



MODELING OF INTERFACIAL FAILURE IN STEEL BRIDGE DECK STRUCTURE USING LAMINATED COMPOSITE THEORY AND HOMOGENIZATION METHOD

Tran Anh Tuan^{1,3*}, Nguyen Dinh Hai^{2,3}, Tran Duc Nhiem¹

¹Section of Bridge and Tunnel Engineering, University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

²Section of Materials of Construction, University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

³Research and Application Center for Technology in Civil Engineering (RACE), University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 23/4/2020

Revised: 7/7/2020

Accepted: 1/8/2020

Published online: 28/8/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.6.3>

* *Corresponding author*

Email: anh-tuan.tran@utc.edu.vn

Abstract. The main purpose of this investigation is to propose a model for the analysis of interfacial failure by delamination in steel bridge deck structure. To achieve this objective, the steel bridge deck structure is replaced by an equivalent plate of two layers, based on the combination of homogenization method and laminated composite theory. Therein, the interfacial failure at the interface between two layers can be simulated by a cohesive zone model. This model is possible to predict crack propagation at the interface of a laminated composite material under mixed-mode loading conditions, where the corresponding mode I and II delamination fractures have been considered simultaneously. Finally, the results obtained by the proposed model are illustrated and discussed for several kinds of steel bridge deck structure.

Keywords: bridge deck, delamination, composite laminate, homogenization.



MÔ HÌNH PHÁ HUỖ TÁCH LỚP TRONG KẾT CẤU MẶT CẦU SỬ DỤNG LÝ THUYẾT VẬT LIỆU XẾP LỚP VÀ ĐỒNG NHẤT HOÁ

Trần Anh Tuấn^{1,3*}, Nguyễn Đình Hải^{2,3}, Trần Đức Nhiệm¹

¹Bộ môn Cầu hầm, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

²Bộ môn Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

³Trung tâm nghiên cứu và ứng dụng công nghệ xây dựng, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 23/4/2020

Ngày nhận bài sửa: 7/7/2020

Ngày chấp nhận đăng: 1/8/2020

Ngày xuất bản Online: 28/8/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.6.3>

* Tác giả liên hệ

Email: anh-tuan.tran@utc.edu.vn

Tóm tắt. Mục tiêu chính của nghiên cứu này là đề xuất một mô hình phân tích sự phá huỷ tách lớp trong kết cấu mặt cầu thép. Để đạt được mục đích này, kết cấu mặt cầu thép được thay thế bằng một bản hai lớp tương đương dựa trên sự kết hợp phương pháp đồng nhất hoá và lý thuyết vật liệu tổng hợp xếp lớp. Trong đó sự phá huỷ mặt tiếp xúc giữa hai lớp này có thể được mô phỏng bằng mô hình miền dính kết. Mô hình này có thể dự đoán được sự phát triển vết nứt tại mặt tiếp xúc của vật liệu xếp lớp dưới tác dụng của tổ hợp các phương thức tải trọng, mà ở đó phương thức phá huỷ I và II được xem xét một cách đồng thời. Cuối cùng các kết quả thu được từ mô hình đề xuất được minh hoạ và nhận xét cho một vài dạng kết cấu bản mặt cầu thép.

Từ khóa: Kết cấu mặt cầu, tách lớp, vật liệu xếp lớp, đồng nhất hoá.

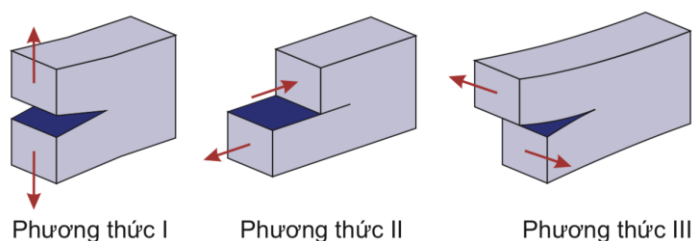
© 2020 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bản thép trực hướng là hệ thống kết cấu được sử dụng khá rộng rãi trong việc thiết kế bản mặt cầu dành cho các công trình vượt nhịp lớn như cầu giàn, cầu treo dây văng, cầu treo dây võng bởi hai lý do căn bản đó là đảm bảo khả năng chịu lực và trọng lượng bản thân nhẹ. Tuy

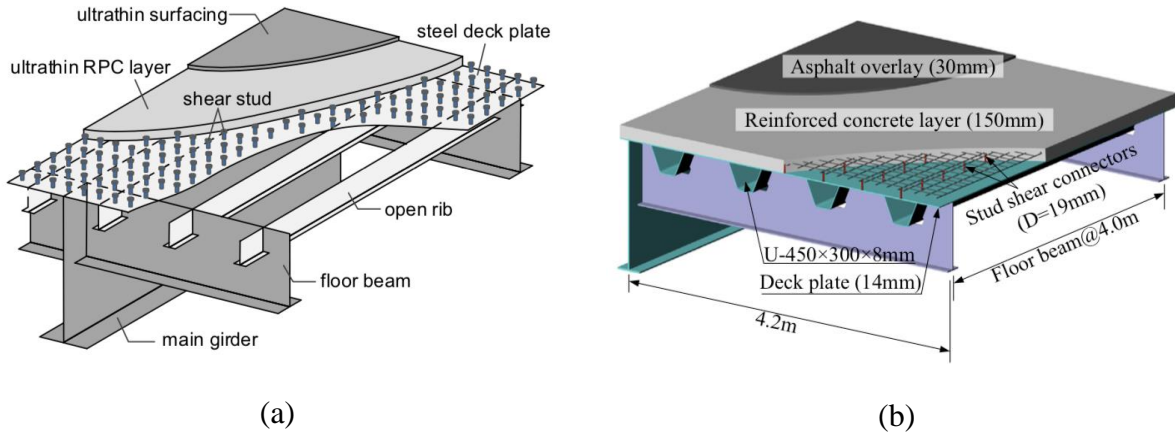
nhiên, loại mặt cầu này cũng còn tồn tại những nhược điểm nằm trong chính đặc điểm cấu tạo và trình tự thi công của nó. Một trong số đó là hư hỏng lớp phủ gây ra bởi hiện tượng bóc tách các lớp mặt cầu, sau đây gọi ngắn gọn là hiện tượng tách lớp. Quả thực, loại kết cấu mặt cầu này được thiết kế làm nhiều lớp (tối thiểu là 2 hoặc 3) và được thi công ở những thời điểm và điều kiện khác nhau, cụ thể như phần bản thép được gia công chế tạo trong công xưởng, ngược lại phần lớp mặt bằng bê tông hoặc bê tông nhựa (có thể gồm 1 hoặc nhiều lớp) được thi công ngay tại vị trí công trình. Chính những đặc điểm này đã khẳng định rằng kết cấu mặt cầu bản thép trục hướng phải được xem xét dưới dạng một kết cấu xếp lớp và hư hỏng tách lớp giữa chúng là có thể xảy ra. Biểu hiện hư hỏng lớp mặt cũng đã xuất hiện ở nhiều công trình cầu trên thế giới và Việt Nam cũng không ngoại lệ ví dụ như ở cầu Thăng Long (Hà Nội), cầu Thuận Phước (Đà Nẵng). Liên quan đến hiện tượng tách lớp, chúng ta có thể kể đến các nghiên cứu của Wolchuk [1,2], của Liu và các cộng sự [3,4]. Ở Việt Nam có nghiên cứu của Nguyễn Ngọc Long và cộng sự [5], tuy nhiên nghiên cứu này mới chỉ dừng lại ở mức độ thống kê và giải thích nguyên nhân hư hỏng.

Trên phương diện lý thuyết hiện tượng tách lớp trong vật liệu xếp lớp nói chung và trong kết cấu mặt cầu nói riêng có thể tồn tại ở các phương thức (mode) I, II hoặc III, như minh họa trên hình 1. Trong đó phương thức I phát sinh do ứng suất pháp và gây ra chuyển vị tách rời tương đối giữa hai lớp theo phương pháp tuyến, còn phương thức II hoặc III lại được phát sinh do ứng suất tiếp, nó gây ra chuyển vị trượt giữa hai lớp. Đối với bài toán tách lớp, để đơn giản nhiều nghiên cứu chỉ tập trung giải quyết hiện tượng ở một trong các phương thức nói trên (I hoặc II hoặc III). Tuy nhiên mặt cầu trong giai đoạn khai thác là dạng kết cấu chịu tải trọng phức tạp với phương và độ lớn đa dạng, chính vì vậy khi nghiên cứu về hiện tượng tách lớp trong mặt cầu thép cần xem xét kết hợp đồng thời các phương thức nói trên. Vì vai trò của phương thức II hoặc III là tương đương nên trong nghiên cứu này nhóm tác giả chỉ xem xét bài toán tách lớp với sự kết hợp của phương thức I và II.



Hình 1. Các phương thức phá huỷ tách lớp.

Kết cấu mặt cầu thép bản trục hướng truyền thống thường có cấu tạo gồm bản thép với sườn tăng cường dạng kín hoặc hở phía trên là một hoặc nhiều lớp bê tông asphalt, các lớp liên kết với nhau nhờ việc tạo nhám và sử dụng chất dính bám. Những năm gần đây, nhằm mục đích tăng cường độ cứng cũng như cải thiện tính dính bám nhiều công trình nghiên cứu và ứng dụng đã đưa vào lớp bê tông hoặc bê tông cường độ cao vào vị trí nằm giữa lớp bản thép và lớp phủ bê tông nhựa, lớp bê tông và lớp bản thép được cấu tạo dạng liên hợp nhờ hệ thống neo liên kết dạng đinh, còn lớp bê tông và lớp phủ bê tông nhựa được liên kết nhờ dính bám. Chúng ta có thể tìm thấy dạng kết cấu này trong các công bố và báo cáo của Jung và Mansperger [6], của Pan và các cộng sự [7] và của Zhang và các cộng sự [8] (cụ thể trong hình 2). Với dạng kết cấu mặt cầu này dính bám giữa bê tông và thép được coi là tuyệt đối, tuy nhiên dính bám giữa lớp bê tông và bê tông nhựa vẫn là một chủ đề được quan tâm nhiều của các nhà khoa học trong nước cũng như trên thế giới.



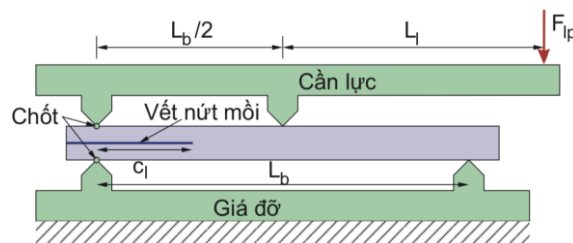
Hình 2. Hình ảnh về kết cấu mặt cầu ba lớp xuất hiện trong các nghiên cứu của: (a) Pan và các cộng sự [7], (b) Zhang và các cộng sự [8].

Trên cơ sở các phân tích nêu trên mà nghiên cứu này sẽ tập trung vào phân tích sự phá hủy dính bám (hay còn gọi là tách lớp) giữa bê tông và bê tông nhựa của loại kết cấu mặt cầu ba lớp thép – bê tông – bê tông nhựa với sự phá hủy kết hợp theo hai phương thức I và II. Để đạt được mục đích này, trước tiên lớp bản thép và lớp bê tông được thay thế bằng một lớp vật liệu tương đương nhờ phương pháp đồng nhất hoá đa cấp độ. Tiếp đó lớp phủ bê tông nhựa và lớp vật liệu đã đồng nhất được mô phỏng sự dính bám bằng mô hình miền dính kết (cohesive zone model). Cuối cùng trên cơ sở lý thuyết tách lớp của vật liệu xếp lớp chúng ta tiến hành mô phỏng và phân tích một số ví dụ với vật liệu cụ thể để thấy được sự phát triển vết nứt và ứng xử của kết cấu xếp lớp khi mất dần dính bám.

2. THIẾT LẬP BÀI TOÁN

2.1. Mô hình phân tích

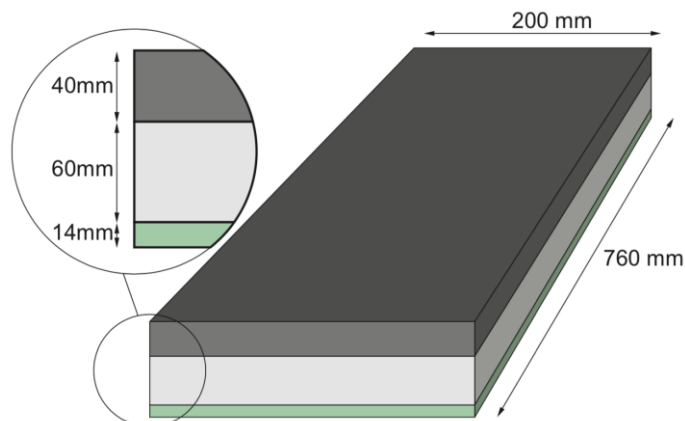
Đối với vật liệu xếp lớp thì hình thức uốn kết hợp (mixed mode bending) là một mô hình phổ biến dùng để đo sức kháng tách lớp, chúng ta có thể tìm thấy mô hình này trong các nghiên cứu của Reeder và Crews [9], Camanho và các cộng sự [10], Naghipour và các cộng sự [11], Bennati và các cộng sự [12], Bae và các cộng sự [13]. Mô hình nói trên được mô tả sơ bộ trên hình 3.



Hình 3. Mô hình uốn kết hợp đo sức kháng tách lớp.

Trong đó L_b là chiều dài mẫu (dầm), L_l là chiều dài cần tác dụng lực, được tính từ trọng tâm mẫu đến đầu tự do tại điểm đặt lực, c_l là chiều dài tính toán vết nứt môi, F_{lp} là lực tác dụng tại đầu cần. Trên cơ sở mô hình này nhóm nghiên cứu đề xuất mẫu mô phỏng đại diện dành cho kết cấu mặt cầu thép ba lớp thép – bê tông – bê tông nhựa với các kích thước cơ bản như hình

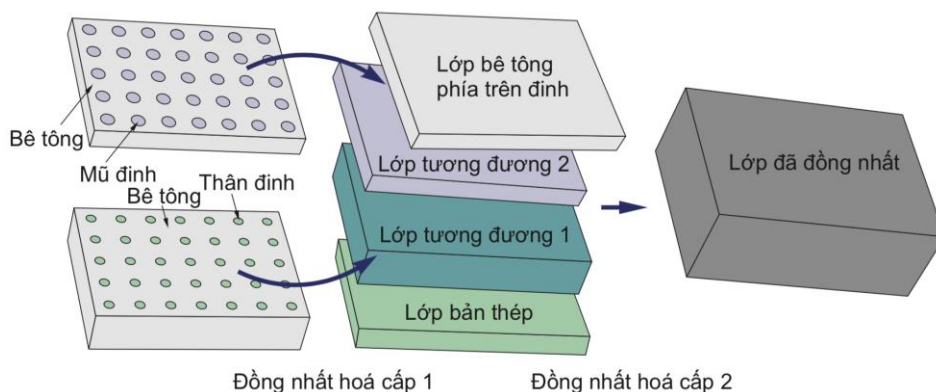
vẽ dưới đây, trong đó lớp thép – bê tông cùng hệ thống neo liên kết sẽ được thay thế bằng một lớp vật liệu tương đương nhờ phương pháp đồng nhất hoá đa cấp độ.



Hình 4. Kích thước đề xuất cho mẫu mô phỏng đại diện cho phân tích sức kháng tách lớp.

2.2. Đồng nhất hoá lớp thép – bê tông

Như đã trình bày trong phần đặt vấn đề, bước đầu tiên trong việc giải bài toán đề ra là đồng nhất hoá lớp thép và lớp bê tông tính năng siêu cao trong đó có kể đến hệ thống neo đỉnh liên kết thành một lớp vật liệu tương đương, trình tự đồng nhất được mô tả trong hình 5.

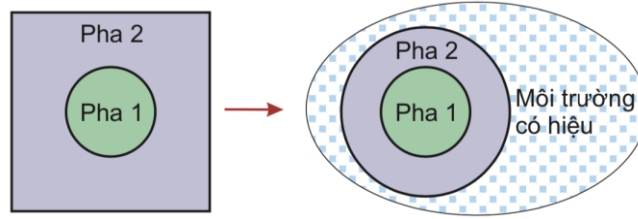


Hình 5. Các bước đồng nhất hoá.

Để có được tính chất có hiệu của lớp thép – bê tông này ta phải thực hiện hai giai đoạn đồng nhất hoá cụ thể như sau:

Giai đoạn 1 – Cấp độ meso: ở cấp độ này ta tiến hành đồng nhất hoá miền vật liệu có bê tông và vị trí thân đỉnh thép cũng như vị trí mũ đỉnh. Trong từng mặt cắt vuông góc với phương của đỉnh ta nhận được vật liệu có phân bố tuần hoàn với các pha hạt là thép được bố trí tuần hoàn trong pha nền là bê tông. Để đồng nhất hoá vật liệu này ta sẽ áp dụng phương pháp Tự tương hợp tổng quát được đề xuất bởi Hashin [14], sau đó phát triển bởi Hashin và Rosen [15] và cuối cùng được hoàn thiện bởi Christensen and Lo [16].

Với mô hình này mỗi nhân tuần hoàn của vật liệu được minh họa trên hình 6 (bên trái) được thay thế bởi hai hình tròn lồng nhau với đường kính của pha 2 tính được sao cho tỷ lệ diện tích hai pha ở hai cấu hình là không đổi. Hai hình tròn lồng nhau này được nhúng trong môi trường đã đồng nhất hoá của 2 vật liệu như biểu diễn trên hình 6 (bên phải).



Hình 6. Mô hình tự tương hợp tổng quát.

Áp một trường chuyển vị lên biên của lớp tương đương W

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{E} \cdot \mathbf{x}, \quad \mathbf{x} \in \omega \quad (1)$$

tại mỗi nhân tuần hoàn U sẽ chịu một biến dạng

$$u_i = E_{i1}x_1 + E_{i2}x_2 + E_{i3}x_3 + j_{ijk}E_{jk}. \quad (2)$$

Với các chỉ số i, j, k chạy từ 1 đến 3 ứng với 3 chiều của không gian. Tensor bậc ba j_{ijk} là tensor định vị đại diện cho tính chất tuần hoàn của vật liệu. Vector chuyển vị liên hệ với tensor biến dạng thông qua công thức

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{u}(\mathbf{x}) + \nabla^T \mathbf{u}(\mathbf{x})]. \quad (3)$$

Quan hệ ứng suất biến dạng được miêu tả bởi định luật Hooke tổng quát:

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}) = \mathbb{L}(\mathbf{x}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}), \quad (4)$$

với $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}), \mathbb{L}(\mathbf{x}), \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x})$ lần lượt là tensor ứng suất, tensor đàn hồi và tensor biến dạng vi mô ở tạo độ \mathbf{x} . Để xác định được các tensor này thì cần phải xác định được tensor định vị bậc ba j_{ijk} . Tensor này sẽ được xác định thông qua các phương trình liên tục tại biên $r = r_i$ giữa pha nền và pha cốt của tensor ứng suất $\boldsymbol{\sigma}$ theo phương pháp tuyến \mathbf{n} và vector chuyển vị \mathbf{u} như sau

$$\llbracket \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} \rrbracket = \mathbf{0}, \quad \llbracket \mathbf{u} \rrbracket = \mathbf{0}, \quad \mathbf{x} \in \Gamma \quad (5)$$

và phương trình cân bằng năng lượng (khi nhúng pha hạt giả định là hai hình tròn lồng nhau vào trong môi trường đồng nhất của chính nó thì năng lượng trước và sau khi nhúng là không đổi)

$$W_0 - W = \frac{1}{2} \int_{\Gamma} (\sigma_{ij}^0 n_j u_i - \sigma_{ij} n_j u_i^0) dS, \quad (6)$$

với G là biên giữa pha hạt giả định và pha đã đồng nhất, W_0 là năng lượng ban đầu của hệ, W là năng lượng sau khi nhúng pha hạt giả định, $\boldsymbol{\sigma}^0, \mathbf{u}^0, \boldsymbol{\sigma}, \mathbf{u}$ lần lượt là trường ứng suất, chuyển vị ban đầu và sau khi có mặt của pha hạt giả định.

Lần lượt áp các điều kiện về chuyển vị:

- Chịu tải thủy tĩnh trong mặt phẳng $\mathbf{u}(\mathbf{x}) = x_1 \mathbf{e}_1 + x_2 \mathbf{e}_2, \quad \mathbf{x} \in \hat{\Gamma} \cap W$

- Kéo theo dọc trục $\mathbf{u}(\mathbf{x}) = x_3 \mathbf{e}_3, \quad \mathbf{x} \in \partial\omega$
- Cắt dọc không phẳng $\mathbf{u}(\mathbf{x}) = x_3 \mathbf{e}_1 + x_1 \mathbf{e}_3, \quad \mathbf{x} \in \partial\omega$
- Cắt ngang không phẳng $\mathbf{u}(\mathbf{x}) = x_2 \mathbf{e}_1 + x_1 \mathbf{e}_2, \quad \mathbf{x} \in \partial\omega$

vào các phương trình từ (2) đến (6) cho phép xác định vector chuyển vị tại mỗi pha của vật liệu. Từ đó ta xác định được trường biến dạng và ứng suất cục bộ tại mỗi điểm trong vật liệu. Vậy ở cấp độ Meso ta có thể xác định được ứng suất và biến dạng của miền tương đương

$$\Sigma^{equi} = \frac{1}{2|\omega|} \int_{\partial\omega} (\boldsymbol{\sigma}\mathbf{n}) \otimes^s \mathbf{x} d\mathbf{x}, \quad \mathbf{E}^{equi} = \frac{1}{2|\omega|} \int_{\partial\omega} \mathbf{u} \otimes^s \mathbf{x} d\mathbf{x} \quad (7)$$

Tensor hệ số đàn hồi của miền tương đương nhận được như sau

$$\mathbb{L}^{equi} = \frac{\partial \Sigma^{equi}}{\partial \mathbf{E}^{equi}} \quad (8)$$

Phương pháp Tự tương hợp tổng quát được áp dụng để xác định được tensor đàn hồi tương đương của các lớp tương đương 1 và 2. Các tính toán đã chỉ ra rằng khi vật liệu thép và bê tông đều là đàn hồi và đẳng hướng với các đỉnh thép được xếp theo phương vuông góc với phương xếp lớp thì vật liệu đồng nhất tương đương sẽ có ứng xử là bất đẳng hướng ngang theo phương xếp lớp.

Giai đoạn 2 – Cấp độ Macro: Sau khi vùng bê tông giao thân đỉnh và mũ đỉnh lần lượt được đồng nhất hoá thành lớp tương đương 1 và lớp tương đương 2 với tensor đàn hồi tương ứng là $\mathbb{L}^{(equi1)}, \mathbb{L}^{(equi2)}$. Vật liệu quan tâm của chúng ta trở thành vật liệu xếp lớp với 4 lớp xếp chồng lên nhau như hình 5, trong đó lớp bê tông và thép là đàn hồi đẳng hướng có tensor đàn hồi lần lượt là $\mathbb{L}^{(steel)}, \mathbb{L}^{(con)}$. Để đồng nhất hoá vật liệu này nghiên cứu sử dụng phép đồng nhất hoá vật liệu đa lớp cổ điển đã được trình bày ở công bố [17], ta nhận được tensor đàn hồi đồng nhất của vật liệu 4 lớp thông qua một số bước tính cơ bản, tensor này biểu diễn theo quy ước Kelvin như sau:

$$\mathbb{L} = \begin{bmatrix} L_{1111} & L_{1122} & L_{1133} & \sqrt{2}L_{3323} & \sqrt{2}L_{3313} & \sqrt{2}L_{3312} \\ L_{2211} & L_{2222} & L_{2233} & \sqrt{2}L_{2223} & \sqrt{2}L_{2213} & \sqrt{2}L_{2212} \\ L_{3311} & L_{3322} & L_{3333} & \sqrt{2}L_{3323} & \sqrt{2}L_{3313} & \sqrt{2}L_{3312} \\ \sqrt{2}L_{2311} & \sqrt{2}L_{2322} & \sqrt{2}L_{2333} & 2L_{2323} & 2L_{2313} & 2L_{2312} \\ \sqrt{2}L_{1311} & \sqrt{2}L_{1322} & \sqrt{2}L_{1333} & 2L_{1323} & 2L_{1313} & 2L_{1312} \\ \sqrt{2}L_{1211} & \sqrt{2}L_{1222} & \sqrt{2}L_{1233} & 2L_{1223} & 2L_{1213} & 2L_{1212} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Khi phương xếp lớp $\mathbf{n} \circ \mathbf{e}_3$, để thuận tiện cho việc tính toán ta tiến hành tách ma trận (9) thành bốn ma trận con biểu diễn như sau:

$$\mathbf{C}_{11} = \begin{bmatrix} L_{1111} & L_{1122} & \sqrt{2}L_{1112} \\ L_{1122} & L_{2222} & \sqrt{2}L_{2212} \\ \sqrt{2}L_{1112} & \sqrt{2}L_{2212} & 2L_{1212} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{33} = \begin{bmatrix} L_{3333} & \sqrt{2}L_{3332} & \sqrt{2}L_{3331} \\ \sqrt{2}L_{3332} & 2L_{3232} & 2L_{3231} \\ \sqrt{2}L_{3331} & 2L_{3231} & 2L_{3131} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{C}_{31} = \mathbf{C}_{13}^T = \begin{bmatrix} L_{3311} & L_{3322} & \sqrt{2}L_{3312} \\ \sqrt{2}L_{1132} & 2L_{2232} & 2L_{1232} \\ \sqrt{2}L_{1131} & 2L_{2231} & 2L_{1231} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

Tuân theo một số biến đổi cơ bản trong cơ học vi mô, công bố [18] đã xác định được tensor hệ số đàn hồi hiệu quả của vật liệu đa lớp như sau:

$$\mathbf{C}_{33}^* = \langle \mathbf{C}_{33}^{-1} \rangle^{-1}, \quad \mathbf{C}_{31}^* = \langle \mathbf{C}_{33}^{-1} \rangle^{-1} \langle \mathbf{C}_{33}^{-1} \mathbf{C}_{31} \rangle, \quad (12)$$

$$\mathbf{C}_{11}^* = \langle \mathbf{C}_{11} - \mathbf{C}_{13} \mathbf{C}_{33}^{-1} \mathbf{C}_{31} \rangle + \langle \mathbf{C}_{13} \mathbf{C}_{11}^{-1} \rangle \langle \mathbf{C}_{33}^{-1} \rangle^{-1} \langle \mathbf{C}_{33}^{-1} \mathbf{C}_{31} \rangle, \quad (13)$$

với $\langle \cdot \rangle$ là phép lấy trung bình theo thể tích, biểu diễn của nó như sau

$$\langle \cdot \rangle = f_1 \int_{W^{(1)}} \langle \cdot \rangle dW^{(1)} + f_2 \int_{W^{(2)}} \langle \cdot \rangle dW^{(2)} + f_3 \int_{W^{(3)}} \langle \cdot \rangle dW^{(3)} + f_4 \int_{W^{(4)}} \langle \cdot \rangle dW^{(4)}. \quad (14)$$

Ở đây f_1, f_2, f_3, f_4 lần lượt tỷ lệ thể tích của lớp thép, lớp tương đương 1, lớp tương đương 2, và lớp bê tông cường độ siêu cao. Áp các kết quả xác định được bởi các biểu thức (12), (13) vào phương trình (9) ta thu được tensor đàn hồi có hiệu của vật liệu xếp lớp $\mathbb{L}^{(eff)}$.

2.3. Mô phỏng phá hủy tách lớp

Sau khi đã thực hiện đồng nhất hoá, kết cấu vật liệu mặt cầu ba lớp ban đầu trở thành kết cấu hai lớp. Việc mô phỏng sự phá hủy tách lớp được thực hiện bằng phần mềm ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn, trong đó sự phát triển vết nứt tách lớp được mô phỏng bằng mô đun miền dính kết (cohesive zone model) với các thông số được lấy gần đúng theo vật liệu yếu nhất trong kết cấu mặt cầu là bê tông nhựa. Thông số vật liệu cho mô hình miền dính kết được thể hiện trong bảng dưới đây.

Bảng 1. Thông số vật liệu cho mô phỏng miền dính kết.

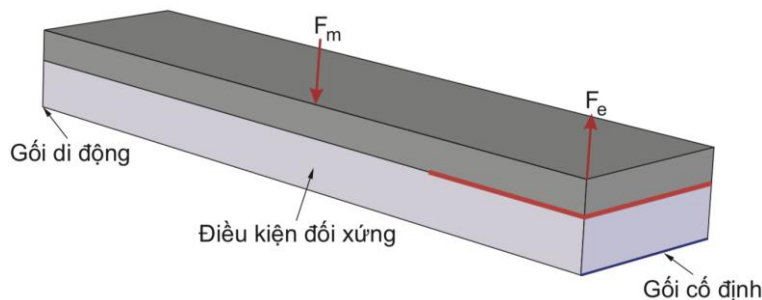
Đại lượng	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Sức kháng kéo	N_s	3.45	MPa
Sức kháng cắt	S_s	4.25	MPa
Độ cứng giới hạn	K_p	3.85	N/mm ³
Năng lượng giải phóng theo Mode I	G_{Ic}	2	kJ/m ²
Năng lượng giải phóng theo Mode II	G_{IIc}	2.25	kJ/m ²

Ở đây, do tính đối xứng của bài toán xem xét chúng ta chỉ tiến hành mô phỏng một nửa kết cấu. Các điều kiện biên của bài toán được trình bày như hình 7, trong đó lực F_{lp} được thay thế bằng hai lực tương đương F_e và F_m với mối liên hệ sau:

$$F_{lb} = F_e \frac{L_b}{2L_l}, \quad F_m = -wF_e, \quad (15)$$

trong đó L_l, w được xác định tùy thuộc vào tỷ lệ phối hợp K giữa hai phương thức II và I thông qua biểu thức sau

$$L_l = \frac{\frac{L_b}{4} \sqrt{\frac{3(1-k)}{k}} + \frac{L_b}{2}}{3 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3(1-k)}{k}}}, \quad w = 8 \frac{6k + \sqrt{3k(1-k)}}{3 + 9k + 8\sqrt{3(1-k)}}. \quad (16)$$



Hình 7. Điều kiện biên áp vào mô hình.

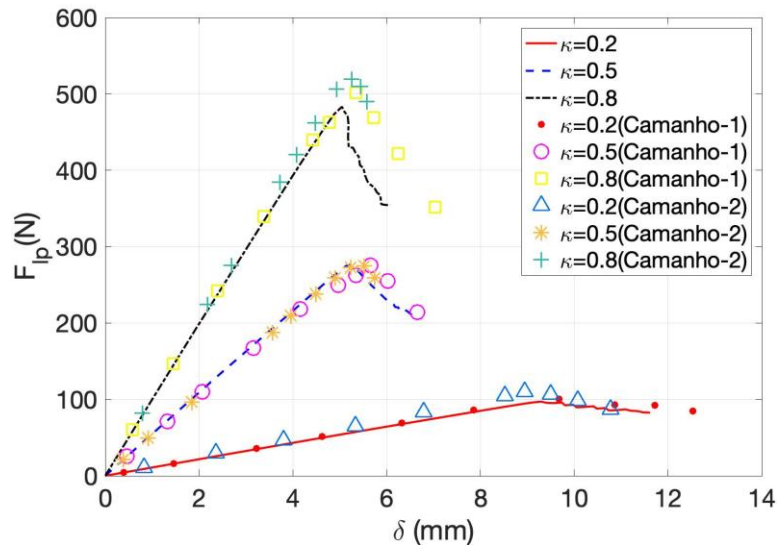
3. KẾT QUẢ SỐ

3.1. Kiểm chứng mô hình với bài toán vật liệu xếp lớp đã có lời giải

Mô hình phân tích và tính toán nói trên là mô hình lý thuyết, nó giải quyết bài toán kết cấu và vật liệu trong giới hạn đàn hồi, trong đó thông số đầu vào là kích thước kết cấu và đặc tính vật liệu có thể thay đổi tùy ý. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu đề xuất áp dụng mô hình nói cho kết cấu mặt cầu có cấu tạo dạng vật liệu xếp lớp như đã nói ở phần đặt vấn đề. Vì vậy trước khi áp dụng cho kết cấu mặt cầu chúng ta tiến hành kiểm chứng tính đúng đắn và tin cậy của mô hình với các kết quả đã được công bố cho vật liệu xếp lớp. Trong tiểu mục này chúng ta sẽ áp dụng mô hình cho bài toán được giải bởi Camanho và các cộng sự [10]. Các thông số về đặc tính vật liệu và kích thước mẫu kết cấu được trình bày chi tiết trong công bố của Camanho và các cộng sự [10].

Ở đây chúng ta sẽ kiểm chứng đường cong quan hệ lực và chuyển vị ứng với một vài giá trị $k = [0.2; 0.5; 0.8]$ được biểu diễn trong công bố của Camanho và các cộng sự [10] với kết quả tính toán bằng mô hình đề xuất. Hình 8 dưới đây là biểu đồ so sánh giữa kết quả (mô phỏng và thực nghiệm) của Camanho và các cộng sự với kết quả khi nhóm nghiên cứu phân

tích bằng mô hình đã đề xuất. Trong đó các đường liên tục (nét liền, nét đứt, nét chấm gạch) là kết quả phân tích bằng mô hình đề xuất của nhóm tác giả, các biểu tượng (chấm, tròn, vuông) là kết quả số của Camanho-1, các biểu tượng (tam giác, hoa thị, chữ thập) là kết quả thực nghiệm của Camanho-2.



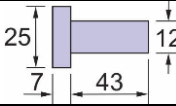
Hình 8. Đường cong quan hệ lực và chuyển vị khi so sánh với công bố của Camanho và các cộng sự.

Quan sát trên hình 8 chúng ta nhận thấy rằng kết quả tính toán bằng mô hình đề xuất trong bài báo này và kết quả thu được từ thực nghiệm và mô phỏng của Camanho là tương đồng và phù hợp, một vài vị trí có sự sai lệch nhất định nhưng điều đó có thể chấp nhận được bởi lý do kết quả mô phỏng số và thực nghiệm không thể trùng khớp một cách tuyệt đối. Chúng ta lưu ý rằng mô hình đề xuất được xây dựng để giải quyết bài toán nứt tách lớp của môi trường vật liệu đàn hồi tuyến tính, nên một khi đã kiểm chứng được độ tin cậy của mô hình chúng ta có thể áp dụng nó cho việc phân tích các trường hợp đặc tính vật liệu và kích thước kết cấu khác nhau, hay nói cách khác là áp dụng cho các trường hợp với thông số đầu vào khác nhau. Đây chính là mục đích hướng đến của nghiên cứu này nhằm áp dụng mô hình đề xuất khi xem xét bài toán mặt cầu thép như một kết cấu vật liệu xếp lớp.

3.2. Áp dụng mô hình cho mặt cầu thép – bê tông cường độ siêu cao – bê tông nhựa

Trong phần này chúng ta sẽ trình bày một số kết quả thu được khi thực hiện phân tích hiện tượng tách lớp phủ bê tông nhựa trong mô hình kết cấu mặt cầu, để thực hiện được việc đó trước tiên chúng ta tiến hành đồng nhất hoá lớp thép và lớp bê tông cường độ siêu cao có kể đến việc bố trí đỉnh neo, phương pháp thực hiện đã được miêu tả cụ thể trong tiểu mục 2.2 với các thông số vật liệu được thống kê trong bảng 2. Trong đó đỉnh neo được bố trí dạng lưới ô vuông khoảng cách là 150 mm, hình dạng và kích thước đỉnh cũng được thể hiện đồng thời trong bảng 2.

Bảng 2. Thông số vật liệu cần thiết dành cho đồng nhất hoá.

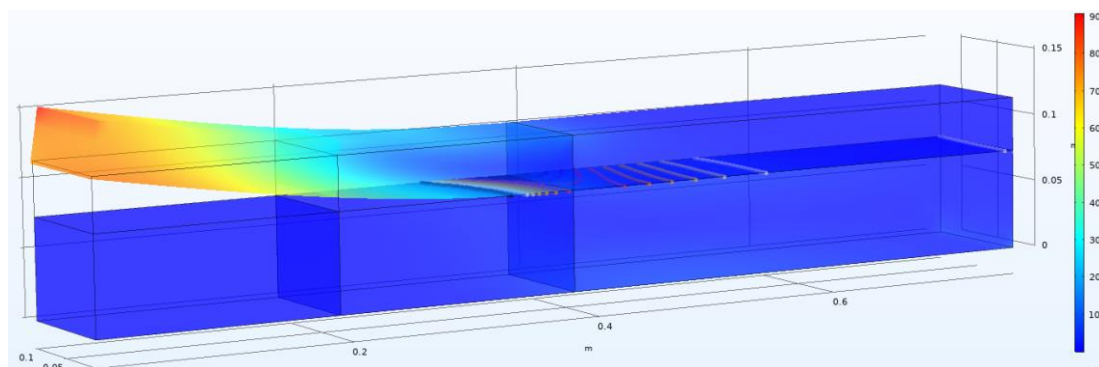
Loại vật liệu	Mô đun đàn hồi (E)	Hệ số Poisson (ν)	Trọng lượng riêng (ρ)
Thép	200 GPa	0.3	7850 kg/m ³
Bê tông cường độ siêu cao	40.6 GPa	0.2	2400 kg/m ³
Kích thước đỉnh neo		Bước đỉnh	150 ´ 150

Sau bước đồng nhất hoá chúng ta thu được lớp vật liệu tương đương (là loại vật liệu bất đẳng hướng có các tính chất đặc trưng được thống kê trong bảng 3, lớp này sẽ được đưa vào mô phỏng tách lớp cùng với lớp bê tông nhựa như một kết cấu hai lớp.

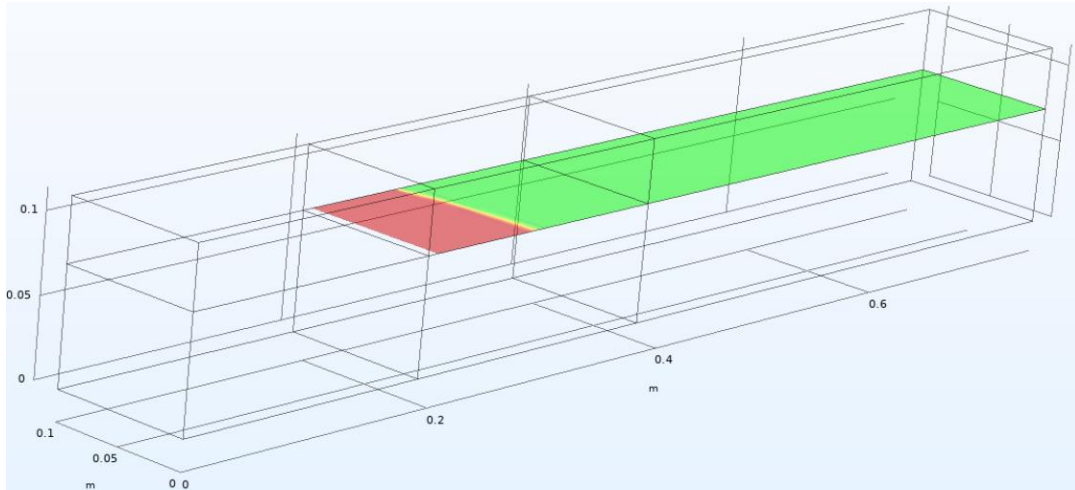
Bảng 3. Thông số vật liệu dành cho mô phỏng tách lớp.

Loại vật liệu	Mô đun đàn hồi (E)	Hệ số Poisson (ν)	Mô đun cắt (G)	Trọng lượng riêng (ρ)
Lớp vật liệu sau đồng nhất hoá	$E_1=71.6907$ Gpa	$\nu_1=0.2705$	$G_1=56.4633$ Gpa	3467.2 kg/m ³
	$E_2=71.6907$ Gpa	$\nu_2=0.2227$	$G_2=39.5653$ Gpa	
	$E_3=51.1974$ Gpa	$\nu_3=0.2227$	$G_3=39.5653$ Gpa	
Bê tông nhựa E	5 GPa	0.35		2695 kg/m ³

Hình 9 dưới đây biểu diễn trực quan hình ảnh tách lớp của mô hình xem xét sau khi kết thúc tính toán (quan sát được chuyển vị và ứng suất), trong đó các vùng phân bố ứng suất lớn được biểu biểu hiện bằng màu đỏ và cam, vùng màu xanh là ứng suất nhỏ hơn. Hình 10 cho chúng ta thấy rằng ở bước cuối cùng của quá trình tính toán khu vực đã bị nứt tách lớp được biểu diễn bằng màu đỏ và miền còn giữ được sự dính bám giữa hai lớp bê tông và bê tông nhựa được thể hiện bằng màu xanh lá, phần tiếp giáp giữa hai miền này là khu vực chuẩn sẽ bị phá huỷ nếu tiếp tục tăng lực.

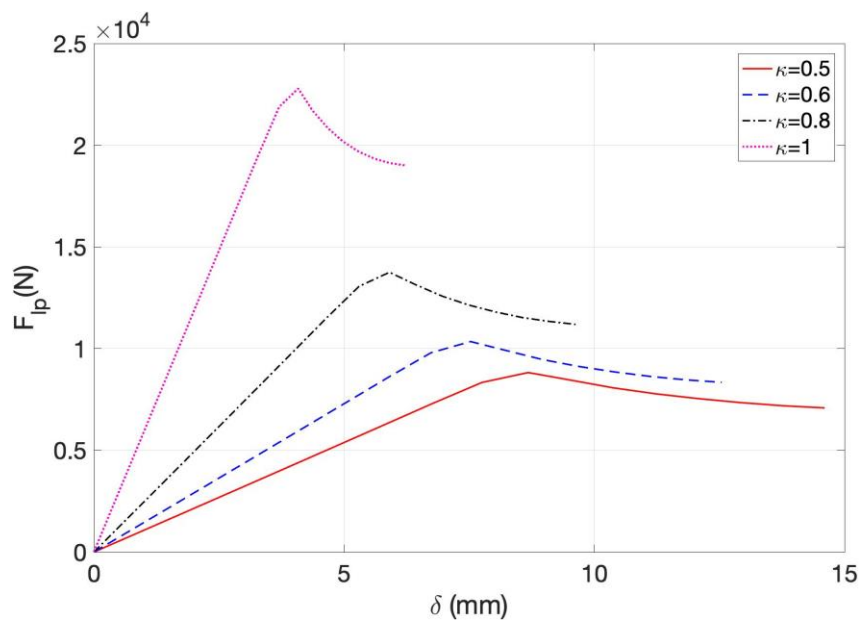


Hình 9. Kết quả tổng quan thu được khi kết cấu bị tách lớp kết hợp hai phương thức.



Hình 10. Biểu diễn miền còn dính bám và miền đã tách lớp.

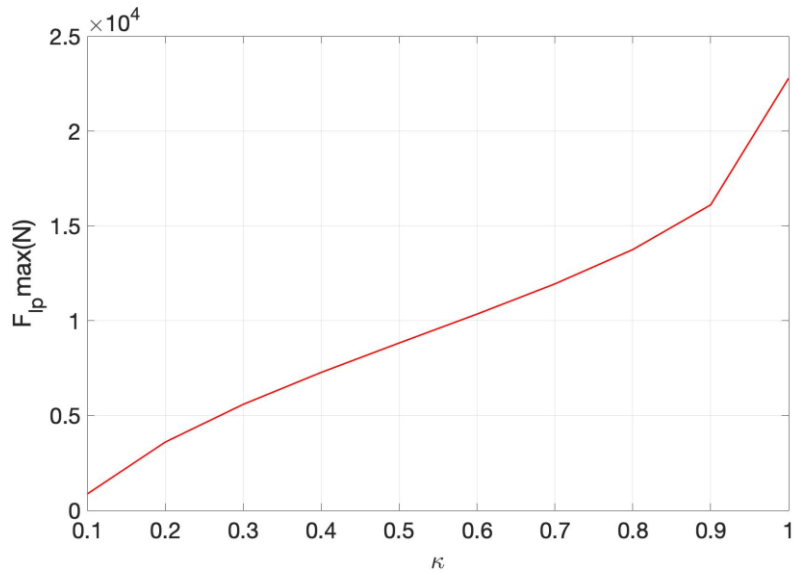
Trên hình 11 chúng ta biểu diễn sự biến thiên của lực F_{lp} và chuyển vị tại vị trí đặt lực tương ứng với giá trị $K = [0.5; 0.6; 0.8; 1]$, từ biểu đồ chúng ta nhận thấy rằng tất cả các đường đều có chung một đặc điểm đó là tải trọng có xu hướng tăng tuyến tính khi chuyển vị của điểm đặt lực tăng, đến khi lực đạt giá trị cực đại thì vết nứt xuất hiện và phát triển. Trong quá trình vết nứt phát triển lực sẽ gây ra bóc tách giảm dần do toàn bộ kết cấu đã bị mất một phần sức kháng.



Hình 11. Đường cong quan hệ lực và chuyển vị.

Hình 12 biểu diễn sự biến thiên của giá trị tải trọng phá hoại F_{lp} max theo tỷ số kết hợp K giữa hai phương thức tách lớp II và I. Chúng ta nhận thấy khi K tăng (có nghĩa là phương thức phá hoại II dần chiếm ưu thế hơn) thì giá trị F_{lp} max cũng tăng theo điều đó khẳng định phá hoại tách lớp theo hình thức trượt (phương thức II) khó xảy ra hơn so với tách lớp theo

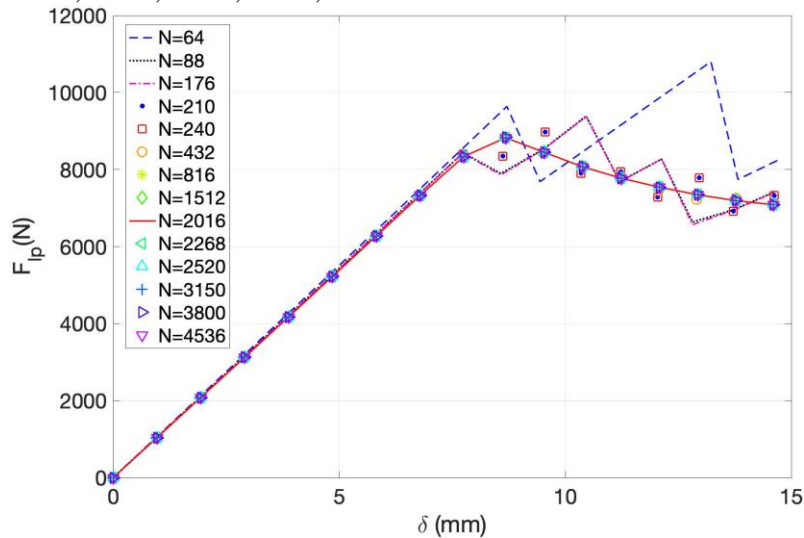
hình thức bóc (phương thức I).



Hình 12. Đường cong quan hệ lực và tỷ số K giữa hai phương thức II và I.

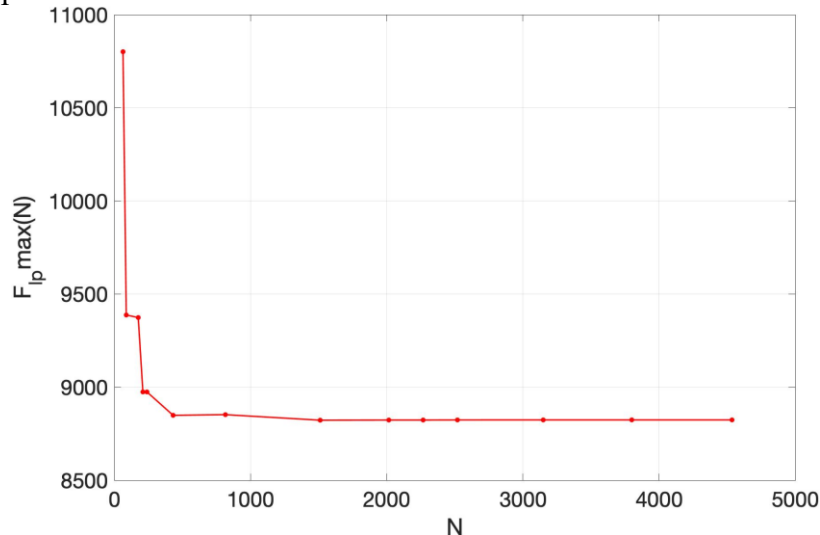
3.3. Phân tích tính hội tụ của kết quả mô phỏng

Trong quá mô phỏng ứng xử tách lớp của kết cấu mặt cầu như đã trình bày ở trên thì việc chia lưới mịn hay thô, nói cách khác chính là số phần tử (ký hiệu là N) được sử dụng để rời rạc hoá kết cấu có ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả thu được. Trong phần này chúng ta lựa chọn ví dụ một trường hợp ứng với tỷ số $K = 0.5$ để xem xét ảnh hưởng của số lượng phần tử sử dụng N đến kết quả thu được. Từ đó có thể đưa ra số lượng phần tử phù hợp cho việc tính toán trong nghiên cứu này, nhằm đạt được hai mục đích đó là kết quả đủ tin cậy và giảm nhẹ khối lượng tính toán cho máy. Trên hình 13 là biểu diễn mối quan hệ giữa F_{lp} và chuyển vị tại vị trí đặt lực tương ứng với các trường với số phần tử lần lượt là $N=64, 88, 176, 210, 240, 432, 816, 1512, 2016, 2268, 2520, 3150, 3800, 4536$.



Hình 13. Đường cong quan hệ lực và chuyển vị tương ứng với số lượng phần tử sử dụng khác nhau.

Chúng ta nhận thấy rằng khi giá trị N từ 1512 trở lên các đường cong tương ứng gần như là trùng khớp. Mặt khác hình 14 là biểu diễn sự thay đổi giá trị $F_{lp} \max$ theo sự biến thiên của số lượng phần tử N dùng để rời rạc hoá kết cấu. Một cách trực quan, hình 14 cho thấy rằng khi $N > 2000$ thì đường cong gần như nằm ngang, điều đó khẳng định rằng các giá trị $F_{lp} \max$ gần như không thay đổi mặc dù chúng ta vẫn tăng số phần tử của kết cấu. Từ những phân tích dựa trên hình 13 và 14 chúng ta có thể khẳng định rằng kết quả hội tụ khi lựa chọn rời rạc hoá toàn bộ kết cấu với số lượng phần tử lớn hơn khoảng 2000. Chính vì vậy trong bài báo này nhóm tác giả lựa chọn $N=2016$ để tính toán và thu được toàn bộ kết quả đã trình bày ở các tiêu mục phía trên.



Hình 14. Đường cong quan hệ giữa lực phá hoại lớn nhất và số lượng phần tử sử dụng.

4 KẾT LUẬN

Trong bài báo này nhóm nghiên cứu đã đề xuất một mô hình dùng để mô phỏng kết cấu mặt cầu thép ba lớp thép – bê tông – bê tông nhựa và phân tích nó trên phương diện xem xét sự phát triển vết nứt tách lớp giữa lớp bê tông nhựa và lớp bê tông cường độ siêu cao theo hai phương thức I và II một cách đồng thời. Việc phân tích dựa trên cơ sở sự tương đồng của kết cấu mặt cầu với môi trường vật liệu xếp lớp kết hợp với mô hình miền dính kết xây dựng trên nền tảng phương pháp phần tử hữu hạn. Đến nay, ở Việt Nam chưa có nghiên cứu thực nghiệm một cách chuyên sâu về việc phá huỷ tách lớp trong kết cấu mặt cầu chịu tác động kết hợp theo hai phương thức I và II, chính vì vậy nghiên cứu này có thể sử dụng làm cơ sở lý thuyết tham chiếu cho việc xây dựng các mô hình thực nghiệm trên kết cấu thực sau này. Một khi thực hiện được các thí nghiệm liên quan, mô hình lý thuyết này có thể được điều chỉnh dựa vào sự thay đổi các tham số vật liệu đầu vào như độ cứng giới hạn, năng lượng giải phóng theo phương thức I và II.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. R. Wolchuk, Steel orthotropic decks developments in the 1990s, Transportation Research Record, 1688 (1990) 30-37. <https://doi.org/10.3141/1688-04>
- [2]. R. Wolchuk, Structural behaviour of surfacings on steel orthotropic decks and considerations for practical design, Struct. Eng. Int., 12 (2002) 124-129. <https://doi.org/10.2749/101686602777965586>

- [3]. X. Liu, T. O. Medani, A. Scarpas, M. Huurman, Experimental and numerical characterization of a membrane material for orthotropic steel deck bridges: Part 2^[1] Development and implementation of a nonlinear constitutive model, *Finite Elem. Anal. Des.*, 44 (2008) 580-584. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2008.01.012>
- [4]. X. Liu, J. Li, G. Tzimiris, T. Scarpas, Modelling of five-point bending beam test for asphalt surfacing system on orthotropic steel deck bridges, *Int. J. Pavement Eng.*, 9 (2019) 1697440. <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1697440>
- [5]. Nguyễn Ngọc Long, Ngô Văn Minh, Trần Thị Kim Đăng, Nguyễn Đắc Đức, Lê Đình Long, Các dạng hư hỏng điển hình của kết cấu áo đường mềm trên mặt cầu thép bản trục hướng, *Tạp chí Giao thông vận tải*, 3 (2015) 18-20.
- [6]. R. Jung, T. Mansperger, The Ortho-Composite-Slab of the Elbebridge Wittenberge, IABSE Madrid Symposium Report, 102 (2014) 1186-1191. <https://doi.org/10.2749/222137814814067446>
- [7]. W. -H. Pan, J. -S. Fan, J. -G. Nie, J. -H. Hu, J. -F. Cui, Experimental Study on Tensile Behavior of Wet Joints in a Prefabricated Composite Deck System Composed of Orthotropic Steel Deck and Ultrathin Reactive-Powder Concrete Layer, *J. Bridge Eng.*, 21 (2016) 04016064. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000935](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000935)
- [8]. Q. Zhang., Y. Liu, Y. Bao, D. Jia, Y. Bu, Q. Li, Fatigue performance of orthotropic steel-concrete composite deck with large-size longitudinal U-shaped ribs, *Eng. Struct.*, 150 (2017) 864-874. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.094>
- [9]. J. R. Reeder, J. R. Crews Jr., Mixed-Mode Bending Method for Delamination Testing, *AIAA Journal*, 28 (1990) 1270-1276. <https://doi.org/10.2514/3.25204>
- [10]. P. P. Camanho, C. G. Davila, M. F. de Moura, Numerical Simulation of Mixed-mode Progressive Delamination in Composite Materials, *J. Compos. Mater.*, 37 (2003) 1415-1438. <https://doi.org/10.1177/0021998303034505>
- [11]. P. Naghypour, J. Schneider, M. Bartsch, J. Hausmann, H. Voggenreiter, Fracture simulation of CFRP laminates in mixed mode bending, *Eng. Fract. Mech.*, 76 (2009) 2821-2833. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.05.009>
- [12]. S. Bennati, P. Fisicaro, P. S. Valvo, An enhanced beam-theory model of the mixed-mode bending (MMB) test-Part I: Literature review and mechanical model, *Meccanica*, 48, (2013) 443-462. <http://dx.doi.org/10.1007/s11012-013-9697-8>
- [13]. H. Bae, M. Kang, K. Woo, I. -G. Kim, K. -H. In, Test and Analysis of Modes I, II and Mixed-Mode I/II Delamination for Carbon/Epoxy Composite Laminates, *Int. J. Aeronaut. Space Sci.*, 20 (2019) 636-652. <https://doi.org/10.1007/s42405-019-00170-9>
- [14]. Z. Hashin, The Elastic Moduli of Heterogeneous Materials, *J. Appl. Mech.*, 29 (1962) 143-150. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3636446>
- [15]. Z. Hashin, B. W Rose, The Elastic Moduli of Fiber-Reinforced Materials, *J. Appl. Mech.*, 31 (1964) 223-232. <https://doi.org/10.1115/1.3625735>
- [16]. R. M. Christensen, K. H. Lo, Solutions for Effective Shear Properties in Three Phase Sphere and Cylinder Models, *J. Mech. Phys. Solids*, 27 (1979) 315-330. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(79\)90032-2](https://doi.org/10.1016/0022-5096(79)90032-2)
- [17]. W. Milton, The theory of composite, Cambridge Monographs on applied and computational mathematics, Cambridge University Press, UK, 2004
- [18]. D. H. Nguyen, A. T. Tran, Tính chất đàn hồi hiệu quả của vật liệu xếp lớp với mặt phân giới hoàn hảo, *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, 70.5 (2019), 451-459. <https://doi.org/10.25073/tcsj.70.5.9>