

NGHIÊN CỨU HIỆU QUẢ CỦA PHƯƠNG PHÁP BỀ MẶT ĐÁP ỨNG
TRONG PHÂN TÍCH ỨNG XỬ KẾT CẤUTHE EFFECTIVENESS OF RESPONSE SURFACE METHOD IN STRUCTURAL
BEHAVIOR ANALYSISĐOÀN NHƯ SƠN^{1*}, TRẦN ANH TUẤN²¹Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam²Khoa Công trình, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

*Email liên hệ: vanson.ctt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Vì là chu trình ẩn, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) thường yêu cầu thời gian tính toán lâu, gây khó khăn cho các bài toán có yêu cầu tính lặp như tính toán kết cấu theo lý thuyết độ tin cậy hay tối ưu hóa. Nghiên cứu này ứng dụng phương pháp bề mặt đáp ứng (response surface method) xây dựng hàm thay thế ở dạng tường minh giúp cho việc tính toán kết cấu được nhanh chóng và thuận tiện hơn. Nội dung của RSM sẽ được trình bày trong nghiên cứu này. Sau đó, tính hiệu quả và chính xác của phương pháp sẽ được đánh giá thông qua ba bài toán kết cấu. Kết quả thu được từ các ví dụ cho thấy RSM có thể áp dụng tốt trong bài toán phân tích ứng xử kết cấu. Hầu hết các mô hình đều cho kết quả tương đương với kết quả từ bài toán gốc, hiệu suất thấp nhất quan sát được đối với chuyển vị tại đỉnh của khung phẳng ($R^2 = 0,9897$ sử dụng đa thức bậc hai đầy đủ). Kết quả nghiên cứu tạo tiền đề cho các nghiên cứu sâu hơn cần đến các tính toán lặp nhiều lần như bài toán phân tích độ tin cậy hay thiết kế tối ưu.

Từ khóa: FEM, mô hình thay thế, phương pháp bề mặt đáp ứng.

Abstract

The finite element method (FEM) is a widely used tool for structural analysis. However, as an implicit method, FEM often demands substantial computational resources, posing challenges for iterative applications like reliability-based structural analysis and optimization. This study explores the use of the response surface method (RSM) to develop an explicit surrogate model, facilitating faster and more efficient structural computations. The principles of RSM are introduced, followed by an assessment of its effectiveness and accuracy through three structural case studies. Results from these examples demonstrate that RSM is well-suited for analyzing structural behavior, with the lowest

performance observed for the displacement at the top of a plane frame ($R^2 = 0.9897$ using a full quadratic polynomial). These findings establish a foundation for further research in iterative computations, such as reliability analysis and optimization design.

Keywords: Finite element method, surrogate model, response surface method.

1. Mở đầu

Trong tính toán các bài toán kết cấu, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) thường được sử dụng do có thể kết hợp với máy tính. Trong quá trình tính toán, hệ kết cấu được rời rạc hóa thành một số lượng hữu hạn các phần tử. Phương trình cân bằng sẽ được thiết lập cho từng phần tử, sau đó lắp ghép thành hệ phương trình thể hiện mối quan hệ giữa lực và chuyển vị cho toàn hệ kết cấu. Căn cứ vào hệ phương trình cân bằng, chuyển vị sẽ được xác định cho toàn bộ nút. Sau đó, các thành phần nội lực trong phần tử sẽ được xác định thông qua chuyển vị tại nút của các phần tử.

Rõ ràng chu trình tính toán theo FEM là chu trình ẩn vì chuyển vị và nội lực không được xác định dưới dạng tường minh. Do đó, các tính toán thường yêu cầu thời gian tính toán lâu khi số lượng phần tử lớn. Với các tính toán có yêu cầu tính toán lặp lại nhiều lần khi các tham số đầu vào thay đổi, các tính toán trực tiếp phụ thuộc vào FEM khiến cho việc mô hình mất nhiều thời gian hơn. Nhược điểm này khiến cho việc áp dụng trực tiếp FEM trong các bài toán tối ưu hay bài toán đánh giá xác suất mất an toàn bị hạn chế. Ví dụ, các bài toán tối ưu hóa thường yêu cầu từ vài trăm tới vài ngàn vòng lặp [1], hay các bài toán phân tích độ tin cậy bằng các mô phỏng Monte Carlo yêu cầu việc tính toán lặp lại từ hàng ngàn lần tới hàng triệu lần [2]-[4]. Ngoài ra, các chu trình ẩn cũng gây khó khăn trong việc tính toán theo lý thuyết độ tin cậy khi cần có những tính toán liên quan tới các phép tính đạo hàm, ví dụ phương pháp độ tin cậy bậc nhất [5].

Gần đây, một số nghiên cứu đã tập trung xây dựng các mô hình thay thế (surrogate model) nhằm giúp bài toán tối ưu hay tính toán theo lý thuyết độ tin cậy trở

nên dễ dàng và thuận tiện hơn [6], [7]. Sử dụng mô hình thay thế, các chu trình ẩn sẽ được xấp xỉ thông qua những mô hình toán học viết dưới dạng tường minh giúp cho việc tính toán trở nên dễ dàng và thuận tiện hơn. Ví dụ như các phép toán đạo hàm, vốn cần thiết trong phương pháp độ tin cậy bậc nhất, sẽ được tính toán dễ dàng hơn khi có hàm tường minh. Trong các nghiên cứu trước, các mô hình thay thế thường được xây dựng để tính toán các hệ số an toàn hay các hàm trạng thái. Tuy nhiên, trong thực tế, ứng xử của kết cấu như nội lực hay chuyển vị cũng thường được quan tâm [7]. Trong nghiên cứu này, khả năng của phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM: Response surface method) trong việc xây dựng các mô hình thay thế để tính toán các ứng xử của kết cấu sẽ được nghiên cứu.

Nội dung phương pháp bề mặt đáp ứng sẽ được trình bày cụ thể trong Mục 2. Mục 3 xem xét tính hiệu quả và tính chính xác của các hàm bề mặt đáp ứng thông qua 3 ví dụ. Các thảo luận và đánh giá cũng được đưa ra trong Mục 3. Cuối cùng, các kết luận của nghiên cứu được trình bày trong Mục 4.

2. Nội dung của phương pháp

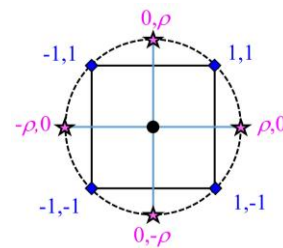
Ý tưởng chung của phương pháp bề mặt đáp ứng là xây dựng các mô hình dưới dạng tường minh nhằm thay thế các tính toán thông qua chu trình ẩn vốn phức tạp và yêu cầu nhiều thời gian cũng như công sức tính toán. Để xây dựng được mô hình thay thế, trước hết, một tập hợp các điểm đầu vào cần được thành lập, thường được gọi là thiết kế thí nghiệm mẫu. Các giá trị đầu ra tương ứng với tập mẫu thiết kế ở trên sẽ được xác định thông qua các bài toán gốc. Sau đó, mối quan hệ giữa các các điểm thí nghiệm đầu vào và đầu ra sẽ được xấp xỉ thông qua các mô hình toán học.

2.1. Phương pháp thiết kế thí nghiệm

Để xây dựng các hàm thay thế, việc thiết kế thí nghiệm là rất quan trọng. Thiết kế thí nghiệm tốt nhằm đảm bảo tính chi tiết cũng như tính tổng thể của tập mẫu nhằm giúp xây dựng hàm thay thế chính xác. Hai phương pháp thiết kế thí nghiệm thường được sử dụng là thiết kế Box-Behnken và thiết kế tâm xoay trung tâm (CCD: Central composite design) [8]. Để dễ hình dung, dưới đây trình bày cụ thể phương pháp thiết kế CCD cho hai biến. Khi số lượng biến tăng lên, thiết kế CCD được tiến hành tương tự.

Gọi μ_X là điểm trung tâm, thường lấy là giá trị kỳ vọng của các tham số, Hình 1 thể hiện thiết kế thí nghiệm theo CCD cho trường hợp 2 biến. Gọi số lượng biến là k , tập hợp các điểm mẫu thiết kế theo CCD gồm 3: $2k$ điểm góc (factorial points) ký hiệu bằng các hình thoi, 2^k điểm sao (star points) ký hiệu

bằng các ngôi sao và 1 điểm trung tâm ký hiệu bằng hình tròn đen trên Hình 1. Như vậy, tổng số lượng điểm thí nghiệm thu được theo CCD là $2k + 2^k + 1$. Với trường hợp 2 biến, tổng số mẫu thu được là 9 mẫu, như thể hiện trên Hình 1. Lưu ý rằng, điểm trung tâm thường được lấy tại các điểm kỳ vọng của các tham số. Các điểm factorial thường được lấy tại các cận trên và dưới của biến một khoảng bằng độ lệch chuẩn. Với các điểm star, hệ số ρ được tính bằng căn bậc hai của số lượng biến k (thường gọi là thiết kế tâm xoay tức là đảm bảo tính xoay được, rotatability). Tổ hợp các điểm kể trên đảm bảo phản ánh đầy đủ hiệu ứng tuyến tính, phi tuyến, và tương tác giữa các tham số đầu vào trong hàm bề mặt đáp ứng [8].



Hình 1. Thiết kế mẫu cho hai biến theo CCD.

2.2. Xây dựng hàm bề mặt đáp ứng

Dựa trên kết quả thiết kế thí nghiệm ở Mục 2.1, các ứng xử quan tâm sẽ được tính toán thông qua bài toán ban đầu. Sau đó, mối quan hệ giữa tập hợp các biến đầu vào thu được từ việc thiết kế thí nghiệm và các biến đầu ra thu được từ các tính toán từ bài toán gốc sẽ được xấp xỉ thông qua các hàm tường minh. Các hàm thu được từ việc xấp xỉ thường được gọi là hàm bề mặt đáp ứng (response surface function). Trong các bài toán kỹ thuật, hàm đa thức (thường tới bậc hai) và hàm mũ là các dạng hàm thường được áp dụng [7]. Trong nghiên cứu này hàm đa thức bậc nhất và bậc hai sẽ được sử dụng. Các phương trình (1a), (1b), và (1c) lần lượt thể hiện dạng hàm đa thức bậc nhất, bậc hai rút gọn, và bậc hai đầy đủ. Trong các phương trình (1), $y^{(l)}$, $y^{(2,r)}$, và $y^{(2,f)}$ lần lượt thể hiện các hàm bề mặt đáp ứng xác định theo các mô hình tuyến tính, đa thức bậc hai rút gọn, và đa thức bậc hai đầy đủ. α_0 , $\beta = \{\beta_i\}$, $\gamma = \{\gamma_i\}$, $\delta = \{\delta_i\}$ là các hệ số cần xác định trong quá trình xây dựng hàm bề mặt đáp ứng. Căn cứ vào tập hợp mẫu ở trên, các hệ số này sẽ được xác định bằng cách tối ưu sao cho sai số của hàm bề mặt đáp ứng là nhỏ nhất.

$$y^{(l)} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (1a)$$

$$y^{(2,r)} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \gamma_i x_i^2 \quad (1b)$$

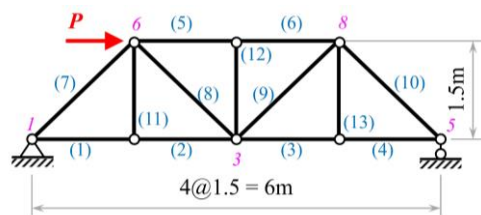
$$y^{(2,f)} = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \gamma_i x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \delta_{ij} x_i x_j \quad (1c)$$

3. Các ví dụ tính toán

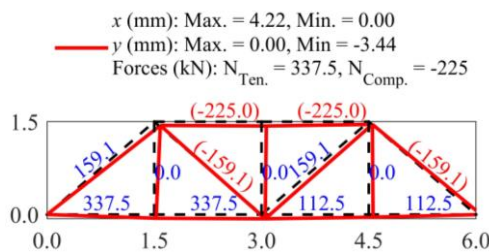
Trong mục này, nội dung phương pháp RSM trình bày trong Mục 2 sẽ được áp dụng cho ba ví dụ. Ví dụ thứ nhất xem xét bài toán kết cấu dàn phẳng tĩnh định, nội lực trong thanh dàn và chuyển vị lớn nhất của kết cấu sẽ được xem xét. Sau đó, liên kết sẽ được thêm vào để biến kết cấu dàn trở thành siêu tĩnh trong Ví dụ 2, tải trọng cũng được thêm vào để hệ kết cấu trở nên phức tạp hơn. Cuối cùng, Ví dụ 3 xét một khung phẳng siêu tĩnh chịu tải trọng phân bố đều trên dầm. Mô men và chuyển vị lớn nhất tại giữa dầm sẽ được xem xét. Để đánh giá tính chính xác của các hàm xấp xỉ xây dựng được từ RSM, tập hợp mẫu gồm các tham số đầu vào sẽ được tạo ngẫu nhiên thông qua các mô phỏng MCS. Sau đó, các tập ngẫu nhiên sẽ được đưa vào hàm xấp xỉ và hàm thực của từng bài toán. Hệ số xác định (coefficient of determination, R^2) sẽ được dùng để đánh giá sự chính xác của các hàm bề mặt đáp ứng.

3.1. Ví dụ 1 - Kết cấu dàn giản đơn

Trong ví dụ này, một kết cấu dàn Pratt trên Hình 2 được nghiên cứu. Kết cấu dàn gồm 13 thanh tiết diện tròn, diện tích $A=20\text{cm}^2$ chịu lực $P=20\text{kN}$ theo phương ngang đặt tại nút 6 ở biên trên dàn.



Hình 1. Ví dụ 1 - Kết cấu dàn tĩnh định



Hình 2. Ứng xử kết cấu dàn trong Ví dụ 1

Chương trình *FEM-Truss* xây dựng từ nghiên cứu trước [3] được sử dụng để tính toán lực dọc (N) và chuyển vị nút (x, y). Kết quả được thể hiện trên Hình 2. Hình 2 cho thấy, nội lực kéo lớn nhất xuất hiện trong thanh 1 và thanh 2, trong khi lực nén lớn nhất ở thanh 5 và thanh 6. Chuyển vị ngang lớn nhất tại nút đặt lực (x_6) và nội lực thanh 1 và 5 (N_1 và N_5) sẽ được tính toán thông qua RSM trình bày trong Mục 2.

Trong ví dụ này, hai tham số gồm diện tích thanh A và tải trọng P sẽ được coi là biến bất định với hệ số COV lần lượt là 0,05 và 0,25. Do đó, 5 điểm lấy mẫu sẽ được thực hiện khi dùng hàm xấp xỉ dạng bậc hai. Ngoài 5 điểm lấy mẫu ở trên, 4 điểm khác cần lấy thêm để xây dựng mô hình bậc hai đầy đủ.

Kết quả tính toán các hệ số của hàm bề mặt đáp ứng lần lượt được ghi lại trong Bảng 1, 2 và 3 cho lực nén, lực kéo và chuyển vị ngang lớn nhất. Sử dụng các hàm này để dự đoán cho 100,000 mẫu ngẫu nhiên tạo được từ MCS. Hình 3 so sánh các giá trị dự đoán bằng 3 mô hình với kết quả tính bằng *FEM-Truss*.

Bảng 1. Hệ số của hàm xấp xỉ cho lực nén N_5

Tham số	Bậc nhất	Bậc hai rút gọn	Bậc hai đầy đủ
α_0	1.17E-11	120	-7.24E-10
A	-1.18E-11	0	1.45E-09
P	225	0	225
A^2	-	-5.34E-12	-7.31E-10
P^2	-	105	-1.76E-12
$A \times P$	-	-	8.18E-12

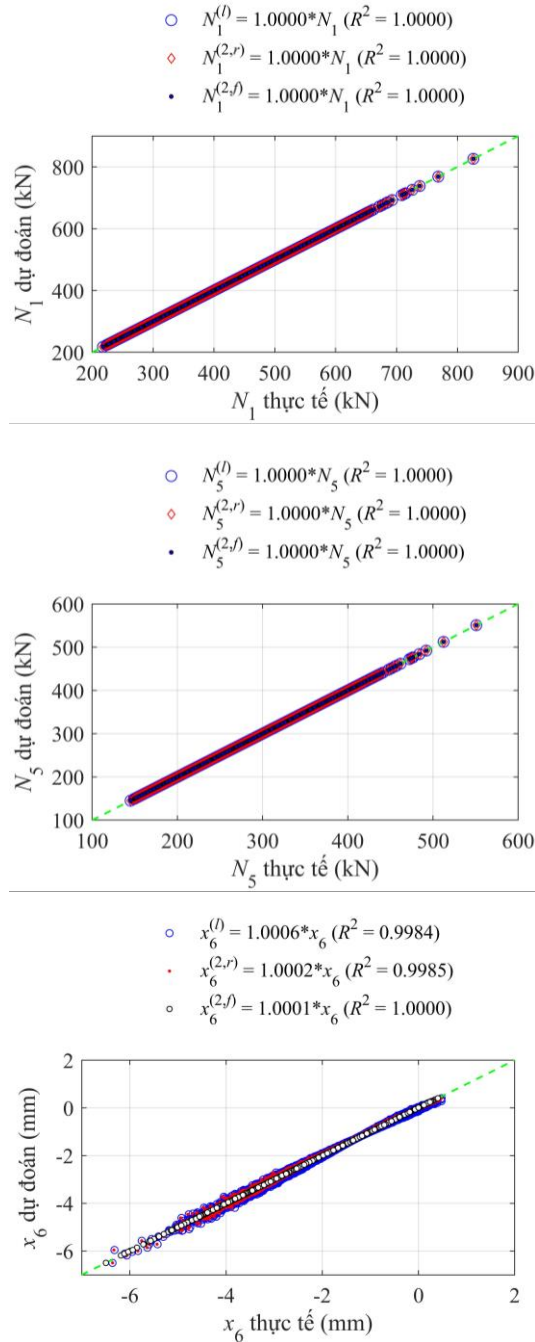
Bảng 2. Hệ số của hàm xấp xỉ cho lực kéo N_1

Tham số	Bậc nhất	Bậc hai rút gọn	Bậc hai đầy đủ
α_0	-3.03E-11	180.52	-2.97E-10
A	2.89E-11	0	6.76E-10
P	337.5	0	337.5
A^2	-	1.50E-11	-3.81E-10
P^2	-	156.98	-1.85E-12
$A \times P$	-	-	8.05E-11

Bảng 3. Hệ số của hàm xấp xỉ cho chuyển vị ngang x_6

Tham số	Bậc nhất	Bậc hai rút gọn	Bậc hai đầy đủ
α_0	-3.27	-1.71	-6.25
A	6.22	0	18.28
P	-2.96	0	-8.82
A^2	-	3.08	-9.04
P^2	-	-1.38	3.51E-04
$A \times P$	-	-	5.82

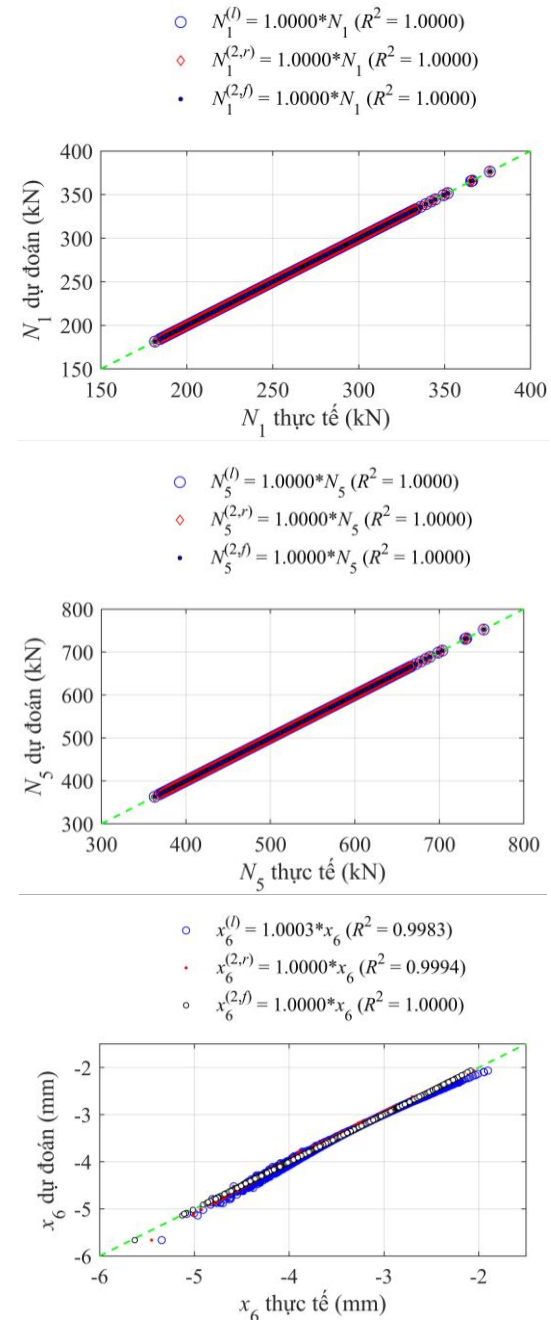
Hệ số xác định (determination coefficient R^2) thể hiện mức độ tương quan giữa hai bộ kết quả tính cũng được tổng hợp trên Hình 3. Kết quả tính toán trên Hình 3 cho thấy ba mô hình đa thức cho các nội lực N_1 và N_5 rất tương đồng với kết quả tính từ FEM. Tuy nhiên, với chuyển vị x_6 , các mô hình bậc nhất và bậc hai rút gọn cho kết quả tương đối chính xác. Tuy nhiên, mô hình đa thức bậc 2 đầy đủ cho kết quả gần như tương đồng với kết quả từ FEM (sai số 0,01%).



Hình 3. So sánh kết quả tính toán cho Ví dụ 1

3.2. Ví dụ 2 - Kết cấu dàn siêu tĩnh

Ví dụ 1 ở trên xem xét kết cấu dàn tĩnh định chịu lực theo phương ngang. Trong ví dụ này, kết cấu dàn ở trên được thêm liên kết ở gối phải để hệ trở thành hệ siêu tĩnh. Ngoài ra, một tải trọng theo phương thẳng đứng cũng được thêm vào nút 6 để tăng tính phức tạp. Các dạng hàm sẽ được khảo sát khi tính toán ứng xử của kết cấu dàn. Hình 4 trình bày kết quả dự đoán lực dọc trong thanh chịu kéo (N_1) và nén lớn nhất (N_5) cho 100,000 mẫu ngẫu nhiên.



Hình 4. So sánh kết quả tính toán cho Ví dụ 2

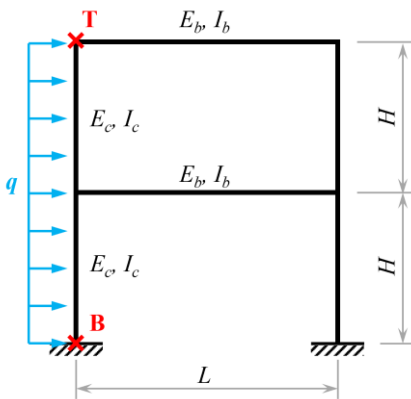
Tương tự Ví dụ 1, kết quả tính toán trên Hình 4 cho thấy ba mô hình đều cho kết quả nội lực tương đồng với FEM. Với chuyển vị x_6 , mô hình bậc hai đầy đủ vẫn cho kết quả chính xác nhất.

Từ kết quả của Ví dụ 1 và 2 có thể thấy nội lực thanh dàn hoàn toàn có thể xấp xỉ bằng mô hình bậc nhất nhưng chuyển vị nút cần phải được xấp xỉ bằng đa thức bậc 2 đầy đủ bất kể kết cấu dàn là tĩnh định hay siêu tĩnh. Điều này tương thích với lý thuyết rằng nội lực thanh dàn chỉ phụ thuộc vào tải trọng tác dụng, còn chuyển vị không chỉ phụ thuộc vào diện tích thanh hay tải trọng mà còn cả tương tác giữa các thành phần này vì vậy đa thức bậc hai rút gọn (vốn bỏ thành phần tương tác giữa các tham số) sẽ không đưa ra kết quả chính xác. Lưu ý rằng, 9 mẫu thử đủ để xây dựng mô hình đa thức bậc hai đầy đủ giúp thay thế bài toán kết cấu dàn. Từ đó, việc tính toán lặp lại hàng triệu lần cần thiết trong tính toán theo lý thuyết độ tin cậy sẽ trở nên dễ dàng và thuận tiện hơn.

3.3. Ví dụ 3 - Khung phẳng siêu tĩnh

Với kết cấu khung siêu tĩnh, nội lực và chuyển vị của khung không chỉ phụ thuộc vào tải trọng mà còn cả độ cứng của khung (độ cứng của dầm và cột). Do đó, khả năng xấp xỉ của các hàm bề mặt đáp ứng sẽ được xét xét trong mục này. Một kết cấu khung phẳng hai tầng một nhịp có liên kết ngàm tại chân cột như Hình 5 sẽ được nghiên cứu.

Các cột có tiết diện vuông cạnh 20cm còn dầm có tiết diện chữ nhật rộng 20cm và cao 30cm. Chiều cao tầng H và chiều dài nhịp L lần lượt là 3m và 5m. Tải trọng $q = 12\text{kN/m}$ phân bố đều trên toàn bộ chiều cao cột. Dầm và cột được chế tạo cùng vật liệu bê tông có mô đun đàn hồi $E = 29944\text{MPa}$. Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn, mô men lớn nhất tại chân cột trái (M_B) và chuyển vị ngang lớn nhất tại đỉnh cột x_T lần lượt tính được là tính được là 53,3kNm và 3,03cm.

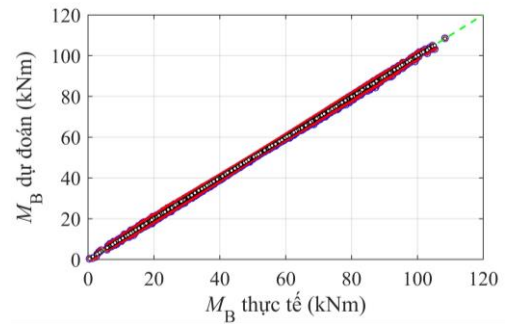


Hình 5. Ví dụ 3 - Khung phẳng siêu tĩnh

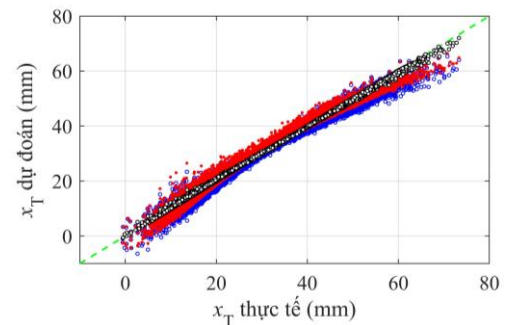
Các tham số bất định trong ví dụ này gồm có kích thước các cạnh của tiết diện dầm và cột (4 biến) tuân theo phân phối chuẩn với hệ số biến thiên là 5%, và tải trọng q cũng tuân theo phân phối chuẩn với hệ số biến thiên là 25%. Như vậy bài toán gồm 5 tham số, khi đó, số lượng mẫu cần thiết để xây dựng mô hình bậc nhất và bậc hai rút gọn là 11 mẫu, nhưng mô hình bậc hai đầy đủ cần tới 43 mẫu (thêm 25 = 32 mẫu cho các điểm sao) để xác định các hệ số. Tức là mô hình bậc hai đầy đủ yêu cầu số lượng mẫu gấp gần 4 lần so với mô hình bậc hai rút gọn. Tương tự như hai ví dụ trước, ba mô hình trong công thức (1) sẽ được sử dụng để xấp xỉ M_B và x_T .

Kết quả so sánh mô men chân cột và chuyển vị ngang ở đỉnh cột theo ba mô hình và kết quả tính theo công thức chính xác cho 100,000 mẫu thử phát sinh theo MCS được thể hiện trong Hình 6. Kết quả trên Hình 6 cho thấy, với M_B , các mô hình bậc nhất và bậc hai rút gọn đều cho kết quả chính xác. Đặc biệt, kết quả tính theo mô hình bậc hai đầy đủ cho kết quả chính xác với kết quả tính theo công thức (2).

- $M_B^{(l)} = 1.0000 * M_B$ ($R^2 = 0.9998$)
- $M_B^{(2,r)} = 1.0000 * M_B$ ($R^2 = 0.9998$)
- $M_B^{(2,f)} = 1.0000 * M_B$ ($R^2 = 1.0000$)



- $x_T^{(l)} = 0.9988 * x_T$ ($R^2 = 0.9848$)
- $x_T^{(2,r)} = 0.9988 * x_T$ ($R^2 = 0.9877$)
- $x_T^{(2,f)} = 0.9997 * x_T$ ($R^2 = 0.9897$)



Hình 6. So sánh kết quả tính toán cho Ví dụ 3

Kết quả xấp xỉ chuyển vị vai cột là kém chính xác khi sử dụng mô hình bậc nhất hoặc mô hình bậc hai rút gọn. Với mô hình bậc hai đầy đủ, kết quả dự đoán cũng tương đối chính xác khi hệ số $R^2 = 0,9897$ vì số lượng mẫu thử để xây dựng mô hình tăng lên đáng kể để kể đến tương tác giữa các biến. Kết quả khảo sát chuyển vị trong bài toán khung phẳng cho thấy mô hình bậc hai đầy đủ cần được sử dụng để đảm bảo độ tin cậy cao hơn. Với bài toán yêu cầu độ chính xác cao hơn nữa, các mô hình mới tiên tiến hơn cần được nghiên cứu để tính toán chuyển vị trong khung phẳng.

4. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày cách xây dựng các hàm thay thế dưới dạng tường minh sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng để tính toán các ứng xử trong kết cấu. Nội dung phương pháp được trình bày cụ thể và áp dụng cho ba bài toán kết cấu. Căn cứ vào những mô hình thay thế, các tính toán chuyên sâu cần nhiều vòng lặp như các tính toán theo lý thuyết độ tin cậy có thể được thực hiện dễ dàng và nhanh chóng hơn. Hay các phép tính đạo hàm cũng được thực hiện dễ dàng hơn khi có các hàm tường minh. Dưới đây là một số kết luận rút ra được từ nghiên cứu này.

Với nội lực, mô hình bậc hai đầy đủ cho kết quả chính xác nhất trong cả ba ví dụ. Tuy nhiên, việc xây dựng mô hình bậc hai đầy đủ thường yêu cầu nhiều tính toán hơn do cần tới các điểm thí nghiệm phản ánh sự tương tác giữa các tham số (điểm sao). Khảo sát trong Ví dụ 3 cho thấy số lượng mẫu cần để xây dựng mô hình bậc hai đầy đủ nhiều gấp gần 4 lần so với mô hình bậc hai rút gọn.

Việc hiểu biết về ứng xử kết cấu sẽ giúp việc đề xuất mô hình thay thế được phù hợp hơn. Ví dụ, với hai bài toán kết cấu dàn, nội lực trong thanh dàn không phụ thuộc vào các tham số độ cứng có thể xấp xỉ thông qua mô hình bậc nhất để giảm thiểu khối lượng mẫu thử. Tuy nhiên, với chuyển vị nút dàn vốn phụ thuộc vào thành phần tương tác giữa diện tích và tải trọng, các mô hình bậc hai đầy đủ sẽ cho kết quả chính xác hơn rất nhiều so với mô hình bậc hai rút gọn và mô hình bậc nhất. Kết quả tính toán chuyển vị gần như chính xác tuyệt đối cho 100,000 mẫu thử ngẫu nhiên đã được ghi nhận cho hai ví dụ đầu tiên.

Với kết cấu khung phẳng, kết quả tính toán mô men chân cột bằng ba mô hình là tương đương với phương pháp phần tử hữu hạn. Với chuyển vị đỉnh cột, mô hình bậc hai đầy đủ cần được áp dụng để đảm bảo độ chính xác. Mặc dù mô hình bậc hai đầy đủ cho kết quả tương đối tốt ($R^2 = 0,9897$), các mô hình tốt hơn cần được nghiên cứu thêm ở các nghiên cứu sau.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.95.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Vũ Hữu Trường (2023), *Nghiên cứu đánh giá thuật toán đơn đóm và phiên bản lai với PSO trong tối ưu khối lượng khung giàn thép không gian*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số. 77, tr.50-58.
- [2] Đoàn Như Sơn and Trần Anh Tuấn (2023), *Ứng dụng phương pháp ước lượng điểm phân tích độ tin cậy kết cấu dàn*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số.76, tr.44-49.
- [3] N. S. Doan (2023), *A study on the probabilistic safety assessment of the truss structure designed by the LRFD code*, J. Sci. Technol. Civ. Eng. - HUCE, Vol.17, No.1, pp.111-124, doi: 10.31814/stce.nuce2023-17(1)-09.
- [4] N. S. Doan (2024), *Reliability Analysis for Tension and Compression Designs of Steel Truss Elements Using Vietnamese Codes*, Lect. Notes Civ. Eng., Vol.460, pp.165-173, doi: 10.1007/978-981-97-0399-9_16.
- [5] A. Haldar and S. Mahadevan (2000), *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. John Wiley: Hoboken, NY, USA, 2000.
- [6] B. Echard, N. Gayton, and M. Lemaire (2011), *AK-MCS: An active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo Simulation*, *Struct. Saf.*, Vol.33, No.2, pp.145-154, 2011, doi: 10.1016/j.strusafe.2011.01.002.
- [7] N. S. Doan, V. H. Mac, and H. B. Dinh (2024), *Efficient optimization-based method for simultaneous calibration of load and resistance factors considering multiple target reliability indices*, *Probabilistic Eng. Mech.*, Vol.78, No.September, p.103695, doi: 10.1016/j.probengmech.2024.103695.
- [8] R. Myers, D. Montgomery, and C. Anderson-Cook (2009), *Response surface methodology*, 3rd ed. Wiley.

Ngày nhận bài:	29/10/2024
Ngày nhận bản sửa:	12/11/2024
Ngày duyệt đăng:	19/11/2024