũng cho thấy biên độ dao động của các gia tốc ở nút, lực cắt của các cột khi tính theo mô hình

Lui - Chen và mô hình Richard - Abbott nhỏ hơn nhiều so với khi tính toán theo mô hình đàn hồi tuyến tính.



Hình 8. So sánh về lực cắt khi kết cấu chịu tải trọng động



Hình 9. Quan hệ giữa mô men và góc xoay của các liên kết trường hợp tải trọng động

Từ Hình 9 độ cứng của liên kết thay đổi trong quá trình dao động. Trong mỗi chu kỳ dao động, giá trị độ cứng của liên kết đạt tới giá trị độ cứng ban đầu $k_0 = 234042,9(kN.cm/rad)$ là một nửa chu kỳ.

6. Nhận xét và kết luận

Khung thép liên kết nửa cứng phi tuyến đã được tính toán với 3 mô hình, một mô hình liên kết

đàn hồi tuyến tính và hai mô hình liên kết phi tuyến là mô hình Richard - Abbott và mô hình Lui - Chen.

Độ tin cậy của thuật toán đề xuất đã được kiểm chứng giữa khung thép liên kết nửa cứng đàn hồi tuyến tính chương trình tính ASSF do nhóm tác giả lập với phần mềm SAP cho kết quả gần như trùng nhau (Hình 5).

Dạng liên kết nửa cứng phi tuyến khảo sát trong ví dụ của bài báo có tương quan $M - \theta$ ở mức độ trung gian giữa dạng liên kết cứng và liên kết khớp [10], kết quả tính toán cho thấy với dạng liên kết nửa cứng phi tuyến khảo sát tính toán theo mô hình liên kết Richard - Abbott và Lui - Chen là như nhau (Hình 2). Do vậy khi phân tích nội lực chuyển vị sẽ cho kết quả giống nhau; khi nghiên cứu hoặc tính toán với dạng liên kết như đã khảo sát thì chỉ cần chọn một trong hai mô hình đã nêu.

Qua phân tích và tính toán trên cũng nhận thấy rằng việc tính toán khung thép liên kết nửa cứng theo mô hình đàn hồi tuyến tính đơn giản hơn nhiều so với việc tính toán khung thép nửa cứng mô hình phi tuyến, nhưng việc phân tích khung thép liên kết nửa cứng chịu tải trọng động theo mô hình phi tuyến phản ánh sát hơn sự làm việc thực tế của khung so với mô hình tính.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Kishi N, Chen WF, Goto Y, Matsuoka KG (1993). "Design aid of semi - rigid connections for frame analysis". Eng J, AISC. 30(3): 90 - 107.
- [2] Kishi N and Chen WF (1986). "Data Base of Steel Beam - to - Column Connections". Structural Engineering Report No. CE - STR - 93 - 15.
- [3] Chen WF, Kishi N, (1990). "Semi - rigid steel beam - to - column connections data base and modeling". ASCE Journal of Structural Engineering. Vol. 116 - 1, pp. 105 - 119.
- [4] Chan S.L and Chui P.P.T (2000). "Non - linear static and cyclic analysis of steel frames with semi - rigid connections". Elsevier.
- [5] Andréa R. D. Silva, Everton A. P. Batelo, Ricardo A. M. Silveira, Francisco A. Neves, Paulo B. Gonçalves (2018). "On the Nonlinear Transient Analysis of Planar Steel Frames with Semi-Rigid Connections: From Fundamentals to Algorithms and Numerical Studies". Latin American Journal of Solid and Structures, 15(3), e28.
- [6] Peter Pui Tak Chui and Siu Lai Chan (1997). "Vibration and deflection characteristics of semi-rigid jointed frames". Engineering Structures, Vol. 19, No. 12, pp. 1001 - 1010.
- [7] Koriga, S., Ihaddoudene, A-N. T. & Saidani, M. (2019). "Numerical model for the non-linear dynamic analysis of multi-storey structures with semi - rigid joints with specific reference to the Algerian code". Elsevier, Structures, vol. 19, pp. 184-192.
- [8] Miodrag Sekulovic, Ratko Salatic, Marija Nefovska (2002). "Dynamic analysis of steel frames with flexible connections". Computers and Structures, Pergamon, 80: 935 - 955.
- [9] Nguyễn Hải Quang (2023). "Phân tích khung thép có liên kết nửa cứng theo mô hình của Lui - Chen chịu tải trọng động". Tạp chí của Bộ Xây dựng, ISSN: 2734 - 9888, Số 6, tr 142 - 144.
- [10] Wai-Fah Chen, Norimitsu Kishi, Masato Komuro (2011). "Semi - rigid connections handbook". J.Ross Publishing, Inc, USA.
- [11] Thomas Wayne Stelmack (1982). "Analytical and Experimental Response of Flexibly - Connected Steel Frames". A Thesis Master of Science, University of Colorado, USA