

ĐÁNH GIÁ XÁC SUẤT AN TOÀN CỦA HỆ THANH BIÊN TRÊN CHỊU NÉN TRONG CẦU DÀN THÉP BẰNG PHƯƠNG PHÁP LẤY MẪU HYPERCUBE LATIN VÀ MÔ PHÒNG MONTE CARLO

Nguyễn Trọng Hà^{1,*}, Trần Anh Nghĩa²

¹Khoa Xây dựng, Trường Đại học Vinh, Nghệ An, Việt Nam

²Khoa Toán, Trường Sư phạm, Trường Đại học Vinh, Nghệ An, Việt Nam

ARTICLE INFORMATION TÓM TẮT

Journal: Vinh University
Journal of Science
p-ISSN: 3030-4563

Volume: 53

Issue: 1A

***Correspondence:**

trongha@vinhuni.edu.vn

Received: 01 November 2023

Accepted: 08 December 2023

Published: 20 March 2024

Citation:

Nguyễn Trọng Hà, Trần Anh Nghĩa (2024). Đánh giá xác suất an toàn của hệ thanh biên trên chịu nén trong cầu dàn bằng phương pháp lấy mẫu Hypercube Latin và mô phỏng Monte Carlo.

Vinh Uni. J. Sci.

Vol. 53 (1A), pp. 17-25

doi: 10.56824/vuj.s.2023a155

Cầu dàn thép là kết cấu được sử dụng phổ biến trong các công trình giao thông đường bộ và đường sắt. Cầu dàn có kết cấu đơn giản, khả năng chịu lực lớn, hiệu quả kinh tế cao. Sự an toàn của cầu dàn thép phụ thuộc rất nhiều vào điều kiện ổn định của hệ thanh biên phía trên, đặc biệt là khi xem xét các yếu tố ngẫu nhiên. Với mục đích đánh giá độ tin cậy hệ thanh biên phía trên của cầu dàn thép theo các điều kiện ổn định, một mô hình xác định từ điều kiện an toàn về ổn định của thanh biên cánh trên đã được xây dựng. Sau đó, mô hình ngẫu nhiên được xây dựng dựa trên mô hình xác định với các yếu tố đầu vào ngẫu nhiên như kích thước hình học và tính chất vật liệu. Xác suất an toàn (độ tin cậy) của hệ thanh biên phía trên được thực hiện bằng phương pháp lấy mẫu Hypercube Latin và mô phỏng Monte Carlo. Kết quả phân tích xác suất an toàn cho thấy phương pháp lấy mẫu Hypercube Latin và mô phỏng Monte Carlo có độ chính xác cao và tiết kiệm tài nguyên máy tính so với phương pháp Monte Carlo lấy mẫu truyền thống.

Từ khóa: Độ tin cậy; lấy mẫu Hypercube Latin; mô phỏng Monte Carlo; cầu dàn thép; ổn định thanh cánh.

1. Giới thiệu

Phân tích độ tin cậy của kết cấu là quá trình đánh giá, dự đoán và định lượng khả năng của một hệ thống kết cấu để duy trì tính an toàn, ổn định và hoạt động hiệu quả trong thời gian dài dưới các điều kiện khác nhau [1]. Hiện nay, các kỹ thuật phân tích độ tin cậy phổ biến gồm phương pháp bậc nhất (First-order probability method-FORM), bậc hai (Second-order probability method-SORM), độ phức tạp (Subset simulation method), đánh giá theo thời gian khi biến ngẫu nhiên liên tục (Time-dependent reliability analysis), và phương pháp mô phỏng Monte Carlo (MCS). Các nghiên cứu về phân tích độ tin cậy kết cấu sử dụng các phương pháp trên đã được thực hiện khá đầy đủ [2-6].

OPEN ACCESS

Copyright © 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License \(CC BY NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits non-commercially to share (copy and redistribute the material in any medium) or adapt (remix, transform, and build upon the material), provided the original work is properly cited.

Cầu dàn thép thành hở và cầu dàn thép nói chung là chủ đề được nhiều nhà nghiên cứu về kết cấu thép, đặc biệt là trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng và kỹ thuật cầu đường quan tâm nghiên cứu. Các nghiên cứu này thường tập trung vào các mô hình tính toán, thiết kế, và đánh giá hiệu suất của cầu dàn thép thành hở [7-9].

Hơn nữa với đặc thù của kết cấu thép thường có cường độ cao và độ mảnh lớn, vì vậy nghiên cứu về ổn định và độ tin cậy là hết sức cần thiết. Năm 2017, Cheng và cộng sự đã sử dụng phương pháp tối ưu hóa dựa trên độ tin cậy để tối ưu hóa trọng lượng của cầu vòm giàn thép chịu các ràng buộc về xác suất (xác suất hư hỏng tổng thể của kết cấu) và các ràng buộc xác định (ứng suất và độ võng) [10]. Trong khi đó, đánh giá độ tin cậy mỗi của cấu kiện thép bằng phương pháp tuổi thọ ứng suất xác suất cũng đã được công bố trong [11]. Phân tích độ tin cậy với mục tiêu cho trước của trụ cầu liên quan đến trạng thái giới hạn hiện tượng cực đoan của động đất được M. Safari và cộng sự công bố trong [12]. Nhìn chung các nghiên cứu này cung cấp cái nhìn sâu rộng về việc đánh giá và cải thiện độ tin cậy của cầu thép, từ việc tối ưu hóa thiết kế đến việc xác định kế hoạch bảo trì và đánh giá độ bền trong các điều kiện tải trọng khác nhau. Tuy nhiên, theo hiểu biết của các tác giả, việc kết hợp phương pháp Latin Hypercube sampling (LHS) và MCS để đánh giá độ tin cậy của giá trị lực tới hạn hệ thanh biên chịu nén của cầu dàn thép chưa được nghiên cứu đầy đủ.

Mục tiêu của bài báo này đánh giá xác suất tin cậy của giá trị lực tới hạn hệ thanh biên chịu nén của cầu dàn thép xem xét các tham số đầu vào là ngẫu nhiên rời rạc bằng kỹ thuật kết hợp LHS và MCS. Xác suất tin cậy của giá trị lực tới hạn hệ thanh biên chịu nén của cầu dàn thép sẽ được so sánh với phương pháp MCS truyền thống về độ chính xác và tiết kiệm tài nguyên máy tính.

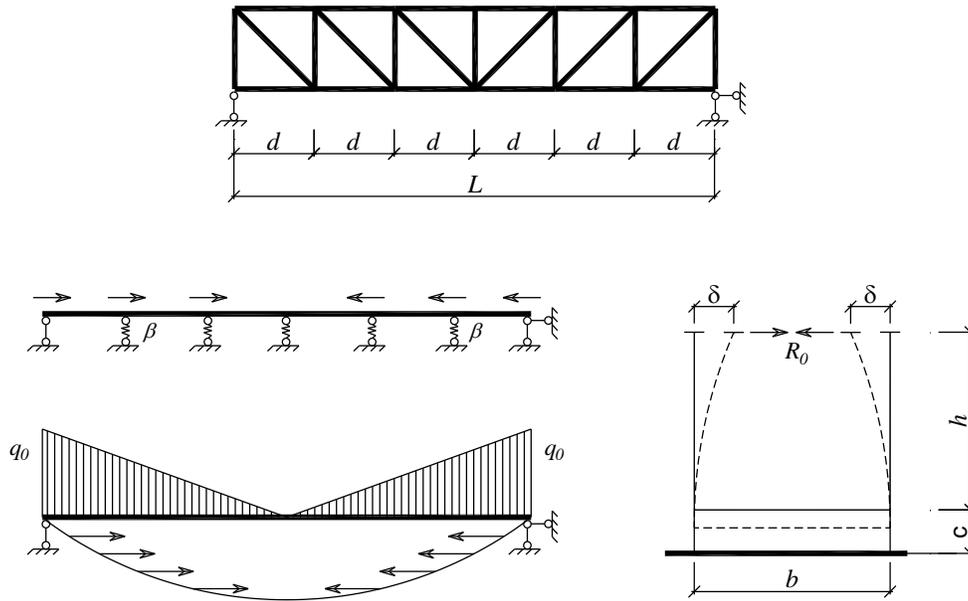
2. Ổn định hệ thanh biên trên chịu nén trong cầu dàn hở

2.1. Mô hình tính toán

Cầu dàn thép hở trong nghiên cứu này là loại cầu dàn được thể hiện trên Hình 1. Mô hình tính toán ổn định hệ thanh biên chịu nén đã được đề xuất trong [13]. Trong đó, hệ thanh biên trên chịu nén được xem xét như một dầm liên tục với gối tựa đàn hồi như thể hiện trên Hình 2.



Hình 1: Mô hình cầu dàn thép



Hình 2: Mô hình tính toán hệ thanh biên trên chịu nén cầu dầm thép thành hồ

Cường độ của lực nén phân bố được xác định theo biểu thức sau đây.

$$q(z) = \frac{q_0}{L}(L - 2z) \tag{1}$$

Hệ số nền (β) mô phỏng quy đổi được xác định theo biểu thức (2) sau đây.

$$\beta = \frac{R_0}{d} \tag{2}$$

Trong đó, d là chiều dài của đốt dầm, R_0 phản lực đứng khi mắt dầm chuyển vị theo phương ngang bằng lực đơn vị, có thể xác định R_0 theo biểu thức (3).

$$R_0 = \frac{1}{\delta} \tag{3}$$

Nếu xét đến hiện tượng uốn dọc biểu thức xác định δ như sau:

$$\delta = \frac{R_0 h^3}{3EI_1 \left(1 - \frac{P}{P_{Euler}}\right)} + \frac{R_0 (h + c)^2 b}{2EI_2}; \tag{4}$$

Trong đó, P là lực nén lớn nhất trong thanh đứng, $P_{Euler} = \frac{\pi^2 EI_1}{4h^2}$ là biểu thức xác định lực nén của Euler. Thay biểu thức (4) vào biểu thức (3) và được viết lại như sau:

$$R_0 = \frac{1}{\frac{h^3}{3EI_1 \left(1 - \frac{P}{P_{Euler}}\right)} + \frac{(h + c)^2 b}{2EI_2}}; \tag{5}$$

Phương trình đường đàn hồi của thanh khi mất ổn định có dạng:

$$y = \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sin \frac{k\pi z}{L}; \tag{6}$$

Áp dụng định luật bảo toàn năng lượng, phương trình xác định lực tới hạn có dạng:

$$\delta T = \delta V \quad (7)$$

Trong đó

$$\begin{aligned} \delta V &= \frac{EI}{2} \int_0^L (y'')^2 dz + \frac{\beta}{2} \int_0^L (y)^2 dz = \frac{\pi^4 EI}{4L^2} \sum_{k=1}^{\infty} k^4 a_k^2 + \frac{\beta L}{4} \sum_{k=1}^{\infty} a_k^2 \\ \delta T &= \frac{q_0}{2} \sum_{k=1}^{\infty} a_k^2 \left(\frac{k^2 \pi}{12} - \frac{L}{4} \right) - 4 \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} a_k a_m \frac{km(m^2 + k^2)}{(m^2 - k^2)^2} \end{aligned}$$

Từ điều kiện tồn tại nghiệm ta có công thức xác định lực tới hạn như sau:

$$N_{pre} = \left(\frac{q_0 L}{4} \right)_{pre} = \frac{\pi^2 EI}{\mu L^2} \quad (8)$$

Trong đó, μ là hệ số được xác định theo biểu thức (9) như sau:

$$\mu = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2 \left(\frac{\pi^2}{3} - 1 \right)}{1 + \frac{\beta L^4}{\pi^4 EI}}} \quad (9)$$

Để xác định giá trị lực tới hạn trong biểu thức (8) một chương trình Matlab đã được thiết lập và kiểm chứng sự chính xác của chương trình ở mục tiếp theo.

2.2. Kiểm chứng chương trình tính toán

Để kiểm chứng sự chính xác của chương trình Matlab đã được thiết lập, nghiên cứu tiến hành kiểm chứng lại kết quả tính toán giá trị lực tới hạn của hệ thanh biên trên chịu nén của cầu dầm thép thành hồ đã được công bố trong [13], với các thông số đầu vào sau đây: Mô đun đàn hồi của thép làm cầu $E = 1.96e10 \text{ N/cm}^2$, nhịp cầu $L = 33.5 \text{ m}$, hệ số nền mô phỏng $\beta = 1.36 \text{ N/cm}^2$, mô men quán tính của thanh biên trên chịu nén $I = 6580 \text{ cm}^4$. Kết quả thu được từ chương trình Matlab đã được thiết lập được so sánh với kết quả công bố trong [13] như thể hiện trong Bảng 1. Kết quả chỉ ra rằng, sự sai lệch giữa kết quả công bố và chương trình Matlab là 0,15%, có thể kết luận là chương trình Matlab đủ tin cậy về kết quả tính toán.

Bảng 1: Giá trị kiểm chứng giá trị lực tới hạn của thanh biên trên chịu nén

Giá trị lực tới hạn (N_{pre})		
Chương trình Matlab (kN)	Kết quả trong [13] (kN)	Sai số (%)
1.506	1.500	0,15

3. Hư hỏng kết cấu, độ tin cậy và phương pháp mô phỏng Monte Carlo

Xét một hệ kết cấu, xác suất hư hỏng trong một thời gian cố định được xác định theo mối quan hệ sau:

$$\bar{p}_f = Prob\{G(\mathbf{X}) \equiv R - S \leq 0\} = \int_{G(\mathbf{X}) \leq 0} f(\mathbf{X}) d\mathbf{X} \quad (10)$$

Trong đó, \bar{p}_f là xác suất phá hoại, R là khả năng của kết cấu (trong nghiên cứu này chính là giá trị lực tới hạn (N_{pre})), S là hiệu ứng tác động của ngoại lực lên kết cấu, $X = [X^R, X^S]$ là các véc tơ ngẫu nhiên. Phần bù của xác suất hư hỏng p_f là xác suất an toàn và được xác định $p_r = 1 - p_f$.

Mô phỏng Monte Carlo tương ứng với việc tính toán số nguyên trong phương trình (10). Tuân theo luật số lớn, công cụ ước tính Monte Carlo về xác suất phá hỏng được xác định như sau:

$$\bar{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(X_i) \quad K(X_i) = \begin{cases} f(X)/G(X) & \text{với } G(X_i) \leq 0 \\ 0 & \text{với } G(X_i) > 0 \end{cases} \quad (11)$$

Trong đó, $f(X)$ là hàm phân phối xác suất, $G(X)$ là hàm lấy mẫu quan trọng.

4. Xác suất tin cậy của hệ thanh biên trên chịu nén trong cầu dàn hờ

Xét cầu dàn thép thành hờ như trên Hình (1-2), các tham số đầu vào bao gồm giá trị và quy luật phân bố xác suất cho ở Bảng 2.

Bảng 2: Giá trị và quy luật phân bố xác suất của các biến đầu vào

	Ký hiệu	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn [14]	Phân phối xác suất
Mô đun đàn hồi của thép	E	201 Gpa	10,05 Gpa	Chuẩn
Nhịp của cầu	L	20 m	392,5 kg/m ³	Chuẩn
Hệ số quy đổi	β	0,5 m ²	3,84e-3 m ²	Chuẩn
Đường kính lớn thanh cánh*	D	0,2 m	1,5275e-06 m ⁴	Chuẩn
Đường kính nhỏ thanh cánh*	d	0,15 m	0,09 m	Chuẩn

* Thanh biên trên chịu nén là ống thép

4.1. Điều kiện an toàn

Sự an toàn của cầu dàn thép phụ thuộc rất nhiều vào điều kiện ổn định của hệ thanh biên phía trên. Vì vậy trong nghiên cứu này điều kiện an toàn của dầm cầu thép thành dàn hờ chính là xác suất tin cậy của thanh cánh trên chịu nén. Điều kiện an toàn được xác định theo biểu thức sau.

$$N_{pre} \leq N_{CR} \quad (12)$$

Trong đó, N_{pre} là giá trị tính toán của lực tới hạn, N_{CR} là giá trị lực tới hạn cho phép được xác định từ các tham số đầu vào của kết cấu.

4.2. Mô hình tất định

Mô hình tất định của giá trị lực tới hạn thanh cánh trên chịu nén của cầu dàn thép thành hờ được xây dựng bằng cách sử dụng các tham số đầu vào tất định bao gồm E, L, β, D, d . Giá trị của lực tới hạn thanh cánh trên chịu nén được xác định theo (8). Mô hình tất định có thể được viết dưới dạng một hàm như sau:

$$N_{pre}(E, L, \beta, D, d) \leq N_{CR} \quad (13)$$

4.3. Mô hình ngẫu nhiên

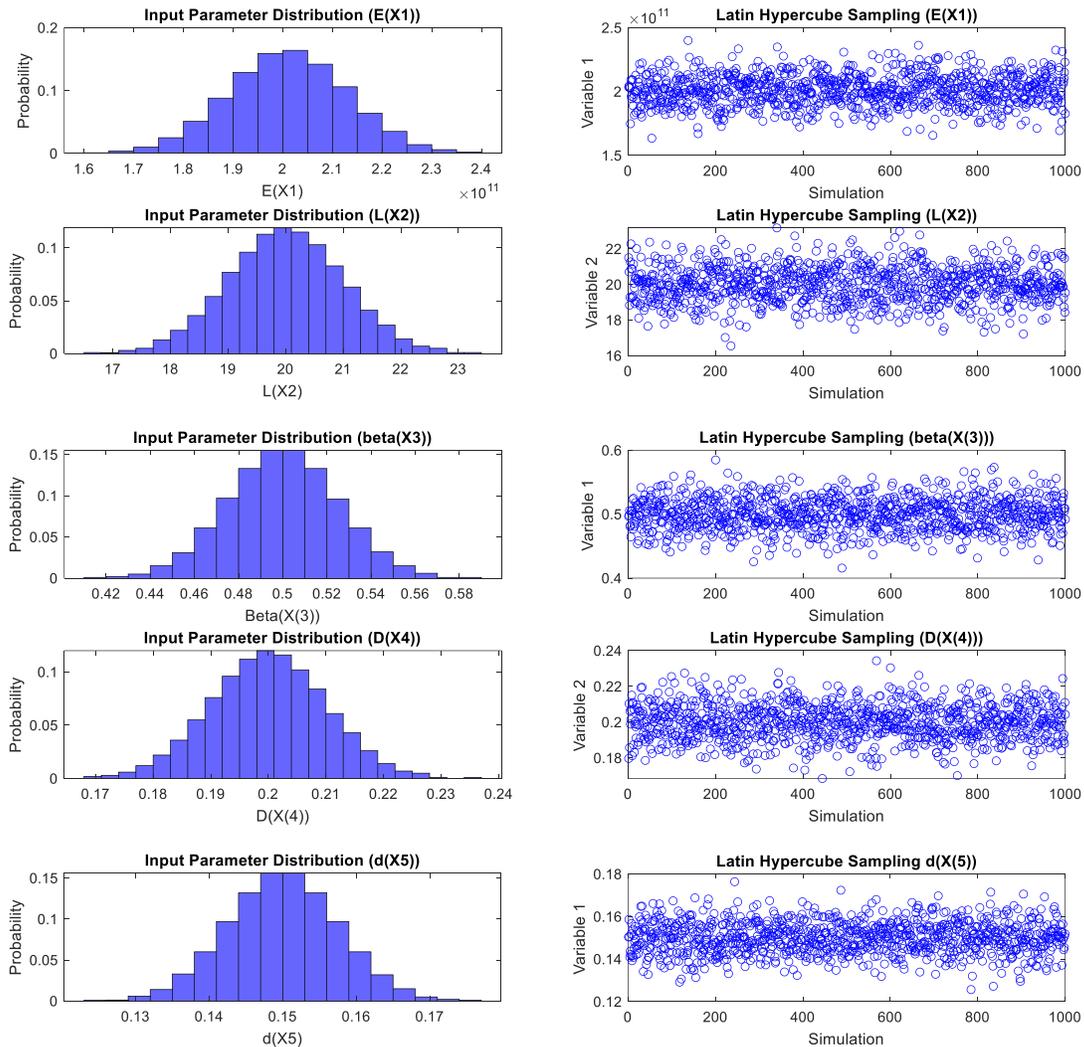
Mô hình ngẫu nhiên được phát triển dựa trên mô hình tất định khi xem xét các tham số đầu vào bao gồm E, L, β, D, d là các tham số ngẫu nhiên (ω). Mô hình ngẫu nhiên tính toán giá trị lực tới hạn thanh cánh trên chịu nén của cầu dthép thanh hờ được viết như sau:

$$N_{pre} \left(E(\omega_E), L(\omega_L), \beta(\omega_\beta), D(\omega_D), d(\omega_d) \right) \leq N_{CR} \quad (14)$$

trong đó (ω_i) là biến ngẫu nhiên.

4.4. Lấy mẫu Hypercube Latin từ các biến ngẫu nhiên đầu vào

Thực hiện LHS từ các biến đầu vào ngẫu nhiên, trong trường hợp của nghiên cứu này các mẫu Hypercube Latin được lấy từ các biến ngẫu nhiên chuẩn. Các mẫu ngẫu nhiên chuẩn được biến đổi nghịch đảo, từ đó thay đổi tỷ lệ các mẫu bình thường thành các tham số biến. Việc chuyển đổi các biến được thực hiện trên nền Matlab và được thể hiện trên Hình 3.



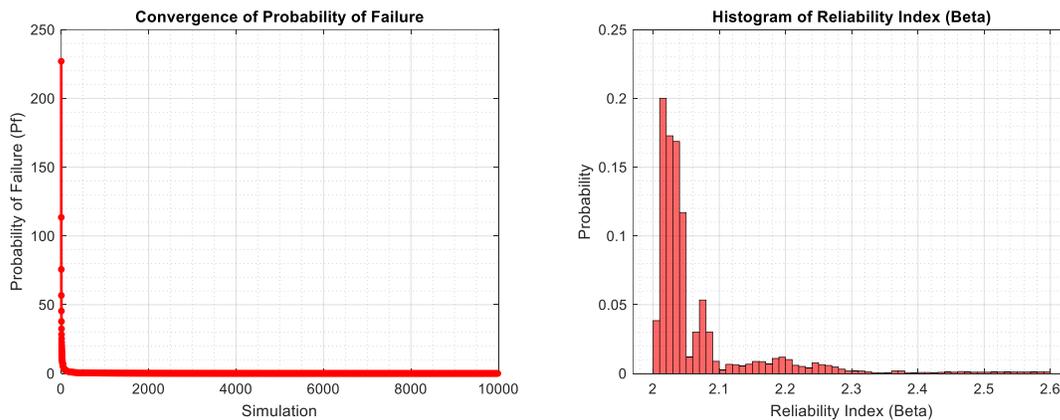
Hình 3: Mẫu Hypercube Latin của các biến ngẫu nhiên đầu vào chuẩn

4.5. Sự hội tụ của mô phỏng Monte Carlo

Để đánh giá xác suất tin cậy giá trị lực tới hạn của hệ thanh biên chịu nén cầu dầm thép thành hờ, kỹ thuật LHS được thực hiện từ các biến ngẫu nhiên đầu vào thông qua 10.000 lần MCS với giá trị hội tụ 1,5%. Kết quả thu được bao gồm xác suất phá hoại (P_f) và chỉ số độ tin cậy β được trình bày trong Bảng 3, và biểu đồ phân bố chỉ số độ tin cậy β thể hiện như trên Hình 4. Kết quả tính toán xác suất độ tin cậy theo phương pháp đề xuất LHS-MCS trong nghiên cứu này được so sánh với kết quả của phương pháp MCS truyền thống. So sánh kết quả thu được ta nhận thấy rằng kỹ thuật kết hợp LHS và MCS đánh giá xác suất tin cậy của thanh biên chịu nén cầu dầm thép thành hờ không có sự sai lệch. Ngoài ra, một điều quan trọng cần được nhấn mạnh là kỹ thuật LHS ứng dụng trong MCS chỉ cần 214 giây để phân tích, trong khi MCS cần đến 1025 giây để có được kết quả. Nói cách khác, LHS-MCS đã tiết kiệm tài nguyên máy tính hơn so với phương pháp MCS truyền thống.

Bảng 3: Xác suất an toàn và chỉ số độ tin cậy β của thanh biên trên chịu nén

	LHS-MCS	MCS
Xác suất không an toàn (P_f)	0,0224	0,0231
Chỉ số độ tin cậy (β)	2,0065	1,9935



Hình 4: Sự hội tụ của mô phỏng MCS-LHS (trái) và phân phối chỉ số độ tin cậy β (phải) sau 10.000 mô phỏng

5. Kết luận

Bài báo này đã đánh giá xác suất tin cậy của hệ thanh biên chịu nén cầu dầm thép thành hờ với các tham số đầu vào là ngẫu nhiên rời rạc bằng kỹ thuật lấy mẫu Hypercube Latin (LHS) và phương pháp mô phỏng Monte Carlo (MCS). Để đạt được kết quả của bài báo, một mô hình tất định tính toán giá trị lực tới hạn hệ thanh biên chịu nén cầu dầm thép thành hờ đã được xây dựng, từ mô hình tất định, mô hình ngẫu nhiên được sử dụng để giải thích cho tính ngẫu nhiên của các biến đầu vào. Sau đó, mô hình ngẫu nhiên được sử dụng để đánh giá xác suất độ tin cậy hệ thanh biên chịu nén cầu dầm thép thành hờ bằng kỹ thuật kết hợp LHS-MCS. Kết quả thu được từ phương pháp LHS-MCS được so sánh với phương pháp MCS truyền thống. Kết quả phân tích xác suất an toàn của giá trị lực tới hạn hệ thanh biên chịu nén cầu dầm thép thành hờ sử dụng kỹ thuật LHS ứng dụng

trong MCS chỉ cần 214 giây để phân tích, trong khi MCS cần đến 1025 giây để có được kết quả. Nói cách khác, LHS-MCS đã tiết kiệm tài nguyên máy tính hơn so với phương pháp MCS truyền thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. J. Bartko and W. T. Carpenter Jr, “On the methods and theory of reliability,” *The Journal of nervous and mental disease*, vol. 163, no. 5, pp. 307-317, 1976. DOI: 10.1097/00005053-197611000-00003
- [2] T. H. Nguyen, V. Le, X. Vu, D. K. Nguyen, “Reliability-based Design Optimization of Steel-Concrete Composite Beams Using Genetic Algorithm and Monte Carlo Simulation,” *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 12, no. 6, pp. 9766-9770, 2022. DOI: 10.48084/etasr.5366
- [3] D. D. Nguyen, T. H. Nguyen, “Reliability assessment for the critical buckling load of SDTS columns with the tubular cross-section,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 3786-3790, 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.461
- [4] D. D. Nguyen, T. H. Nguyen, “Reliability evaluation of 2D semi-rigid steel frames accounting for corrosion effects,” *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, vol. 9, no. 3, pp. 339-353, 2022.
- [5] N. L. Tran, T. H. Nguyen, “Global sensitivity of reliability for the crane runway girder,” *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 24, no. 5, pp. 1257-1266, 2023. DOI: 10.1007/s42107-022-00567-0
- [6] T. H. Nguyen and D. D. Nguyen, “Reliability assessment of steel-concrete composite beams considering metal corrosion effects,” *Advances in Civil Engineering*, 2020, pp. 1-15, 2020. DOI: 10.1155/2020/8817809
- [7] M. A. Butler, J. A. Swanson, G. A. Rassati, E. F. Dues, “High resolution modeling and modeling of connections in Pony-Truss bridges,” *Transportation Research Record*, vol. 2672, no. 41, pp. 186-195, 2018. DOI: 10.1177/0361198118792126
- [8] M. A. Butler, *Fracture Critical Analysis Procedure for Pony Truss Bridges*, University of Cincinnati, Ohio, United States, 2018.
- [9] J. A. Swanson, G. A. Rassati, E. F. Dues, *Fracture critical analysis procedures and design and retrofit approaches for pony truss bridges in Ohio*, State Job Number 135031, The Ohio Department of Transportation, Office of Statewide Planning and Research, 10/2016.
- [10] J. Cheng and H. Jin, “Reliability-based optimization of steel truss arch bridges,” *International Journal of Steel Structures*, vol. 17, pp. 1415-1425, 2017. DOI: 10.1007/s13296-017-1212-y
- [11] D. H. Kang, C. Jang, Y. S. Park, S. Y. Han, and J. H. Kim, “Fatigue reliability assessment of steel member using probabilistic stress-life method,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 4, p. 649215, 2012. DOI: 10.1155/2012/649215

- [12] M. Safari, S. H. Ghasemi, and S. A. H. S. Taghia, "Target reliability analysis of bridge piers concerning the earthquake extreme event limit state," *Engineering Structures*, vol. 245, p. 112910, 2021. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112910
- [13] T. T. Leu, *Stability structures*, Science and Technics Publisher, 2002.
- [14] B. Ellingwood, J. G. MacGregor, T. V. Galambos, and C. A. Cornell, "Probability based load criteria: load factors and load combinations," *Journal of the Structural Division*, vol. 108, no. 5, pp. 978-997, 1982. DOI: 10.1061/JSDEAG.0005959

ABSTRACT

SAFETY PROBABILITY ASSESSMENT OF COMPRESSIVE TOP CHORD OF STEEL PONY TRUSS BRIDGES USING HYPERCUBE LATIN SAMPLING AND MONTE CARLO SIMULATION

Nguyen Trong Ha¹, Tran Anh Nghia²

¹Department of Civil Engineering, Vinh University, Nghe An, Vietnam

²Department of Mathematics, School of Education, Vinh University, Nghe An, Vietnam

Received on 01/12/2023, accepted for publication on 08/12/2023

The steel pony-truss bridge is a structure commonly used in road and rail traffic. It has a simple structure, a large bearing capacity, and high economic efficiency. The safety of steel pony-truss bridges is highly dependent on the stability conditions of the top chord. This paper presents the reliability assessment of the compressive top chord of steel pony truss bridges according to stability conditions. For this purpose, a deterministic model was built from the stability conditions of the compressive top chord; then, a stochastic model was established based on the deterministic model, in which the structural geometries and material properties are random parameters. Finally, the reliability of the structure is evaluated using Hypercube Latin sampling and Monte-Carlo simulation.

Keywords: Reliability assessment; Hypercube Latin sampling; Monte Carlo simulation; steel pony truss bridge; stability of the top chord.