

THÔNG SỐ ĐIỀU CHỈNH ĐỘ CỨNG TRONG THIẾT KẾ KẾT CẤU SÀN RỒNG THEO MÔ HÌNH PHẦN TỬ VỎ MỎNG VỚI PHẦN MỀM ETABS

TS. NGUYỄN THẾ DƯƠNG

Trường Đại học Duy Tân

Tóm tắt: Bài báo trình bày cách tính toán các thông số biến đổi độ cứng của sàn rồng khi khai báo trong phần mềm thương mại, trong đó có phần mềm Etabs. Việc tính toán dựa trên các so sánh kết quả mô phỏng theo phương pháp phần tử hữu hạn của mô hình 3D đối với sàn rồng và sàn đặc. Một vài công thức đơn giản được đề xuất để tính toán nhanh các thông số. Phương pháp cũng như dữ liệu tính toán đạt được có thể làm tài liệu tham khảo cho các kỹ sư thiết kế.

Từ khóa: sàn rồng, thông số điều chỉnh độ cứng, phần tử vỏ mỏng.

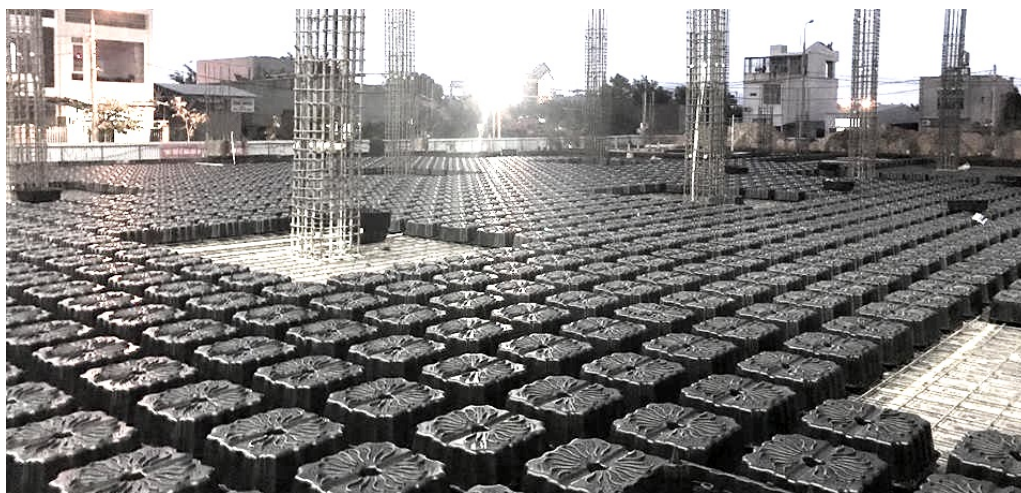
Abstract: This paper presents the method for calculating the stiffness modifier of hollow box slabs using in design commercial softwares, including Etabs. The calculation bases on the comparison of results obtained by 3D numerical modelling using finite element method, for both hollow box slab and solid slab. Some simple formulars is also proposed allowing a quick evaluation of these parameters. The proposed method and obtained data can be referenced for design engineers.

Keywords: hollow slab, stiffness modified parameter, thin shell element.

1. Mở đầu

Sàn bê tông cốt thép (BTCT) có lỗ rồng dạng hình hộp hoặc chóp cụt được sử dụng khá rộng rãi tại Việt Nam trong thời gian gần đây nhằm vượt các nhịp tương đối lớn trong công trình dân dụng. Việc tạo rồng được thực hiện bằng nhiều phương pháp khác nhau. Phương pháp chung là sử dụng các vật liệu nhẹ (như xốp, bê tông bọt) hoặc các kết cấu dạng rồng như Copp pha nhựa để chèn vào trong giữa bê tông ở khu vực trục trung hòa của mặt cắt (hình 1). Việc này giúp đẩy được vật liệu ra xa trục trung hòa và do đó tăng độ cứng của sàn nhưng không tăng khối lượng, đồng thời có nhiều lợi ích về kinh tế và kỹ thuật [1]. Đây là một giải pháp được phát triển từ rất sớm ở châu Âu, trong đó giải pháp sử dụng quả bóng nhựa hình cầu nhựa tạo rồng bên trong đã có nhiều giải thưởng, trong đó có giải thưởng môi trường châu Âu cho phát triển bền vững.

Để tính toán thiết kế loại sàn này, cần phải tìm nội lực (mô men uốn, lực cắt, lực dọc) của sàn khi cùng làm việc với hệ kết cấu và chịu tác dụng của tải trọng. Ở đây, chúng ta giả thiết là hệ làm việc trong giới hạn đàn hồi, tuyến tính khi tính toán nội lực.

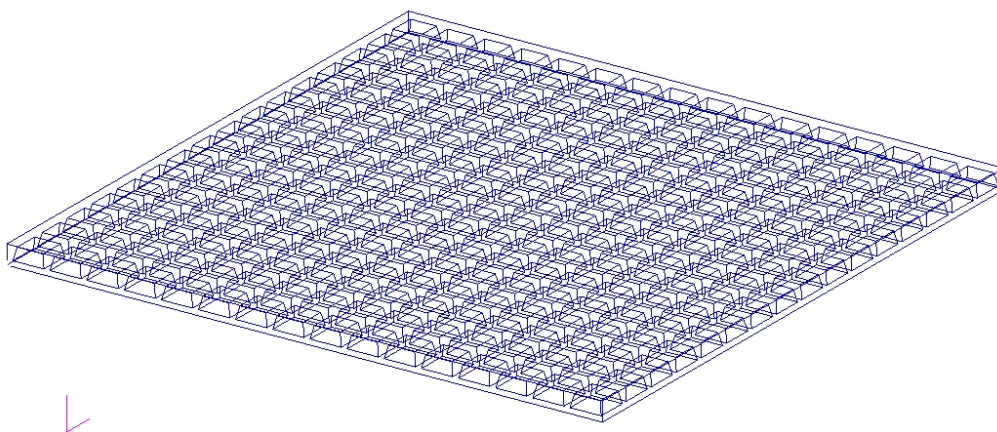


Hình 1. Ví dụ sàn rồng sử dụng hộp nhựa tái chế tạo Copp pha - giai đoạn lắp Copp pha nhựa sau khi thi công xong thép lớp dưới

Hộp được bố trí trong sàn thường theo dãy song song với nhau và song song với biên sàn để tạo ra các cấu trúc dạng dầm chìm trong sàn. Khoảng cách các hộp theo hai phương có thể khác nhau tùy vào dạng sàn. Trong trường hợp sàn làm việc hai phương, nên bố trí khoảng cách các hộp nhựa theo hai phương là bằng nhau. Trong trường hợp sàn một phương, ví dụ sàn console, có thể bố trí khoảng cách theo hai phương là khác nhau trong đó phương chịu lực chính thì rãnh hộp cần lớn hơn.

Trong công tác thiết kế sàn rỗng, các kỹ sư thường sử dụng phần mềm thương mại để mô

phỏng dưới dạng màng, tấm hoặc vỏ. Về mặt hình học, do không thể mô phỏng được dạng hình học thật của sàn rỗng (hình 2) trong hầu hết các phần mềm thương mại chuyên dụng cho thiết kế nhà, các sàn rỗng được mô phỏng như sàn đặc tương đương có cùng chiều dày h với sàn rỗng. Để sàn đặc tương đương làm việc giống như sàn thật (sàn rỗng), tức là có cùng chức năng truyền và phân phối nội lực, cần phải khai báo và điều chỉnh các thông số liên quan đến độ cứng của sàn một cách phù hợp.



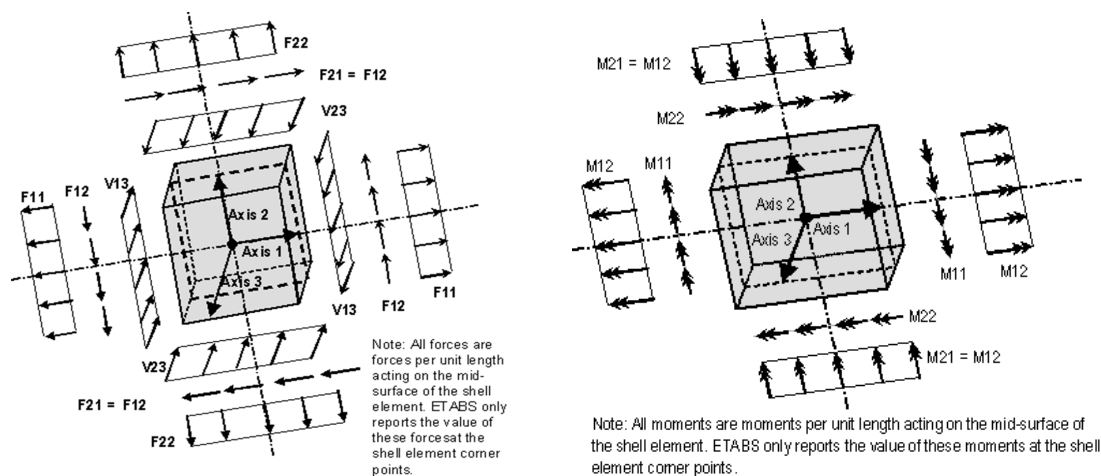
Hình 2. Cấu trúc hình học của tấm sàn rỗng được mô phỏng bởi phần mềm Cast3M [2] nhưng không thể mô phỏng được trong phần mềm Etabs [3]

Nếu chỉ thiết kế sàn chịu uốn, tức là chỉ quan tâm đến quan hệ giữa tải trọng vuông góc với tấm và với chuyển vị tương ứng thì việc quy đổi sàn có chứa lỗ rỗng thành sàn đặc tương đương có thể chỉ cần thực hiện thông qua việc quy đổi đơn giản là mô đun đàn hồi E . Hệ số quy đổi được lấy theo công thức đề xuất trong tài liệu [4], tính theo tỉ lệ mô men quán tính giữa mặt cắt rỗng và mặt cắt đặc. Tuy nhiên, trong trường hợp sàn làm việc phức tạp hơn, ví dụ cần phải xét đến các ảnh hưởng kéo, nén, cắt, xoắn thì việc chỉ quy đổi mô đun đàn hồi theo độ cứng chống uốn để đưa vào mô hình tính toán sẽ không còn đầy đủ. Cần phải xem xét tách biệt các thông số khác.

2. Mô hình phần tử vỏ sử dụng trong sàn

Phần mềm Etabs cho phép khai báo phần tử sàn (slab) theo ba dạng: màng (membrane), vỏ mỏng (thin shell) và vỏ dày (thick shell). Phần tử dạng

màng là dạng tấm phẳng nhưng không có khả năng chịu uốn mà có khả năng chịu nén trong mặt phẳng, tức là truyền được lực ngang từ dầm, cột chuyển vào. Nội lực trong phần tử màng có lực dọc trục. Khác với phần tử dạng màng, phần tử dạng vỏ có khả năng chịu các loại tải trọng khác nhau gồm: kéo, nén, trượt trong mặt phẳng sàn, uốn, cắt, xoắn trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng sàn. Do sàn trong công trình dân dụng có tỉ lệ nhịp và chiều dày thường lớn hơn 10 nên mô hình được sử dụng là mô hình vỏ mỏng. Nội lực trong phần tử vỏ mỏng của sàn bao gồm (hình 3): lực F11, F22 lần lượt là các lực kéo (nén) trong các phương 1 và 2; Lực F12 là lực cắt trong mặt phẳng sàn; V13 và V23 lần lượt là lực cắt trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng sàn; mô men M11, M22 lần lượt là mô men uốn quanh các trục 2 và 1; mô men M12=M21 là mô men xoắn quanh trục 1 và 2.



Hình 3. Nội lực trong phần tử vỏ sử dụng trong phần mềm Etabs [3]

Nếu xét sự làm việc của sàn trong mô hình tổng thể của toàn bộ công trình thì các thành phần nội lực trong phần tử sàn sẽ phụ thuộc vào độ cứng của sàn đó so với các bộ phận kết cấu xung quanh. Do đó để đảm bảo tính chính xác về sự phân bố nội lực, một trong những cách thực hiện là điều chỉnh độ cứng sao cho giữa sàn rỗng và sàn đặc mô phỏng trong Etabs là tương đương nhau. Sự tương đương được hiểu là với cùng một tác động thì phản ứng của hai sàn (kết cấu) là như nhau.

Để thực hiện được công việc này, phần mềm Etabs cho phép điều chỉnh các thông số liên quan đến độ cứng của sàn, cũng như trọng lượng riêng của sàn trong quá trình khai báo mặt cắt trong mục "Shell Assignment - Stiffness Modifier". Các thông số độ cứng có thể điều chỉnh được liên quan đến các thành phần nội lực như đã trình bày ở trên, gồm: *Membrane f11 Direction* - độ cứng chống kéo (nén) theo phương 1; *Membrane f22 Direction* - độ cứng chống kéo (nén) theo phương 2 (1 và 2 là hai phương vuông góc trong mặt phẳng sàn); *Membrane f12 Direction* liên quan đến độ cứng chống trượt trong mặt phẳng sàn; *Bending m11 Direction*, *Bending m22 Direction* tương ứng liên quan đến độ cứng chống uốn quanh trục 2 và 1. *Bending m12 Direction* liên quan đến độ cứng chống xoắn quanh trục 1 và 2; *Shear v13 Direction* và *Shear v23 Direction* lần lượt liên quan đến độ cứng chống trượt theo trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng sàn. Ký hiệu các đại lượng trên lần lượt là: ϕ_{11} , ϕ_{22} , ϕ_{12} , μ_{11} , μ_{22} , μ_{12} , V_{13} , V_{23} và gọi chung là *thông số điều chỉnh độ cứng*.

3. Tính toán các thông số điều chỉnh độ cứng

Nguyên lý tính toán thông số điều chỉnh độ cứng như sau: với cùng một tình huống tác dụng của tải trọng (ví dụ lực hoặc chuyển vị cưỡng bức), phản ứng của kết cấu (tương ứng là biến dạng/chuyển vị hoặc ứng suất/lực) sinh ra phải giống nhau giữa kết cấu không đồng nhất và kết cấu đồng nhất. Trong trường hợp dạng hình học của kết cấu có dạng chu kỳ, chúng ta có thể xét trên phần tử đại diện (representative volume element - RVE) để tính toán một số các thông số như: mô đun đàn hồi (đặc trưng cho độ cứng chống kéo - nén), mô đun đàn hồi trượt (đặc trưng cho độ cứng chống cắt). RVE được hiểu là phần tử nhỏ nhất mà khi ghép nhiều phần tử như vậy lại với nhau thì sẽ sinh ra kết cấu. Đối với các thông số ở trên, ta có thể thấy ϕ_{11} , ϕ_{22} , ϕ_{12} , V_{13} , V_{23} có thể dựa vào tính toán trên phần tử đặc trưng. Đối với các thông số μ_{11} , μ_{22} , μ_{12} thì cần phải được tính toán trên toàn bộ kết cấu.

3.1 Thông số ϕ_{11} , ϕ_{22}

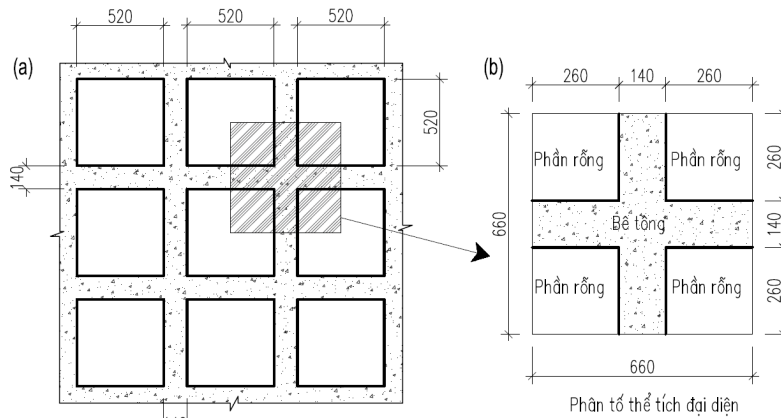
Mô phỏng phần tử hữu hạn

Nguyên lý tính toán các thông số này dựa trên RVE. Các điều kiện biên đặt vào các mặt phải được xử lý sao cho phần tử đặc trưng RVE khi làm việc độc lập phải giống như khi làm việc trong kết cấu (xem tài liệu [4]).

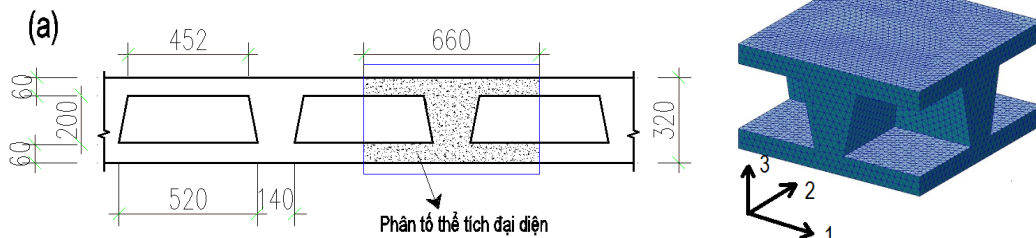
Xét phần tử đặc trưng tách ra từ sàn rỗng, ví dụ như hình 4, 5. Thực hiện tính toán theo phương pháp phần tử hữu hạn trên RVE ở hình 5(b). Trên cơ sở so sánh biến dạng giữa phần tử rỗng và phần tử đặc khi có cùng giá trị lực tác dụng, có thể đánh

giá được sự thay đổi độ cứng. Ví dụ một phần tử sàn đặc dưới tác dụng của lực f_{22} theo phương 2 (phương y), biến dạng tính được tương ứng là $u_{22,d}$.

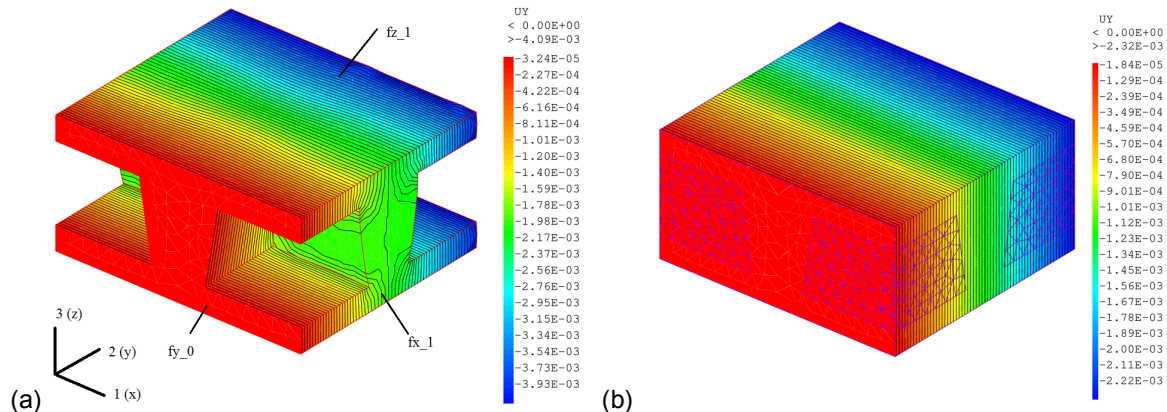
Cũng với lực này tác dụng lên phần tử sàn rỗng, chuyển vị tương ứng tính được là $u_{22,r}$ thì hệ số $\phi_{22} = u_{22,d} / u_{22,r}$.



Hình 4. (a) Trích mặt bằng một sàn chứa lỗ rỗng, (b) Tách một phần tử đặc trung để xem xét



Hình 5. (a) Trích mặt cắt một sàn chứa lỗ rỗng, (b) Phần tử đại diện được mô phỏng 3D



Hình 6. Ví dụ mô phỏng bài toán nén mẫu bằng phương pháp số trên phần tử đại diện. (a) Chuyển vị theo phương 1 của RVE chứa lỗ rỗng, (b) Chuyển vị theo phương 2 của RVE đặc. Áp lực tác dụng 1MPa

Gọi các mặt của RVE là fy_0 , fx_1 và fz_1 như hình 6(a), các mặt fy_1 , fx_0 và fz_0 lần lượt là các mặt đối diện với các mặt fy_0 , fx_1 và fz_1 . Thực hiện tính toán với kích thước hình học đã cho, mô đun đàn hồi $E = 28500$ MPa, hệ số Poisson $\nu = 0.2$, điều kiện biên như sau:

- Mặt fy_0 : $u_{22} = 0$;

- Mặt fy_1 : u_{22} của tất cả các điểm trên mặt này bằng nhau;

- Mặt fz_0 : $u_{33} = 0$;

- Mặt fz_1 : u_{33} của tất cả các điểm trên mặt này bằng nhau;

- Mặt fx_0 : $u_{11} = 0$;

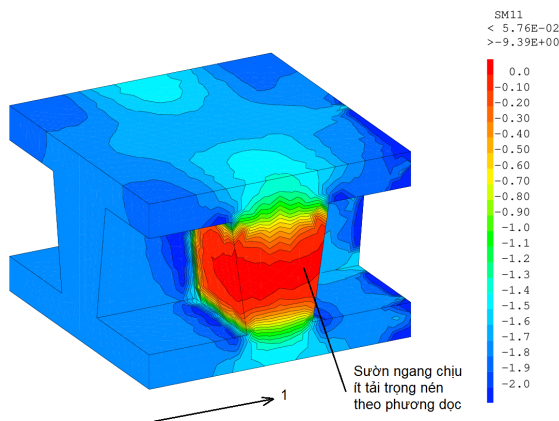
- Mặt fx_1: u11 của tất cả các điểm trên mặt này bằng nhau; ta tính được chuyển vị u2 lớn nhất tại mặt fy_1 là 4.09 mm với áp lực 1 MPa. Với các thông số trên, giả sử lỗ rỗng cũng được lấp đầy bê tông (hình 7b), tính toán cho chuyển vị lớn nhất u2 là 2.32 mm. Vậy $\phi_{22} = 2.32/4.09 = 0.57$.

Nếu khoảng cách các hộp đặt theo phương 1 và phương 2 là khác nhau thì cần thực hiện tính toán cho hai phương, với phương pháp tương tự như

trên.

Công thức đơn giản cho trường hợp sàn hộp dạng chóp cụt

Phân tích trường ứng suất truyền trong cấu trúc lỗ rỗng trên (hình 7), ta thấy dòng ứng suất chủ yếu truyền qua dải vật liệu bố trí dọc theo phương truyền lực (trong ví dụ này là phương 1). Ứng suất trên sườn ngang rất bé.



Hình 7. Phân bố ứng suất theo phương 1 khi mẫu chịu tác dụng lực nén trong phương 1

Do vậy có thể coi sự suy giảm độ cứng chống kéo-nén của sàn chứa lỗ rỗng chính là sự suy giảm của diện tích mặt cắt ngang. Vậy một cách gần đúng có thể viết:

$$k_{11} = \frac{A_{1r}}{A_{1d}} \quad (1)$$

$$k_{22} = \frac{A_{2r}}{A_{2d}} \quad (2)$$

trong đó A_{1r}, A_{1d} lần lượt là diện tích vùng sàn rỗng và vùng sàn đặc theo trục 1, A_{2r}, A_{2d} lần lượt là diện tích vùng sàn rỗng và vùng sàn đặc theo trục 2.

Kiểm chứng kết quả với các giá trị hình học ở hình 5 và 6, ta có: (i) phần diện tích có chứa lỗ rỗng (hình 6a) – chính là mặt cắt có dạng chữ I là $A_r = 1140 \text{ cm}^2$; phần sàn đặc có $I_d = 66 \times 32 = 2112 \text{ cm}^2$. Do vậy $k_{11} = 1140 / 2112 = 0.54$. Giá trị này nhỏ hơn giá trị so với giá trị tính được từ phương pháp số (0.57) là 4.4%, do bỏ qua phần diện tích sườn đặc nằm vuông góc với phương truyền lực.

Lưu ý rằng công thức (1) và (2) chỉ nên áp dụng được cho trường hợp kích thước sườn ngang không lớn hơn chiều rộng hộp. Trong trường hợp kích thước sườn ngang đủ lớn, dòng lực sẽ truyền

vào sườn ngang và do vậy sườn ngang sẽ tham gia chịu lực cùng sườn dọc và các cánh dọc.

3.2 Thông số $\phi_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$

Tương tự với phương pháp như tính toán cho lực dọc trục, có thể tính các hệ số liên quan đến độ cứng trượt bằng cách tác dụng ứng suất tiếp xúc τ trên mặt phẳng. Ví dụ để tính ϕ_{12} , áp dụng lên mặt fx_1 ứng suất tiếp (ở đây lấy bằng 1 MPa), theo phương 2 (hình 8a). Các điều kiện biên khác còn lại như sau:

- Mặt fx_0: $u_{11} = 0, u_{22} = 0$.
- Mặt fx_1: các chuyển vị u_{11}, u_{22}, u_{33} của tất cả các điểm trên mặt này bằng nhau.
- Mặt fz_0: $u_{33} = 0$.
- Mặt fz_1: chuyển vị u_{33} như nhau.

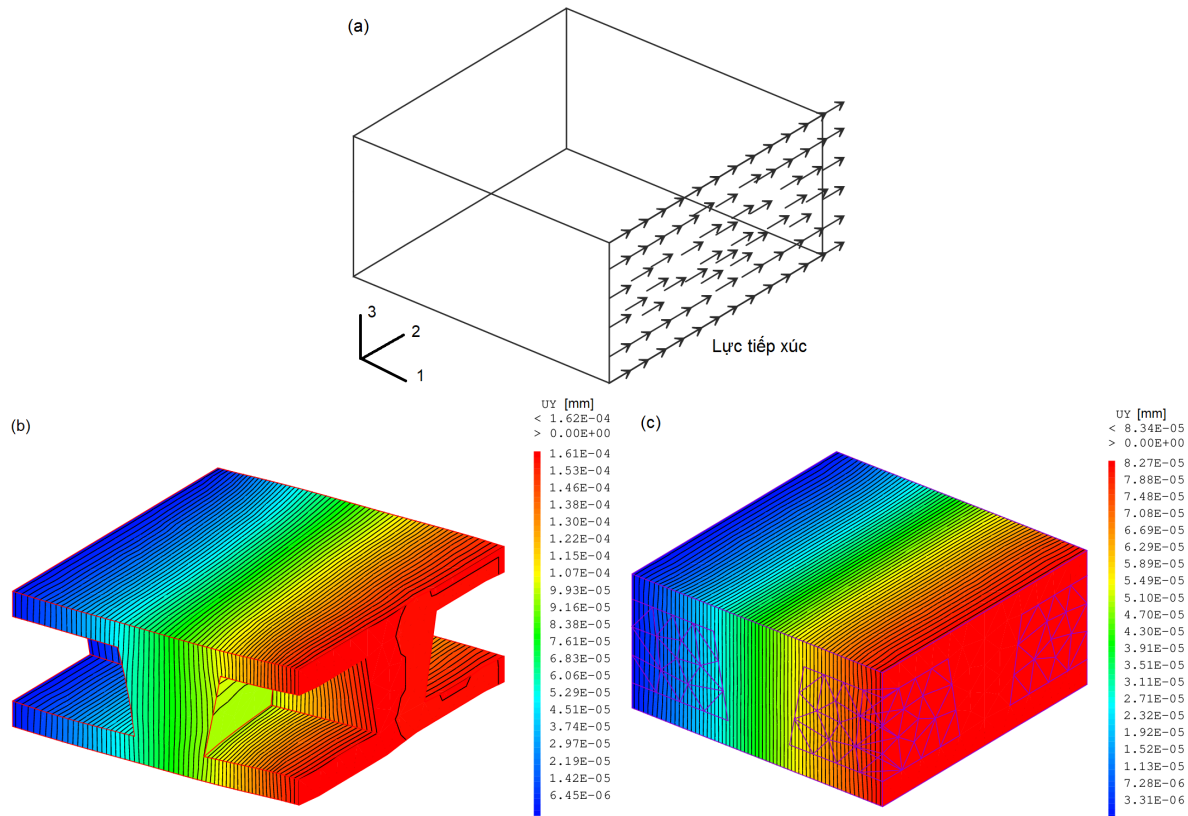
Từ kết quả của chuyển vị, ta tính được góc trượt trung bình. Ví dụ với tình huống ở hình 8, ta tính $\bar{\gamma}_{12}$ cũng là $\bar{\gamma}_{xy}$ bằng cách tích phân góc trượt trên toàn bộ thể tích, sau đó chia cho toàn bộ thể tích của RVE, ta có:

- Tính toán trên RVE rỗng: $\bar{\gamma}_{12} = 14 \times 10^{-5} \text{ rad}$.
- Tính toán trên RVE đặc: $\bar{\gamma}_{12} = 8.42 \times 10^{-5} \text{ rad}$

Chú ý rằng giá trị $\bar{\gamma}_{12}$ tính trên khối đặc có thể thực hiện bằng giải tích theo công thức: $\bar{\gamma}_{12} = \tau / G$ với $G = E / 2 / (1 + \nu)$. Tỉ số giữa góc trượt rỗng và

góc trượt đặc là: $\phi_{12} = 8.42 / 14 = 0.6$.

Tương tự, đối với ví dụ trên ta có thể tính được các thành phần: $\phi_{13} = 0.42$, $\phi_{23} = 0.42$.



Hình 8. Chuyển vị theo phương 2 khi đặt lực trượt trên mặt fx_1 theo phương 2 (phương y)

3.3 Thông số μ_{11} , μ_{22}

Thông số μ_{11} , μ_{22} được trình bày kỹ trong bài báo [4], dựa trên nguyên lý tương tự: thực hiện mô phỏng phần tử hữu hạn theo mô hình thực (3D), so sánh kết quả chuyển vị với lý thuyết hoặc với kết quả tính được theo mô hình sàn đặc. Ở đây tác giả chỉ nhắc lại công thức:

$$\mu_{11} = \frac{I_{1r} \ell_{1r} + I_{1d} \ell_{1d}}{I_{1d} (\ell_{1r} + \ell_{1d})} \quad (3)$$

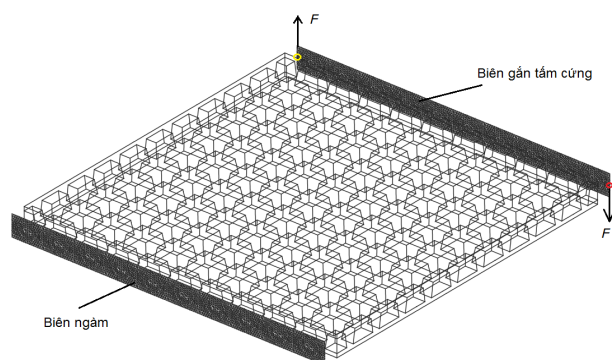
$$\mu_{22} = \frac{I_{2r} \ell_{2r} + I_{2d} \ell_{2d}}{I_{2d} (\ell_{2r} + \ell_{2d})} \quad (4)$$

trong đó: I_{1r} và I_{1d} lần lượt là mô men quán tính của mặt cắt RVE rỗng và đặc theo phương 1 (mặt cắt vuông góc với phương 1); I_{2r} và I_{2d} lần lượt là mô men quán tính của mặt cắt RVE rỗng và đặc theo phương 2 (mặt cắt vuông góc với phương 2); ℓ_{1r} và ℓ_{1d} lần lượt là kích thước của phần rỗng và phần đặc theo phương 1 và phương 2. Các phương ở đây được lấy theo hình 3.

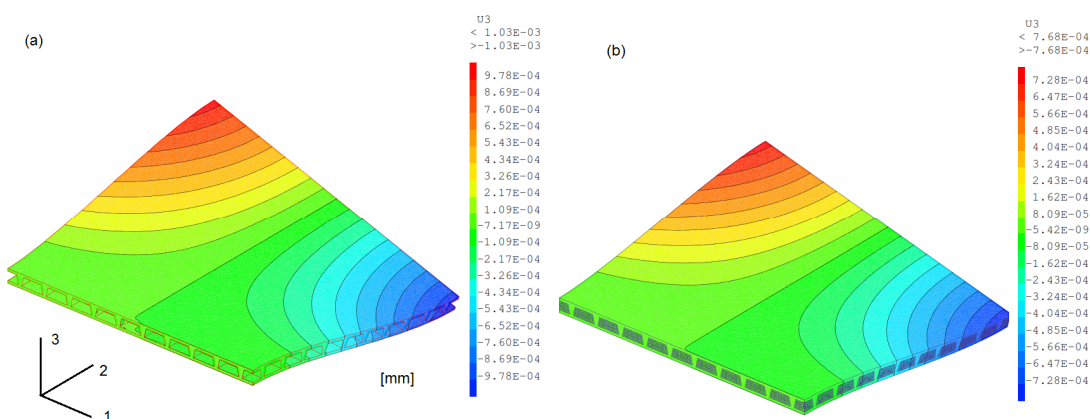
3.4 Thông số μ_{12}

Để tính toán thông số μ_{12} , có thể thực hiện một “thí nghiệm số” xoắn tám đặc và tám có chứa các lỗ rỗng. Ví dụ có thể thực hiện theo sơ đồ trên hình 9. Tám xem xét có dạng hình vuông, một biên bị ngàm cứng. Trên biên đối diện với biên ngàm, một tám cứng được gắn vào để chịu tác dụng một cặp ngẫu lực xoắn (do một cặp ngẫu lực sinh ra), hai biên còn lại tự do. Kết quả “thí nghiệm số” trên tám rỗng và đặc cho góc xoắn của mặt cắt chịu ngẫu lực xoắn. Tỉ số góc xoắn tính được giữa tám đặc và rỗng chính là thông số thay đổi độ cứng chống xoắn μ_{12} .

Tám “thí nghiệm” cần đủ lớn để xét sự tương tác giữa các phần tử đặc trưng cũng như thỏa mãn điều kiện sàn có thể mô phỏng là tám mỏng (shell thin) trong mô hình phần mềm Etabs. Kích thước tám thí nghiệm nên được lấy lớn hơn 10 lần chiều dày sàn. Với sơ đồ “thí nghiệm” như hình 10 và các kích thước như hình 4 và 5, kết quả thu được trình bày như hình 10, ta $\mu_{12} = 0.745$.



Hình 9. Ví dụ mô hình mô phỏng tấm chịu xoắn



Hình 10. Ví dụ kết quả mô phỏng sự xoắn của sàn để tìm hệ số μ_{12}

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, tác giả đã trình bày về mô hình phần tử vỏ mỏng tính toán sàn trong phần mềm Etabs và các thông số cần can thiệp trong mô hình để mô phỏng kết cấu sàn có chứa lỗ rỗng (thông số biến đổi độ cứng của vỏ – Shell Assignment – Stiffness Modifier). Các thông số này được lần lượt nghiên cứu để tìm ra giá trị của chúng. Thông số kéo (nén), uốn có thể tính toán dựa vào công thức giải tích cho trường hợp đơn giản như cấu trúc rỗng có dạng hình hộp chữ nhật hoặc gần như hình hộp chữ nhật, sắp xếp đều đặn. Trong trường hợp cấu trúc lỗ rỗng có dạng phức tạp hoặc phân bố không đều đặn, cần tiến hành mô phỏng 3D trên phần tử đặc trưng với điều kiện biên phù hợp hoặc trên toàn bộ kết cấu hoặc thí nghiệm để tìm ra các thông số điều chỉnh các thành phần độ cứng một cách chính xác.

Lưu ý rằng, trong quá trình áp dụng, cần phải chú ý đến các trục của phần tử và phương của sàn để có các khai báo phù hợp.

Phương pháp tính toán đã được kiểm chứng cho nhiều tình huống khác nhau và có thể áp dụng vào thực tiễn thiết kế tính toán công trình nhà.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài do Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) theo hợp đồng số 107.01-2016.17. Tác giả xin bày tỏ lòng cảm ơn chân thành.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Thế Dương (2017), Sử dụng sàn rỗng cho công trình dân dụng: Nguyên lý tính toán, thiết kế, thi công và hiệu quả kinh tế, *Hội thảo Toàn quốc lần thứ 30 - Hội Kết cấu và Công nghệ Xây dựng Việt Nam, Hà Nội*.
- [2] CEA, Phần mềm Cast3m, (n.d.). www-cast3m.cea.fr (truy cập tháng 11, 2018).
- [3] CSI - Computer and Structure Inc., (n.d.). <https://www.csiamerica.com/products/etabs> (truy cập tháng 11, 2018).
- [4] Nguyễn Thế Dương (2018), Thông số cơ học tương đương trong tính toán chịu uốn sàn rỗng bê tông cốt thép, *Tạp chí Xây dựng - Bộ Xây dựng* (ISSN 0866-0762), tháng 9, 209 - 211.

Ngày nhận bài: 05/10/2018.

Ngày nhận bài sửa lần cuối: 26/11/2018.

