ĐÁNH GIÁ ĐỘ TIN CẬY CỦA KHUNG THÉP VÁT LIÊN KẾT NỬA CỨNG CHỊU TẢI TRỌNG GIÓ BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN NGẪU NHIÊN

EVALUATION OF THE RELIABILITY OF SEMI-RIGID BEVELED STEEL FRAMES SUBJECTED TO WIND LOADS BY THE RANDOM FINITE ELEMENT METHOD

Phạm Trung Thành[1,*], Nguyễn Hồng Sơn[2], Vũ Thành Trung[1]

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) ngẫu nhiên (Stochastic Finite Element Method-SFEM) nhằm phân tích khung vát có liên kết nửa cứng chịu tải trọng gió khi các thông số liên kết và tải trọng là các đại lượng ngẫu nhiên. Thuật toán phân tích ứng xử của kết cấu là sự kết hợp của phương pháp PTHH và mô phỏng Monte-Carlo. Chương trình tính sau đó được sử dụng để đánh giá độ tin cậy của khung thép vát có liên kết nửa cứng chịu tải trọng gió.

Từ khóa: *Phần tử hữ hạn; phần tử hữu hạn ngẫu nhiên; khung thép vát; liên kết nửa cứng.*

ABSTRACT

The Stochastic Finite Element Method (SFEM) was used to examine chamfer frames with semi-rigid connections that were exposed to wind stresses in this research paper. The connection parameters and the load are both random variables. A mixture of mathematical modeling and Monte-Carlo simulation is used to analyze the structure's behavior. The computation program is then used to examine the wind load resistance of a beveled steel frame with semi-rigid connections.

Keywords: *FEM; SFEM; chamfer frames; semi-rigid connections.*

[1]Viện Khoa học Công nghệ xây dựng
[2]Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[*]Email: phamthanh.ibst@gmail.com
Ngày nhận bài: 10/3/2022
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/5/2022
Ngày chấp nhận đăng: 27/6/2022

1. GIỚI THIỆU

Gần đây, khung thép vát bắt đầu được nghiên cứu và ứng dụng trong xây dựng dân dụng và công nghiệp do tối ưu được vật liệu mà vẫn đảm bảo độ bền, độ cứng vững của kết cấu. Tuy nhiên, các kết quả mới chỉ dừng lại ở bài toán khung thép vát liên kết đàn hồi chịu tải trọng tĩnh hoặc bài toán dao động riêng. Ngoài ra việc đánh giá độ tin cậy của kết cấu là công việc cần thiết để đảm bảo an toàn tuyệt đối trước khi đưa vào sử dụng.

Trên thế giới, việc nghiên cứu khung thép được thực hiện khá sớm. Có thể kể đến một số công bố tiêu biểu như: XiaoDong Tang [1] đã xuất bản công trình nghiên cứu về hàm dạng của cấu kiện dầm, cột tiết diện vát. Trong nghiên cứu này, tác giả cũng cung cấp ma trận độ cứng của của dầm với các tiết diện khác nhau như hình chữ nhật, hình tròn, hình khuyên. M. Rezaiee-Pajand và M. Moayedian [2] đã xây dựng công thức xác định độ cứng của dầm chữ I tiết diện vát bằng phương pháp PTHH. Trong khi, Samson Takele [3] xây dựng ma trận độ cứng của dầm tiết diện bất kỳ. Vensko [4] sử dụng phương pháp PTHH để phân tích ổn định xoắn của dầm có mặt cắt với tiết diện biến đổi. Al-Fatlawi [5] nghiên cứu dao động tự do của dầm hộp tiết diện vát sử dụng phần mềm NASTRAN. Zhang và Tong [6] nghiên cứu mất ổn định cánh của dầm chữ I tiết diện vát sử dụng phần mềm ANSYS. Louie [7] cung cấp công thức xác định độ cứng cho dầm 2D tiết diện vát trong nghiên cứu của mình. Rishi Kumar Shukla [8] đã phân tích dao động của dầm tiết diện vát sử dụng hàm đa thức Chebyshev. Hơn nữa, Issa và cộng sự [9] sử dụng phương pháp độ cứng trực tiếp (*Direct stiffness method*) để phân tích khung thép mái dốc có gờ.

Trong nước, nghiên cứu ứng xử cơ học của khung thép cũng được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu từ những năm 2000. Có thể kể đến một số tác giả như: Vũ Quốc Anh và Nguyễn Thanh Hoa [10] đã phân tích ứng xử của khung thép xét đến sự làm việc đàn hồi của liên kết dựa trên tiêu chuẩn thực hành kết cấu thép công trình dân dụng và cầu của Hoa Kỳ. Đến cho năm 2013, Vũ Quốc Anh [11] đã xuất bản cuốn sách "tính toán và thiết kế khung thép liên kết đàn hồi" tại Nhà xuất bản Xây dựng làm tài liệu tham khảo cho kỹ sư, cán bộ kỹ thuật, cán bộ nghiên cứu ngành xây dựng khi tính toán và thiết kế khung thép với liên kết đàn hồi cho những công trình thực tế. Trước đó, Nguyễn Hồng Sơn [12] đã phân tích dao động của khung thép phẳng liên kết nửa cứng phi tuyến kể đến biến dạng dẻo chịu tác động đồng thời của nhiều tải trọng bằng phương pháp PTHH.

Từ tổng quan về tình hình nghiên cứu trong nước và trên thế giới, mục tiêu chính của bài báo là phân tích ứng xử cơ học của khung thép vát có liên kết nửa cứng và đánh giá độ tin cậy của kết cấu.

2. CÔNG THỨC PHẦN TỬ HỮU HẠN NGẪU NHIÊN

2.1. Thuật toán giải bài toán động lực học khung vát có liên kết nửa cứng chịu tác dụng của tải trọng động

Xét hệ khung bất kỳ được mô hình hóa bằng phương pháp PTHH, chịu tác dụng của một tải trọng biến đổi theo thời gian t. Phương trình vi phân dao động toàn hệ có dạng:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(\mathbf{t})+\mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(\mathbf{t})+\mathbf{K}\mathbf{q}(\mathbf{t})=\mathbf{F}(\mathbf{t}) \quad (1)$$

trong đó: các ma trận **M, C, K** của bản thân hệ khung, không phụ thuộc vào tải tác dụng, chỉ cần tính một lần.

Véctơ **F** tại mỗi thời điểm sẽ thay đổi theo quy luật của hàm tác dụng. Do đó, nó cần được tính trong từng bước thời gian.

Phương trình (1) được tính bằng phương pháp tích phân trực tiếp Newmark các bước như sau:

- Gán điều kiện đầu:

$$q_0=0;\dot{q}_0=0 \quad (2)$$

$$\mathbf{A}=\mathbf{M}+\gamma dt\mathbf{C}+\beta dt^2\mathbf{K} \quad (3)$$

với dt là bước tích phân và các hằng số sai phân:

$$\beta=\frac{1}{4};\gamma=\frac{1}{2} \quad (4)$$

- Gia tốc tại bước (n+1):

$$\ddot{q}_{n+1}=A^{-1}\begin{pmatrix}F-C\left(\dot{q}_n+(1-\gamma)dt\ddot{q}_n\right)\\-K\left(q_n+dt\dot{q}_n+\left(\frac{1}{2}-\beta\right)dt^2\ddot{q}_n\right)\end{pmatrix} \quad (5)$$

- Vận tốc tại bước (n+1):

$$\dot{q}_{n+1}=\dot{q}_n+(1-\gamma)dt\ddot{q}_n+\gamma dt\ddot{q}_{n+1} \quad (6)$$

- Chuyển vị tại bước (n+1):

$$q_{n+1}=q_n+dt\dot{q}_n+dt^2\left(\frac{1}{2}-\beta\right)\ddot{q}_n+dt^2\beta\ddot{q}_{n+1} \quad (7)$$

Chương trình phân tích kết cấu hệ khung chịu tải trọng biến đổi theo thời gian được lập trình bằng phần mềm MATLAB. Để đơn giản, ma trận cản phần tử C_e được xác định theo lý thuyết cản Rayleigh và được biểu diễn tuyến tính qua ma trận khối lượng và ma trận độ cứng phần tử:

$$C_e=aM_e+bK_e \quad (8)$$

với a, b được xác định qua tỷ số cản và hai tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu. Giả thiết rằng tỉ số cản $\zeta_1=\zeta_2=\zeta$, khi đó a, b được xác định theo công thức sau:

$$\begin{Bmatrix}a\\b\end{Bmatrix}=\frac{2\zeta}{\omega_1+\omega_2}\begin{Bmatrix}\omega_1\omega_2\\1\end{Bmatrix} \quad (9)$$

2.2. Phương pháp mô phỏng Monte Carlo

Phương pháp Monte Carlo thực chất là một phương pháp dùng các số giả ngẫu nhiên để mô phỏng tính chất ngẫu nhiên của các biến và trực tiếp ước lượng độ tin cậy trên cơ sở luật số lớn. Bản chất của vấn đề là phải tính tích phân trong các biểu thức hàm công năng. Viết lại biểu thức này trong bài toán cụ thể với véc tơ ngẫu nhiên đầu vào $\mathbf{X}=\{X_1,X_2,...X_n\}$ và miền an toàn được định nghĩa bởi điều kiện $f(\mathbf{X})>0$. Xác suất không an toàn của hệ sẽ được xác định như sau:

$$P_f=\int I_{f(\mathbf{x})<0}f_{\mathbf{x}}(x)dx=E\left[I_{f(\mathbf{X})<0}\right] \quad (10)$$

trong đó:

$$I_{f(\mathbf{x})}=\begin{cases}1 & khi \quad f(\mathbf{X})<0\\0 & khi \quad f(\mathbf{X})\geq 0\end{cases} \quad (11)$$

Theo lý thuyết xác suất thông kê, nếu chúng ta có N các thể hiện của véc tơ ngẫu nhiên **X**, chúng ta sẽ tính được một mẫu gồm N các giá trị của hàm $I_{f(\mathbf{X})<0}$. Khi đó kỳ vọng của $I_{f(\mathbf{X})<0}$ có thể tính xấp xỉ trung bình cộng của mẫu.

$$\widehat{P}_f=E\left[I_{f(\mathbf{X})<0}\right]=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}I^i_{f(\mathbf{X})} \quad (12)$$

Ước lượng là hội tụ và khoảng tin cậy ở 95% của giá trị P_f được tính như sau:

$$\widehat{P}_f\left(1-200\sqrt{\frac{1-\widehat{P}_f}{N\widehat{P}_f}}\right)\leq\widehat{P}_f\leq\widehat{P}_f\left(1+200\sqrt{\frac{1-\widehat{P}_f}{N\widehat{P}_f}}\right) \quad (13)$$

Độ tin cậy của hệ được tính theo biểu thức:

$$\widehat{P}_s=1-\widehat{P}_f \quad (14)$$

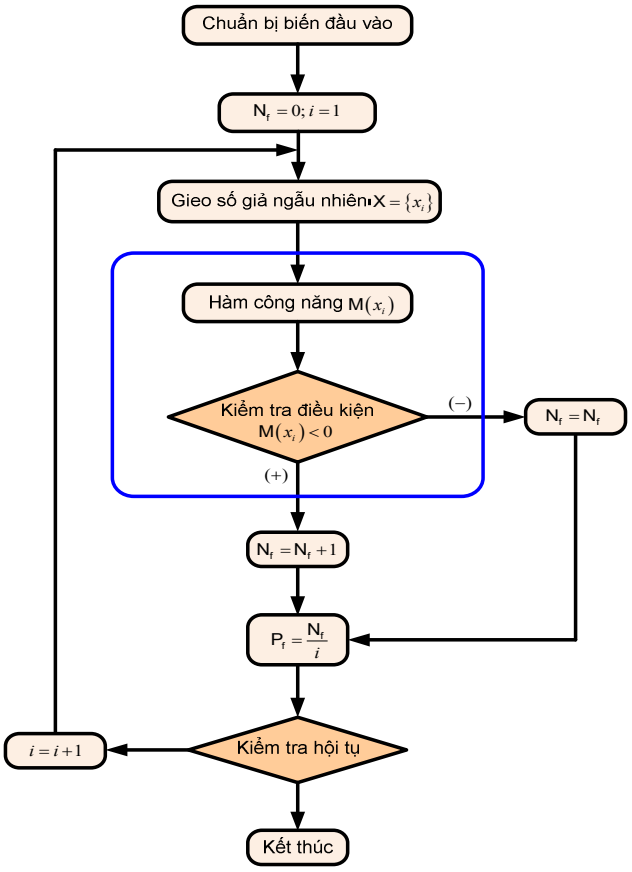
Khi đó chỉ số tin cậy được tính như sau:

$$\widehat{\beta}=-\Phi^{-1}\left(\widehat{P}_f\right) \quad (15)$$

Chúng ta nhận thấy rằng, trong phương pháp này các biến ngẫu nhiên đầu vào không nhất thiết phải là các biến chuẩn. Hơn nữa, phương pháp này có thể áp dụng được ngay cả khi hàm trạng thái không có dạng biểu thức giải tích cũng như không có dạng tuyến tính. Việc ghi nhận kết quả thực chất là đếm số lần kết quả rơi vào miền an toàn N_s trong tổng số N lần mô phỏng. Độ tin cậy hay xác suất rơi vào miền an toàn sẽ được ước lượng bằng tỷ số giữa số lần kết quả rơi vào miền an toàn trên tổng số lần gieo theo biểu thức (16). Điều kiện hội tụ chứng tỏ độ tin cậy của giá trị xác suất ước lượng được

$$\widehat{P}_s=\frac{N_s}{N} \quad (16)$$

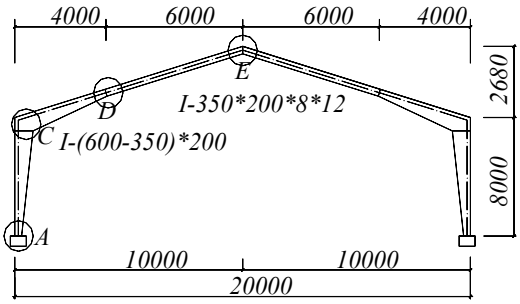
Ưu điểm của phương pháp này là có thể áp dụng phân tích các bài toán lớn, có mô hình phức tạp với hàm công năng đa mục tiêu. Tuy nhiên phương pháp này có nhược điểm lớn nhất là có khối lượng tính toán lớn và yêu cầu cao về cấu hình máy tính. Mặc dù vậy cùng với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ thông tin thì phương pháp Monte Carlo ngày càng được ứng dụng rộng rãi.



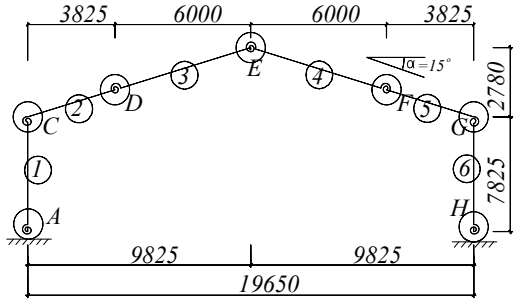
Hình 1. Sơ đồ thuật toán của phương pháp mô phỏng Monte Carlo

3. KẾT QUẢ SỐ

3.1. Đáp ứng động của khung thép vát có liên kết nửa cứng chịu tải trọng gió



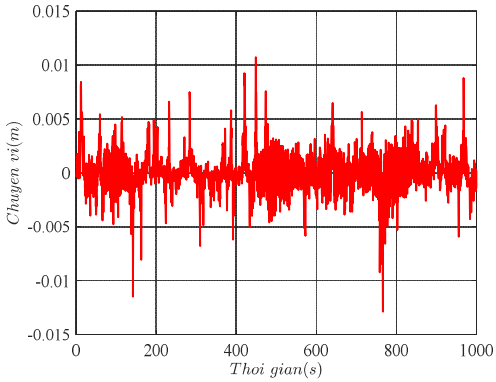
a) Mô hình hình học



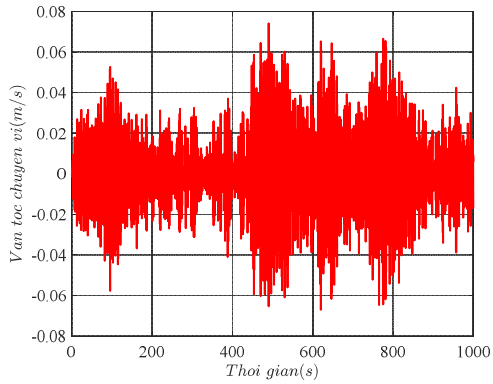
b) Mô hình PTHH

Hình 2. Mô hình khung thép vát có liên kết nửa cứng chịu tác dụng của tải trọng gió

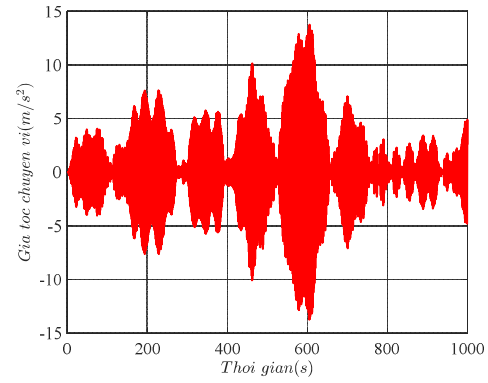
Sử dụng mô hình khung có tiết diện mặt cắt hình chữ I, chiều dày thay đổi theo chiều dài dầm như hình 2, thuộc tính vật liệu của các cấu kiện là mô đun đàn hồi E = 21.10^{4}MPa, trọng lượng riêng ρ = 78,5 N/m^3 và hệ số poát xông v = 0,3. Các kết quả phân tích đáp ứng động của điểm chính giữa khung chịu tải trọng gió đo được ở mô hình gió A được trình bày dưới dạng các đồ thị hình 3.



a) Đáp ứng chuyển vị



b) Đáp ứng vận tốc



c) Đáp ứng gia tốc

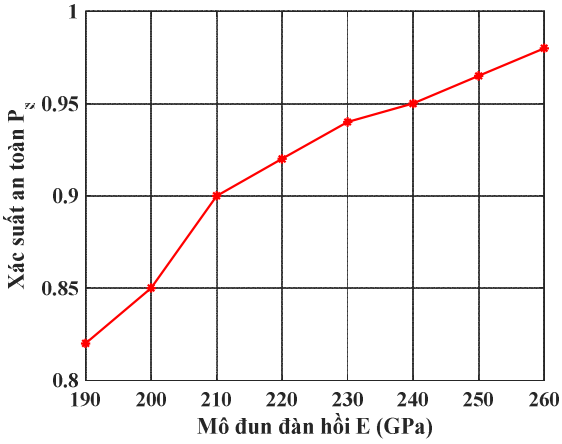
Hình 3. Đáp ứng động tại điểm chính giữa khung vát chịu tải trọng gió theo mô hình gió A

3.2. Độ tin cậy của khung thép vát liên kết nửa cứng chịu tải trọng gió

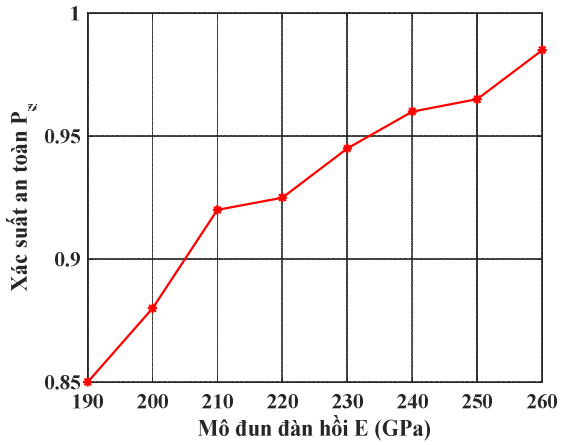
3.2.1. Ảnh hưởng của sai số tải trọng gió

Để khảo sát ảnh hưởng của sai số tải trọng gió đến độ tin cậy về chuyển vị của khung thép vát liên kết nửa cứng có độ cứng biên nửa cứng 10^7(kN/m). Giả định rằng, các

thông số hình học và vật liệu là các đại lượng tất định trong khi tải trọng gió là đại lượng ngẫu nhiên có kỳ vọng là mô hình tải trọng gió tác dụng lên kết cấu được đo theo thời gian được cho dưới dạng các đồ thị tại điểm đo ở địa hình A với hệ số biến động ν = 0,15. Trong bài toán tiền định, như kết quả phân tích đáp ứng chuyển vị lớn nhất của nút số 4 của khung vát liên kết nửa cứng chịu tác dụng của tải trọng gió tại địa hình A như hình 3 là 1,8mm. Kết quả tính toán xác suất an toàn (P_s) về chuyển vị của kết cấu khi mô đun đàn hồi E nhận các giá trị 190GPa; 200GPa; 210GPa; 220GPa; 230GPa; 240GPa; 250GPa và 260GPa được thể hiện trên các hình 4a, 4b tương ứng với hệ số an toàn lần lượt là n = 1,5 và n = 2. Có thể thấy rằng, dù mô đun đàn hồi có tăng so với bài toán tiền định (E = 21.10⁴MPa = 210GPa) và hệ số an toàn về chuyển vị lớn hơn 1 nhưng độ tin cậy của kết cấu vẫn không đạt được 100%. Điều này là do sai số cũng như tính chất ngẫu nhiên của tải trọng.



a) n = 1,5

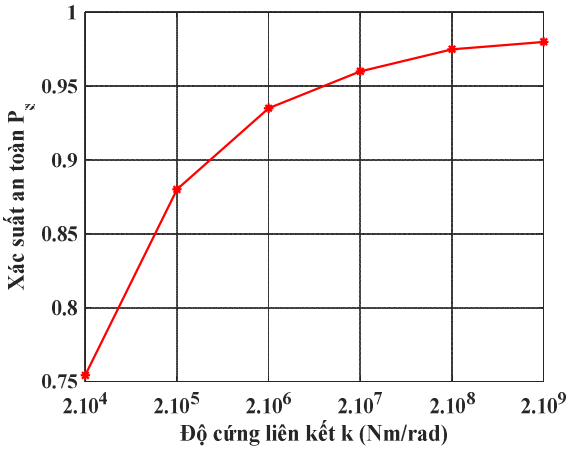


b) n = 2

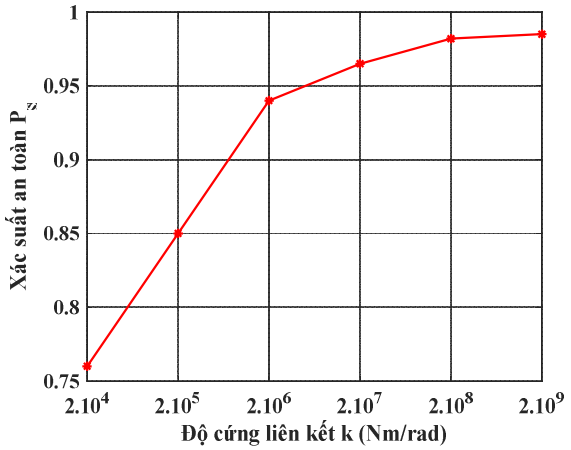
Hình 4. Độ tin cậy của khung thép vát với tính chất ngẫu nhiên của tải trọng gió

3.2.2. Ảnh hưởng của độ cứng liên kết nửa cứng

Trong mục này, ảnh hưởng của sai độ cứng liên kết nửa cứng đến độ tin cậy của khung thép vát liên kết nửa cứng được xem xét. Mô đun đàn hồi của vật liệu E = 21.10⁴MPa. Giả định rằng, các thông số hình học và tải trọng là các đại lượng tất định trong khi độ cứng của liên kết nửa cứng là đại lượng ngẫu nhiên có kỳ vọng là k = 10^7(kN/m) với hệ số biến động ν = 0,15. Trong bài toán tiền định, như kết quả phân tích đáp ứng chuyển vị lớn nhất của nút số 4 của khung thép vát liên kết nửa cứng chịu tác dụng của tải trọng gió tại Lang Cang (P_{LC}) như hình 3 lần là 1,6820mm. Kết quả tính toán xác suất an toàn (P_s) về chuyển vị của kết cấu khi độ cứng của liên kết nửa cứng nhận các giá trị 2.10^4; 2.10^5; 2.10^6; 2.10^7; 2.10^8 và 2.10^9 được thể hiện như hình 5a và 5b. Có thể thấy rằng, dù mô đun đàn hồi có tăng so với bài toán tiền định (k = 10^7) và hệ số an toàn về chuyển vị lớn nhất được chọn là n = 1,5 và n = 2 nhưng xác suất phá hủy kết cấu vẫn tồn tại. Điều này cho thấy tính chất ngẫu nhiên của liên kết ảnh hưởng lớn đến độ tin cậy của kết cấu.



a) n = 1,5



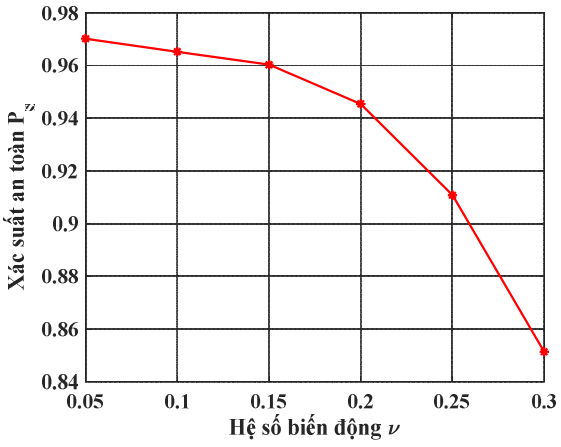
b) n = 2

Hình 5. Độ tin cậy của khung thép vát với tính chất ngẫu nhiên của liên kết

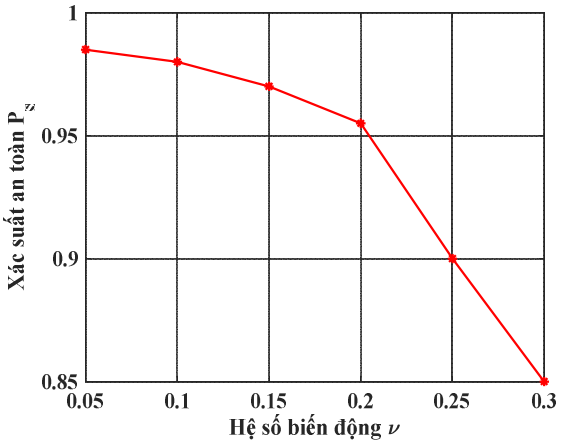
3.2.3. Ảnh hưởng của hệ số biến động

Cuối cùng, ảnh hưởng của hệ số biến động đến độ tin cậy của khung thép vát liên kết nửa cứng được khảo sát. Giả định rằng, các thông số hình học và tải trọng là các đại lượng tất định trong khi độ cứng biên nửa cứng là đại

lượng ngẫu nhiên có kỳ vọng là k = 10^7 với các hệ số biến động khác nhau. Kết quả tính toán xác suất an toàn (P_s) về chuyển vị của kết cấu khi hệ số biến động ν nhận các giá trị từ 0,05 đến 0,3 được thể hiện trên hình 6a và hình 6b. Có thể thấy rằng, hệ số biến động tăng, xác suất an toàn P_s giảm. Điều này là do hệ số biến động là đại lượng đặc trưng cho mức độ sai số của độ lệch chuẩn, hệ số biến động tăng dẫn đến tăng mức độ sai lệch của kì vọng (ν = σ / μ).



a) n = 1,5



b) n = 2

Hình 6. Độ tin cậy của khung thép vát với các giá trị khác nhau của hệ số biến động

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã tiến hành phân tích độ tin cậy của khung vát liên kết nửa cứng các yếu tố ngẫu nhiên là tải trọng gió và liên kết nửa cứng. Có thể kết luận rằng mặc dù các khâu thiết kế, chế tạo và khai thác sử dụng đều tuân theo các tiêu chuẩn cho phép nhưng nếu xét đến yếu tố ngẫu nhiên của các tham số này thì vẫn dẫn đến tỷ lệ rủi ro cho kết cấu. Vì vậy việc đánh giá độ tin cậy của kết cấu ngay từ khâu thiết kế khi cố gắng kể đến các yếu tố ngẫu nhiên có thể xảy ra từ khi hình thành dự án đến khi đưa công trình vào khai thác sử dụng là rất quan trọng. Bài báo đã thiết lập mối quan hệ giữa độ tin cậy và sai số tải trọng gió, liên kết nửa cứng. Các kết quả thu được cũng chỉ ra rằng mặc dù kết cấu có độ cứng cao hơn thiết kế nhưng độ tin cậy vẫn không đạt 100% do yếu tố ngẫu nhiên của các thông số đầu vào. Do đó việc phân tích độ tin cậy trong bài toán thiết kế là việc làm rất có ý nghĩa trong việc lựa chọn phương án thiết kế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Tang, X, 1993. *Shape functions of tapered beam-column elements*. Computers & structures. 46, 943-953.

[2]. Moayedian M., M. Rezaiee Pajand,2000. *Explicit stiffness of tapered and monosymmetric I beam-columns*. International Journal of Engineering, 13, 1-18.

[3]. Takele S, 2002. *Computerized Analysis of Frames with Non Prismatic Members*. MSc. Thesis, University of Addis Ababa.

[4]. Vensko M. J., 2009. *Lateral-torsional buckling of structures with monosymmetric cross-sections*. University of Pittsburgh.

[5]. Al-Fatlawi M. S, 2005. *Free Vibration Analysis Tapered Box Grider using Grillage Analogy and Finite Element Methods*. Journal of Engineering, 11.

[6]. Zhang L., G. S. Tong, 2008. *Lateral buckling of web-tapered I-beams: A new theory*. Journal of Constructional Steel Research, 64, 1379-1393.

[7]. Louie, 2009. *Stiffness matrix for 2D tapered beams.* Walla University.

[8]. Zeinali Y. H., S. M. Jamali, S. Musician, 2013. *General form of the stiffness matrix of a tapered beam-column*. International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME), 1, 149-153.

[9]. Issa H. K., F. A. Mohammad, 2009. *Practical non-prismatic stiffness matrix for haunched-rafter pitched-roof steel portal frames*. In Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction, 189-194. CRC Press.

[10]. Vu Quoc Anh, Nguyen Thanh Hoa, 2011. *Ung xu cua khung thep nha cong nghiep khi xet den su lam viec dan hoi cua lien ket.* Science research topic, Hanoi Architectural University.

[11]. Vu Quoc Anh, 2013. Tinh toan va thiet ke khung thep lien ket dan hoi. Construction Publishing House, Hanoi.

[12]. Nguyen Hong Son, 2006. *Analysis of flat steel frames with nonlinear semi-rigid connections including plastic deformation of materials*. PhD thesis, Hanoi Architectural University.

AUTHORS INFORMATION

Pham Trung Thanh[1], Nguyen Hong Son[2], Vu Thanh Trung[1]

[1]VietNam Institute for Building Science and Technology

[2] Hanoi Architectural University