

ĐỘ CỨNG TRONG MẶT PHẪNG CỦA SÀN PHẪNG SỬ DỤNG HỘP TẠO RỔNG
IN-PLANE STIFFNESS OF FLAT SLAB USING BOX-SHAPE VOIDED FORMER

ĐOÀN CƯỜNG QUỐC^{a,*}, TRỊNH DUY KHÁNH^b, PHAN QUỐC TUẤN^b

^aSở Xây dựng tỉnh Quảng Trị

^bKhoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

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

Ngày nhận 03/03/2026, Ngày sửa 27/03/2026, Chấp nhận 30/03/2026

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2026.vi.vol1-3>

Tóm tắt: Sàn bê tông cốt thép là cấu kiện chiếm khối lượng lớn trong công trình nhà cao tầng. Để đáp ứng những đòi hỏi ngày càng cao về tính kinh tế của công trình, cũng như các mục tiêu về phát triển bền vững thông qua những giải pháp tiết kiệm và tái chế vật liệu, các loại sàn rỗng đã được phát triển khá mạnh mẽ thời gian gần đây. Đi cùng với xu hướng sử dụng những loại kết cấu sàn mới, các tiêu chuẩn thiết kế như ACI 318, EuroCode 8 cũng đưa ra những yêu cầu và tiêu chí phân loại độ cứng trong mặt phẳng của sàn tầng ngày càng khắt khe... Trong khi đó, các kỹ sư vẫn tập trung vào thiết kế sàn rỗng theo khả năng chịu uốn; và áp dụng giả thuyết cứng tuyệt đối cho độ cứng trong mặt phẳng của các loại sàn này. Giả thuyết này thực tế chỉ phù hợp với các loại sàn sườn bê tông cốt thép, có độ dày sàn trong khoảng 10 đến 15 cm. Mặt khác, các phần mềm thiết kế kết cấu công trình (SAP200, SAFE, ...) phổ biến hiện nay thường chỉ mô hình các loại sàn bê tông cốt thép bằng mô hình vỏ Kirchhoff Love hoặc Reissner-Mindlin đồng nhất, nghĩa là chỉ có thể tự động xác định độ cứng trong mặt phẳng của các loại sàn đặc. Độ cứng trong mặt phẳng (cả độ cứng ngoài mặt phẳng) của sàn rỗng nói chung và sàn hộp nói riêng được các phần mềm hỗ trợ bằng cách khai báo các hệ số điều chỉnh độ cứng. Bài báo này sẽ trình bày cách xác định độ cứng trong mặt phẳng của sàn phẳng bê tông cốt thép sử dụng hộp tạo rỗng bằng phương pháp đồng nhất hóa sử dụng điều kiện biên tuần hoàn. Trong bài báo này, các tác giả sẽ giới thiệu phương pháp đồng nhất hóa sử dụng điều kiện biên tuần hoàn để xác định độ cứng TMP của sàn phẳng sử dụng hộp tạo rỗng dạng hộp.

Từ khóa: Đồng nhất hóa, điều kiện biên tuần hoàn, độ cứng TMP, sàn rỗng, hộp tạo rỗng.

Abstract: Reinforced concrete (RC) slabs constitute a substantial portion of the structural mass in high-rise buildings. In response to the growing economic demands of construction projects, as well

as sustainable development goals emphasizing material conservation and recycling, voided slab systems have undergone significant development in recent years. Concurrent with the adoption of these novel floor structures, design codes such as ACI 318 and Eurocode 8 have introduced increasingly stringent requirements and classification criteria regarding the in-plane stiffness of floor diaphragms. However, structural engineers predominantly focus on the flexural capacity when designing voided slabs, frequently applying the rigid diaphragm assumption for their in-plane stiffness. In practice, this assumption is primarily valid for traditional ribbed RC slabs with thicknesses ranging from 10 to 15 cm. Furthermore, common structural design softwares (e.g., SAP2000, SAFE, STAAD.Pro) typically models RC slabs utilizing homogeneous Kirchhoff-Love or Reissner-Mindlin shell elements. The formers can only automatically compute the stiffness of solid slabs. The determination of the in-plane (and out-of-plane) stiffness of voided slabs in general, is left to design engineers. These software addresses this limitation by applying stiffness modifiers. In this paper, the authors present a homogenization method using periodic boundary conditions to determine the in-plane stiffness of flat slabs using box-shaped void formers.

Keywords: Homogenization, Periodic boundary condition, in-plane stiffness, voided slab, box-shaped void formers.

1. Độ cứng trong mặt phẳng của sàn bê tông cốt thép

Ngoài vai trò chịu tải trọng thẳng đứng, sàn nhà còn có vai trò trực tiếp nhận tải trọng ngang (gió bão, động đất) và phân phối nó lên hệ thống kết cấu đứng (cột, vách cứng). Tuy nhiên, các kỹ sư thường chỉ chú trọng vai trò chịu tải thẳng đứng mà không chú ý nhiều tới vấn đề truyền tải trọng ngang. Đối với tải trọng gió bão (hoạt tải gió), các kỹ sư thường để cho

các phần mềm tự động tính toán độ cứng trong mặt phẳng. Trong khi đó, các phần mềm thiết kế kết cấu phổ biến thường áp dụng rộng rãi các mô hình tấm vỏ Kirchhoff-Love hoặc Reissner-Mindlin để mô phỏng sự làm việc của các loại sàn. Điều này có nghĩa là độ cứng trong mặt phẳng của sàn bê tông cốt thép hoàn toàn được xác định bởi độ cứng màng

$$\begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & 0 \\ C_{1122} & C_{2222} & 0 \\ 0 & 0 & C_{1212} \end{pmatrix} = \frac{Eh_s}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \tag{1}$$

Đa số các phần mềm này để ngỏ việc xác định độ cứng trong mặt phẳng của các loại sàn khác (bao gồm cả các loại sàn rỗng) cho các kỹ sư thiết kế, chỉ hỗ trợ việc khai báo các mô hình sàn đặc tương đương với các loại sàn rỗng thông qua hệ số điều chỉnh độ cứng. Đối với phân tích dao động riêng của công trình, việc xác định độ cứng của các loại sàn thường được đơn giản hóa bằng cách coi sàn là tuyệt đối cứng (rigid diaphragm), đương nhiên điều này kéo theo nhiều sai số trong kết quả phân tích. Các bài báo [1, 2] đã nêu ra các sai khác rất đáng kể khi sử dụng độ cứng (trong mặt phẳng) thực tế và độ cứng tuyệt đối trong phân tích kết cấu nhà, các sai số xuất hiện ngay khi phân tích các kết cấu nhà thấp tầng (8 tầng trong tài liệu [1]). Bài báo [2] đã tính toán độ cứng tương đương cho một kết cấu sàn sườn một phương bằng cách sử dụng phương pháp đồng nhất hóa, nhằm phân tích sự làm việc của loại sàn này. Phương pháp đồng nhất hóa được sử dụng trong nghiên cứu vừa nêu sử dụng cả điều kiện biên chuyển vị cưỡng bức và điều kiện biên lực tác dụng. Các tiêu chuẩn thiết kế công trình bê tông cốt thép hiện đại nhất hiện nay [3, 4] đều có những quy định sử dụng độ cứng thực của các loại sàn trong phân tích kết cấu. Tiêu chuẩn [4] có những quy định cụ thể khi nào thì một loại sàn được coi là tuyệt đối cứng, nghĩa là nếu sử dụng các loại sàn có độ cứng thấp hơn thì các kỹ sư phải xác định được độ cứng thực tế của sàn để khai báo vào phần mềm. Tiêu chuẩn [3] thì phân chia độ cứng sàn làm ba mức (tuyệt đối cứng, nửa cứng và mềm).

Cùng với những đòi hỏi kỹ thuật và kinh tế ngày càng cao về chống ô nhiễm môi trường, tái sử dụng vật liệu nhựa, về công nghệ xây dựng phù hợp với

cho trường hợp tấm vỏ đặc, đồng nhất, có chiều dày không đổi. Công thức cụ thể của độ cứng trong mặt phẳng của sàn đặc được nhắc lại trong công thức 1. Với C_{ijkl} là các hằng số độ cứng; E, ν lần lượt là mô đun đàn hồi (mô đun Young) và hệ số nở ngang (hệ số Poisson) của vật liệu (trong trường hợp này là bê tông); h_s là chiều dày sàn.

các tiêu chí phát triển bền vững thì sàn phẳng bê tông cốt thép sử dụng hộp nhựa tạo rỗng nổi lên là một giải pháp hàng đầu, đáp ứng được rất nhiều đòi hỏi khác nhau. Việc xác định độ cứng trong mặt phẳng của loại sàn này (cũng như các loại sàn tương tự như sàn bóng, sàn xếp) đã trở thành một vấn đề gây tranh cãi rất lớn trong cộng đồng kỹ sư thiết kế, nhiều công trình thiết kế trong thời gian đầu khi sàn hộp xâm nhập vào Việt Nam (những năm 2010) đã bỏ qua độ cứng trong mặt phẳng, đến nay các kỹ sư khi thiết kế loại sàn này đã sử dụng độ cứng trong mặt phẳng được cung cấp từ catalogue của các hãng cung cấp hộp. Tuy nhiên, chưa bao giờ các hãng này cung cấp cách thức xác định các loại độ cứng đó. Một số nghiên cứu ở Việt Nam đã bắt đầu chú ý đến độ cứng (cả TMP và NMP) của sàn hộp, và đưa ra cách thức xác định các hằng số độ cứng. Chẳng hạn các bài báo [5, 6] đã lần lượt giới thiệu cách xác định độ cứng TMP và độ cứng NMP của sàn hộp bằng phương pháp đồng nhất hóa. Các kết quả này sau đó được ứng dụng trong bài báo [7], nghiên cứu về dao động riêng của công trình sử dụng sàn hộp. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chỉ đưa ra cách xác định các hằng số độ cứng mà chưa có sự kiểm chứng độ chính xác của các hằng số này.

Trong bài báo này, các tác giả sẽ sử dụng phương pháp đồng nhất hóa sử dụng điều kiện biên tuần hoàn để xác định các hằng số độ cứng TMP C_{ijkl} của sàn hộp. Các hằng số này sau đó được sử dụng để mô phỏng sự làm việc của một kết cấu màng, và so sánh với sự làm việc TMP của một kết cấu sàn hộp được mô phỏng chi tiết. Các hằng số độ cứng trong mặt phẳng được xác định bởi các phương pháp khác (phần mềm chuyên dụng, catalogue) cũng được đưa vào so sánh.

2. Phương pháp đồng nhất hóa để xác định độ cứng TMP của sàn hộp

Phương pháp đồng nhất hóa trong cơ học được phát triển lý thuyết đồng nhất hóa trong giải quyết các bài toán vi phân có hai biến với tốc độ biến đổi khác nhau. Trong lĩnh vực cơ học, bài toán đồng nhất hóa thường xuất hiện khi cần giải quyết việc mô phỏng hoặc phân tích sự làm việc của một kết cấu làm từ vật liệu dị thể (heterogeneous). Khi đó, việc phân tích kết cấu thường được chuyển thành bài toán FEM x FEM, với hai cấp độ (vi mô và vĩ mô). Ở cấp độ vĩ mô (macro-scale) của kết cấu, các nhà nghiên cứu thường phân tích nếu $U (U_1, U_2, U_3)$ (sử dụng chữ in hoa để thể hiện cấp độ vĩ mô) là trường chuyển vị của kết cấu (xác định bằng phương pháp phần tử hữu hạn-FEM) thì nó sẽ tạo ra một trường biến dạng

$$\text{tương ứng } E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right). \text{ Tại một điểm cục}$$

bộ X^0 trên kết cấu, ta sẽ có giá trị biến dạng E_{ij}^0 và

ứng suất tương ứng Σ_{ij}^0 . Giá trị này được đưa xuống tính toán ở cấp độ vi mô (micro-scale); tại cấp độ này, các nhà khoa học đưa ra một khái niệm mới là phần tử đại diện (RVE Representative Volume Element). Phần tử đại diện được định nghĩa là một khối hình học có kích thước của cấp độ vi mô, và có đầy đủ các thông tin về thành phần, sự phân bố và hành vi của vật liệu, nghĩa là nó có khả năng phản ánh được toàn bộ sự làm việc cấp độ vi mô của điểm vĩ mô X^0 . Để đảm bảo tính ngắn gọn, từ đây về sau, bài báo sẽ sử dụng từ viết tắt PT2D thay cho phần tử đại diện. Các nhà khoa học đưa thêm các điều kiện biên chuyển vị cưỡng bức hoặc lực tác dụng để phân tích sự làm việc của PT2D cũng bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Lúc này, bài toán trở thành một bài toán cổ điển trong cơ học kết cấu, với các giả thuyết quen thuộc: Vật liệu bê tông và vật liệu chiếm không gian của khối hộp rỗng làm việc đàn hồi tuyến tính; bài toán nằm trong khuôn khổ biến dạng nhỏ, giữa bê tông và hộp nhựa có sự dính bám hoàn toàn (biến dạng như nhau ở lớp tiếp xúc); kết cấu sàn hộp có cấu trúc tuần hoàn lý tưởng theo hai phương. Sau khi giải bài toán ở cấp độ vi mô trên PT2D, ta cũng sẽ thu được các trường chuyển vị $u(U_1, U_2, U_3)$ (sử

dụng chữ thường để ký hiệu các đại lượng ở qui mô vi mô), và các trường biến dạng $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{u_i}{\partial x_j} + \frac{u_j}{\partial x_i} \right)$,

trường ứng suất $\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl}$. Thông qua các định lý về cân bằng năng lượng, các nhà khoa học đã chứng minh được rằng trung bình các trường vi mô chính bằng giá trị vĩ mô tương ứng như trong Công thức 2. Trong đó V là thể tích của PT2D.

$$\langle \varepsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int \varepsilon_{ij} dV = E_{ij}^0 \tag{2}$$

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int \sigma_{ij} dV = \Sigma_{ij}^0$$

Từ đó, ta có thể suy ra các hằng số độ cứng vĩ mô C_{ijkl} nhờ vào mối quan hệ trong công thức 3.

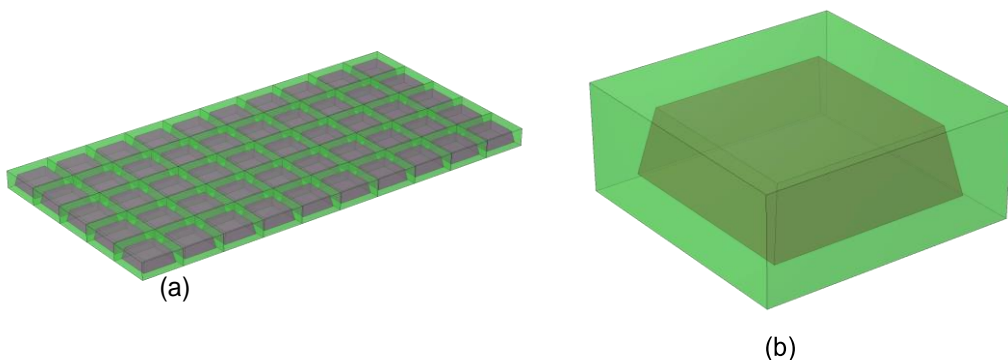
$$\Sigma_{ij} = C_{ijkl} E_{kl} \tag{3}$$

trong đó: ij, kl là các cặp chỉ số độc lập, mỗi chỉ số có thể nhận các giá trị từ 1 đến 3.

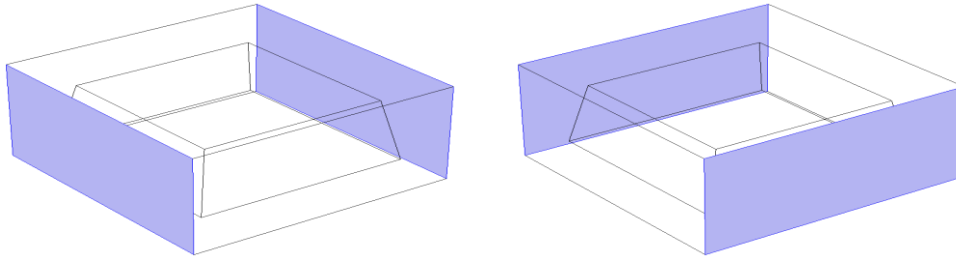
Trong kĩ thuật, ta thường rất hay gặp các trường hợp kết cấu có cấu trúc tuần hoàn, nghĩa là nếu sắp xếp PT2D sát cạnh nhau, lặp đi lặp lại thì nó sẽ tạo ra chính xác kết cấu ban đầu. Đối với các dạng kết cấu này, một điều kiện biên đặc biệt rất thích hợp cho bài toán phân tích kết cấu ở cấp độ vi mô đã được sử dụng rất phổ biến là điều kiện biên tuần hoàn (Công thức 4).

$$u_i = E_{ij}^0 x_j + v_i \tag{4}$$

trong đó, v_i là các thành phần của một vector chuyển vị đặc biệt, gọi là thành phần nhiễu chuyển vị (fluctuation), có tính chất tuần hoàn (nghĩa là ở các vị trí đối xứng nhau trên hai mặt biên đối diện có tọa độ x_i^{src} và x_i^{des} thì $v_i^{src} = v_i^{des}$). Đối với dạng kết cấu tấm vỏ có dạng tuần hoàn hai chiều như sàn hộp, việc xác định một kết cấu sàn hộp (a) và PT2D (b) của nó. Điều kiện biên tuần hoàn (Công thức 4) cũng được áp dụng ở các mặt biên xung quanh của PT2D như trong Hình 2.



Hình 1. Sàn hộp (a) và PT2D (b) của sàn



Hình 2. Các cặp mặt biên xung quang đối xứng của PT2D, nơi áp đặt các điều kiện biên tuần hoàn

Để thuận tiện cho việc xây dựng mô hình màng đồng nhất tương đương từ PT2D, bài báo [8] đã viết lại các công thức 4 và công thức 2 theo hướng phù hợp hơn phù hợp với những khái niệm quen thuộc là nội lực N_{ij} và biến dạng E_{ij} của màng. Phương pháp này sau đó đã được vận dụng lại trong các bài báo [9–11]. Vì thế, để xác định độ cứng TMP C_{ijkl} của sàn hộp, ta cần ứng dụng những biến đổi của [8] theo một qui trình cụ thể như sau:

- Thiết lập PT2D như trong Hình 1;
- Thiết lập điều kiện biên tuần hoàn như trong công thức 5;

$$\begin{aligned} u_1 &= E_{11}^0 x_1 + E_{12}^0 x_2 + v_1 \\ u_2 &= E_{12}^0 x_1 + E_{22}^0 x_2 + v_2 \end{aligned} \quad (5)$$

- Gán điều kiện biên lên các mặt bên của PT2D trong Hình 2 theo ba trường hợp:

$$E_{ij}^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad E_{ij}^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad E_{ij}^{(3)} = \begin{pmatrix} 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0 \end{pmatrix}$$

- Giải 3 ba trường hợp của bài toán cấp độ vi mô trên PT2D bằng phương pháp PTHH để thu được các trường ε_{ij} và σ_{ij} ;

- Tính toán các biến dạng cấp độ vĩ mô E_{ij} theo công thức 2;

- Tính toán các nội lực của màng N_{ij} theo công thức 6. Trong đó, S là diện tích mặt trung bình của PT2D;

$$\begin{aligned} N_{11} &= t \times \langle \sigma_{11} \rangle = \frac{1}{S} \int \sigma_{11} dV \\ N_{22} &= t \times \langle \sigma_{22} \rangle = \frac{1}{S} \int \sigma_{22} dV \\ N_{12} &= t \times \langle \sigma_{12} \rangle = \frac{1}{S} \int \sigma_{12} dV \end{aligned} \quad (6)$$

- Tính toán các hằng số độ cứng vĩ mô C_{ijkl} theo hệ phương trình 7.

$$\begin{aligned} N_{11} &= C_{1111} E_{11} + C_{1122} E_{22} \\ N_{22} &= C_{1122} E_{11} + C_{2222} E_{22} \\ N_{12} &= 2C_{1212} E_{12} \end{aligned} \quad (7)$$

Cần lưu ý rằng ta phải giải ba lần hệ phương trình 7, tương ứng với ba trường hợp của điều kiện biên tuần hoàn để tìm được tất cả 4 hằng số độ cứng màng C_{ijkl} .

Các phần mềm thiết kế thường sử dụng các đặc trưng vật liệu $E_1, E_2, G, \nu_{12}, \nu_{21}$ của vật liệu trực hướng để tính ra các hằng số S_{ijkl} của ma trận độ mềm cho phần tử màng vì công thức tính toán gọn hơn so với các công thức tính ra hằng số độ cứng C_{ijkl} . Vì vậy, sau khi xác định được độ cứng C_{ijkl} , ta cần biến đổi để tìm ra các hằng số vật liệu theo các bước tính toán như trong bài báo [10]. Bước biến đổi này chỉ nhằm thích ứng với cách khai báo mà đa số các phần mềm thương mại sử dụng (chỉ cho phép khai báo đặc trưng vật liệu). Cách biến đổi từ độ cứng màng (không phải độ cứng vật liệu) sang độ mềm vật liệu được thể hiện trong công thức 8; và mối liên hệ giữa độ mềm vật liệu và đặc trưng vật liệu được thể hiện trong Bảng 1.

$$S_{ijkl} = \left(\frac{1}{t} C_{ijkl} \right)^{-1} \quad (8)$$

Hệ số ν_{21} thông thường được các phần mềm tự xác định nhờ vào liên hệ giữa mô đun đàn hồi và hệ số nở ngang $\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}$.

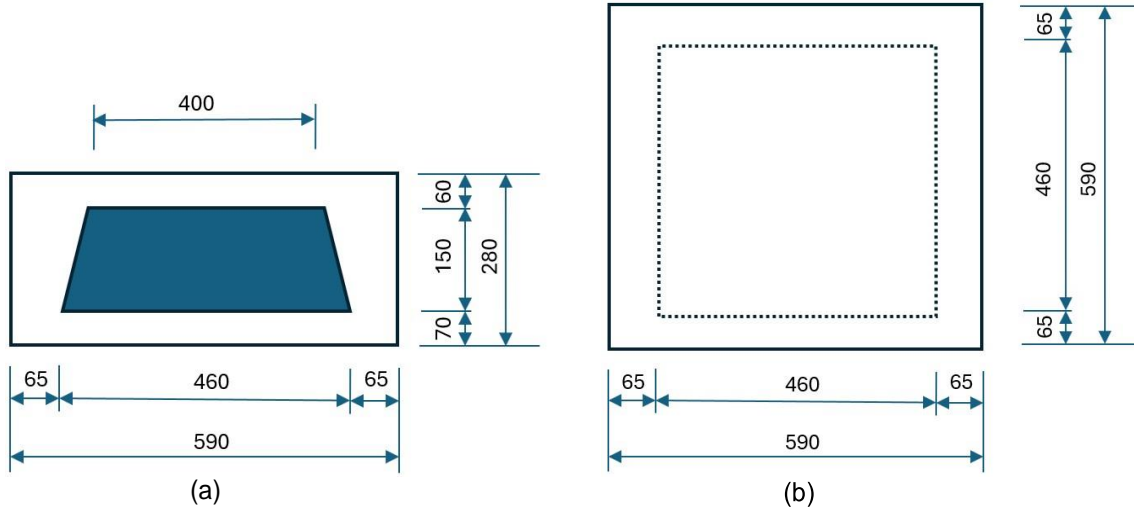
Bảng 1. Sự tương ứng giữa các hằng số độ mềm và các đặc trưng đàn hồi, nở ngang của vật liệu

| E_1 | E_2 | G_{12} | ν_{12} |
|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|
| $\frac{1}{S_{1111}}$ | $\frac{1}{S_{2222}}$ | $\frac{1}{S_{1212}}$ | $-\frac{S_{1122}}{S_{1111}}$ |

3. Kết quả và nhận xét

Để cụ thể hóa các tính toán nói trên, các tác giả lựa chọn thiết kế một sàn hộp có kích thước $6 \times 10 \times PT2D$ với các kích thước của PT2D được thể hiện trong Hình 3. Khoảng rỗng phía bên trong hộp nhựa được mô phỏng bằng một vật liệu rất mềm (E rất bé, hệ số nở ngang ν bằng với hệ số nở ngang

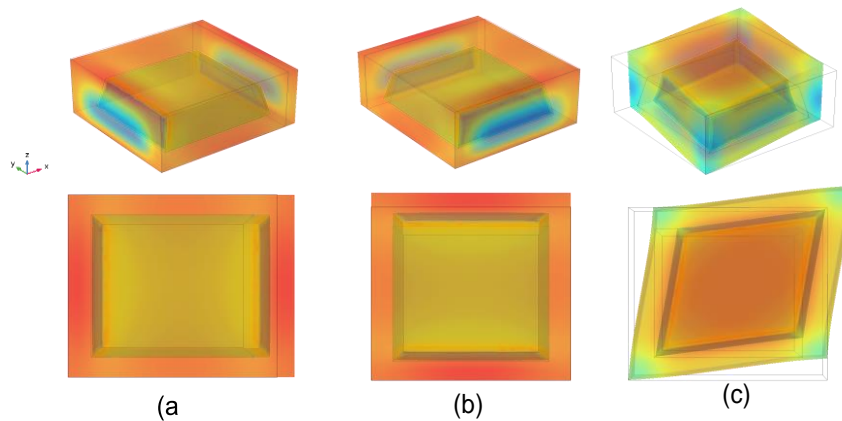
của bê tông bọc xung quanh). Đặc trưng của bê tông và vật liệu mềm này được liệt kê trong Bảng 2. Sau khi tính toán với 3 điều kiện biên tuần hoàn tương ứng với các trường hợp $E_{ij}^{(1)}, E_{ij}^{(2)}, E_{ij}^{(3)}$, ta thu được các trạng thái biến dạng của PT2D như trong Hình 4. Ba trạng thái biến dạng này phản ánh chính xác các dạng làm việc trong mặt phẳng của sàn hộp.



Hình 3. Mặt đứng PT2D của sàn hộp (a) và mặt bằng của PT2D (b) nhìn từ phía dưới với các kích thước cụ thể được sử dụng trong ví dụ khảo sát

Bảng 2. Đặc trưng vật liệu của các pha vật liệu trong PT2D

| | E (MPa) | ν |
|--------------|-----------|-------|
| Bê tông | 30000 | 0,2 |
| Vật liệu mềm | 3 | 0,2 |



Hình 4. Trạng thái biến dạng và các ứng suất σ_{11} (a), ứng suất σ_{22} (b), ứng suất σ_{12} (c) của PT2D tương ứng với ba trường hợp của điều kiện biên tuần hoàn

Sau khi tính toán các trường trung bình E_{ij} và N_{ij} , ta xác định được các hằng số độ cứng C_{ijkl} như trong Bảng 3. Trong Bảng 3 trình bày các giá trị của hằng số độ cứng được xác định từ PT2D (SHQB), được tra cứu từ công cụ tính toán của một công ty cung cấp hộp (LFNE), được tính toán (theo công thức) bởi phần mềm Robot Structural Analysis

(RSA). Nói cách khác đây là các mô hình màng tương đương với sàn hộp, được xác định bởi những phương pháp khác nhau.

Các giá trị đặc trưng vật liệu của màng cứng dày $t = 280$ mm (Hình 3) tương ứng với các hằng số độ cứng trong Bảng 3 (được tính toán theo Bảng 1) được liệt kê trong Bảng 4.

Bảng 3. Hằng số độ cứng được xác định bởi nhiều phương pháp

| | SHQB | LFNE | RSA |
|------------|---------|---------|---------|
| C_{1111} | 5472500 | 5337500 | 4891500 |
| C_{2222} | 5472500 | 5337500 | 4891500 |
| C_{1122} | 951500 | 213500 | 780000 |
| C_{1221} | 1985000 | 3185000 | 1625000 |

Bảng 4. Đặc trưng vật liệu tương ứng với hằng số độ cứng trong Bảng 3

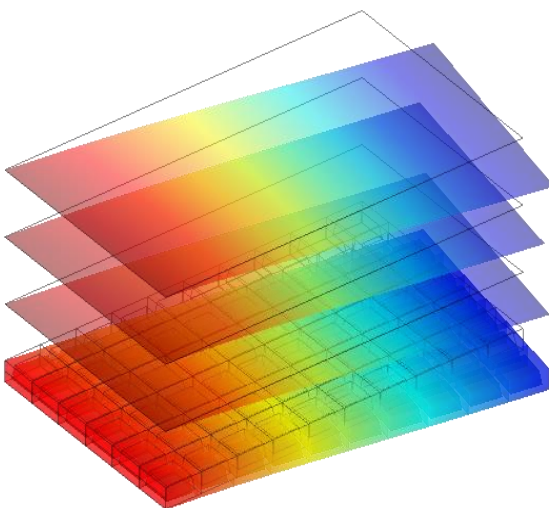
| | SHQB | LFNE | RSA |
|------------|--------|-------|--------|
| E_1 | 18954 | 19032 | 17025 |
| E_2 | 18954 | 19032 | 17025 |
| G_{12} | 7089.3 | 11357 | 5803.6 |
| ν_{12} | 0.17 | 0.04 | 0.16 |

Để so sánh sự làm việc của các kết cấu màng tương đương và sàn hộp chi tiết (sàn hộp 3D), ta kiểm tra trường hợp các mô hình sàn, màng chịu lực vuông góc và phân bố dọc theo cạnh dài của chúng; tổng hợp lực có giá trị bằng nhau. Một cạnh ngắn của sàn ngàm cứng, các cạnh còn lại để tự do. Hình 5 mô tả lần lượt từ dưới lên: biến dạng của sàn hộp, biến dạng của màng SHQB (thu được độ cứng từ phương pháp Đồng

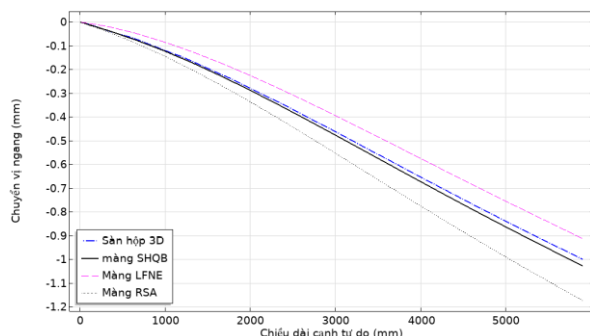
nhất hóa), biến dạng của màng LFNE (thu được độ cứng từ công cụ tính toán của một công ty thiết kế), biến dạng của màng RSA (thu được độ cứng từ phần mềm RSA). Do lực tác động và điều kiện liên kết là như nhau, ta có thể xem xét giá trị chuyển vị lớn nhất đã được chuẩn hóa (bằng cách chia cho giá trị chuyển vị lớn nhất) của từng mô hình màng so với mô hình sàn hộp 3D chi tiết (Bảng 5).

Bảng 5. Giá trị chuyển vị lớn nhất đã chuẩn hóa của từng mô hình: sàn hộp, màng SHQB, màng LFNE, màng RSA

| Sàn hộp | SHQB | LFNE | RSA |
|---------|-------|-------|-------|
| 1 | 1,028 | 0,913 | 1,174 |



Hình 5. Trạng thái biến dạng TMP của sàn hộp, màng SHQB, màng LFNE, màng RSA



Hình 6. So sánh chuyển vị TMP (đã chuẩn hóa) của sàn hộp, màng SHQB, màng LFNE, màng RSA

Khi so sánh chuyển vị của bốn kết cấu trong Hình 6, có thể thấy rõ:

- Mô hình màng SHQB được xây dựng từ phương pháp đồng nhất hóa bám sát chuyển vị của

sàn hộp, đồng thời thiên về an toàn (chuyển vị lớn hơn chuyển vị của sàn hộp). Độ chênh lệch lớn nhất chỉ 2,8%. Không những có độ chênh lệch nhỏ, tại vị trí gần với biên ngàm cứng, chuyển vị của mô hình SHQB bám sát rõ rệt chuyển vị của mô hình sàn 3D. Điểm vượt trội này của mô hình SHQB so với các mô hình khác có thể nhận thấy được bằng mắt thường;

- Mô hình màng LFNE là mô hình đang được sử dụng phổ biến trong thiết kế hiện nay, tuy nhiên, độ chênh lệch trong chuyển vị của mô hình LFNE so với sàn hộp lên tới 8,7%; thiên về nguy hiểm. Sai số này quá lớn so với sai số thường được chấp nhận trong ngành Xây dựng là 5%. Mặt khác, phương pháp này chỉ cho phép các kĩ sư thiết kế khoảng cách giữa các hộp theo hai phương là giống nhau; điều này sẽ hạn chế rất nhiều phương án thiết kế của các kĩ sư;

- Mô hình màng RSA có độ sai lệch lớn nhất, do phần mềm này có thể tính toán nhanh độ cứng TMP (theo công thức); nhưng chỉ có thể tính toán cho khối rỗng hình hộp chữ nhật, không phải khối rỗng hình chóp cụt như hai mô hình màng còn lại.

Từ đó, có thể kết luận phương pháp đồng nhất hóa sử dụng điều kiện biên tuần hoàn có thể sử dụng để xây dựng mô hình màng tương đương, mô tả được sự làm việc TMP của sàn hộp. Phương pháp này không những cho độ chính xác cao hơn các công cụ phổ biến hiện nay trong thiết kế sàn hộp, mà còn có tính linh hoạt cao hơn, cho phép xác định độ cứng của sàn hộp với khoảng cách hộp tạo rỗng theo hai phương không giống nhau bằng mô hình màng trực hướng, tương tự [10].

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Quảng Trị, thông qua Hợp đồng Thực hiện Nhiệm vụ khoa học và Công nghệ số 35-24/HĐ-KHCN ngày 02 tháng 10 năm 2024. Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Tena-Colunga and R. Sabanero-García (2023), "Impact of diaphragm flexibility on dynamic properties and seismic design parameters of irregular buildings in plan", Journal of Building Engineering.[Online].Available:<https://www.semantic scholar.org/paper/8b55023c274974bfd4653900e0ec221e030b014>.
- [2] S. Baldassi, I. Pitacco, G. Frappa, F. Rizzo, and M. Pauletta (2024), "Modeling of in-plane floor flexibility in existing reinforced concrete buildings", Structures, vol. 69.
- [3] A. C. 318 (2019), *Building code requirements for structural concrete (ACI 31819)*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- [4] B. S. Institution (2004), *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*, ser. Eurocode series of European standards. European Committee for Standardization.
- [5] N. T. Dương (2018), "Thông số cơ học tương đương trong tính toán chịu uốn sàn rỗng bê tông cốt thép", Tạp chí Xây dựng Việt Nam - Vietnam Journal of Construction, no. 9, p. 5.
- [6] N. T. Dương (2018), "Thông số điều chỉnh độ cứng trong thiết kế kết cấu sàn rỗng theo mô hình phần tử vỏ mỏng với phần mềm etabs", Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, vol. 3, p. 8,. [Online].Available:http://ibst.vn/upload/documents/file_upload/1547107341NguyenTheDuong_DTU_IBS_T_10_2018-OK.pdf.
- [7] P. T. Hoàn, H. T. Đạt, N. T. Thắng (2020), "Khảo sát ảnh hưởng của mô hình hóa sàn lõi rỗng sử dụng phần mềm etabs tới phản ứng động học của nhà nhiều tầng", Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCCNXD) - ĐHXDHN, vol. 2V, no. 14, pp. 34–51,. [Online]. Available:<https://stce.nuce.edu.vn/index.php/vn/article/view/1626>.
- [8] A. Anthoine (1995), "Derivation of the in-plane elastic characteristics of masonry through homogenization theory", International Journal of Solids and Structures, vol. 32, no. 2, pp. 137–163,. [Online].Available:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002076839400140R>.
- [9] A. Cecchi and K. Sab (2002), "Out of plane model for heterogeneous periodic materials: the case of masonry", European Journal of Mechanics A/Solids, vol. 21, no. 5, pp. 715–746. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997753802012433>.
- [10] T. D. Khánh (2021), "Đánh giá ảnh hưởng của vách ngăn trong khung phẳng bằng mô hình màng trực hướng", Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCCNXD) - ĐHXDHN, vol. 5V, pp. 108–119. [Online]. Available:<https://stce.nuce.edu.vn/index.php/vn/article/view/1946>.
- [11] T.D.Khánh (2022), "Xây dựng mô hình love-kirchhoff cho sàn phẳng lõi xoắn", Tạp Chí Kết cấu và Công nghệ Xây dựng, số 36, p. 14.
- [12] LFORM Nevo Miền Bắc (2026), "Tính toán thông số sàn quy đổi". [Online]. Available: <https://lform.vn/tinh-toan-thong-so-san-quy-doi/>.