Nghiên cứu ảnh hưởng hình dạng khối rỗng đến ứng xử của phần cầu nối dạng bản rỗng của cầu kết nối khu dân cư Him Lam

■ **TS. LÊ BÁ KHÁNH; KS. PHAN LÊ THANH**
Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

TÓM TẮT: Mục tiêu của bài báo là khảo sát ảnh hưởng của việc thay đổi hình dạng và kích thước khối rỗng đến ứng xử của cầu dạng bản rỗng. Bài báo áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) để phân tích sự phân bố ứng suất và chuyển vị của phần cầu nối dạng bản rỗng của cầu kết nối khu dân cư Him Lam. Bản sàn dạng khối rỗng được mô hình hóa bằng phần tử khối 3D. Ứng xử của bản được phân tích bằng phần mềm PTHH Abaqus/CAE theo phân tích tuyến tính. Các hình dạng khối rỗng được mang ra so sánh gồm hình tròn, hình elip, hình capsule và hình chữ nhật. Kết quả phân tích cho thấy, các khối rỗng ảnh hưởng không đáng kể đến phân bố ứng suất dọc, nhưng lại ảnh hưởng rất lớn đến phân bố ứng suất ngang, qua đó tìm được hình dạng khối rỗng phù hợp trong cùng điều kiện về khối lượng và vật liệu bản.

TỪ KHÓA: Bản rỗng, phần tử hữu hạn, hình dạng khối rỗng, phân tích tuyến tính, ABAQUS

ABSTRACT: The aim of paper is to evaluate influences of changing the shape and size of voids for the structural behavior of voided slab bridge decks. The paper use finite element method to analysis the stress distribution and deflection of voided slab bridge decks of the bridge connecting him lam residential area. Voided slab bridge deck is simulated with 3D solid elements. The structural behavior of voided slab is calculated by the ABAQUS/CAE software in a linear analysis. The shapes of void such as circular, elliptical, capsular, rectangular shape are compared. The analytical results show that the voids negligible influence on the longitudinal stress distribution, but greatly influence on the transverse stress distribution. And thereby find the suitable void shape under the same conditions of weight and material of voided slab.

KEYWORDS: Voided slab, finite element, void shape, linear analysis, ABAQUS

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

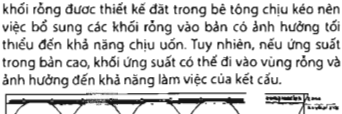
Cầu bản dạng khối rỗng ngày nay đang được sử dụng rộng rãi. Các khối rỗng được đưa vào bản giúp tạo ra ưu điểm là tiết kiệm vật liệu, giảm tĩnh tải nhưng vẫn đảm bảo khả năng chịu lực. Tuy nhiên, các khối rỗng nằm trong cầu bản đã làm thay đổi ứng xử của bản và làm phức tạp hóa việc phân tích kết cấu cho loại cầu này. Các khối rỗng được đưa vào sử dụng có nhiều loại khác nhau như hình tròn, hình chữ nhật, hình elip, hình capsule... và việc tìm hiểu xem hình dạng nào tạo ra kết cấu tốt hơn cũng như ứng xử của cầu bản thay đổi như thế nào là điều cần thiết. Nội dung của bài báo tập trung vào việc khảo sát ảnh hưởng của việc thay đổi hình dạng và kích thước khối rỗng đến ứng xử của cầu bản dạng bản rỗng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA KHỐI RỖNG ĐẾN ỨNG XỬ KẾT CẤU BẰNG ABAQUS

Các khối rỗng nằm trong bản rỗng đã làm thay đổi ứng xử của bản, cụ thể là ứng xử về uốn, cắt và biến dạng của khối rỗng.

2.1. Ứng xử uốn

Trong thiết kế bê tông cốt thép, người ta thường cho rằng chỉ có bê tông chịu nén mới đóng góp độ cứng uốn khi chịu uốn và bê tông chịu kéo bị bỏ qua. Vì các khối rỗng được thiết kế đặt trong bê tông chịu kéo nên việc bổ sung các khối rỗng vào bản có ảnh hưởng tối thiểu đến khả năng chịu uốn. Tuy nhiên, nếu ứng suất trong bản cao, khối ứng suất có thể đi vào vùng rỗng và ảnh hưởng đến khả năng làm việc của kết cấu.

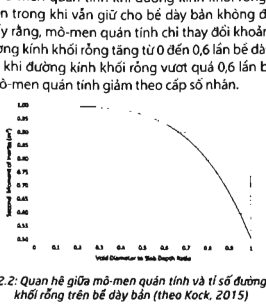


Hình 2.1: Vị trí của khối rỗng trong phần tử bê tông cốt thép chịu uốn (theo Bokil, 2010)

Mô-men quán tính của một bản rỗng với các khối rỗng nằm ở giữa bề dày bản có thể được tính bằng cách trừ đi mô-men quán tính của các khối rỗng từ bản đặc (theo Donohoe & Keogh, 2000):

$$J = J_{slab} - J_{voids} = \frac{bd^3}{12} - \frac{n\pi d_v^4}{64}$$

Trong đó: b - Bề rộng bản; *d* - Bề dày bản; *n* - Số lượng khối rỗng; d_v - Đường kính khối rỗng. *Hình 2.2* cho thấy, việc giảm mô-men quán tính khi đường kính khối rỗng được tăng lên trong khi vẫn giữ cho bề dày bản không đổi. Có thể thấy rằng, mô-men quán tính chỉ thay đổi khoảng 5% khi đường kính khối rỗng tăng từ 0 đến 0,6 lần bề dày bản. Nhưng khi đường kính khối rỗng vượt quá 0,6 lần bề dày bản, mô-men quán tính giảm theo cấp số nhân.



Hình 2.2: Quan hệ giữa mô-men quán tính và tỉ số đường kính khối rỗng trên bề dày bản (theo Kock, 2015)

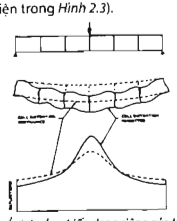
2.2. Ứng xử cắt

Theo Lai (2010), các mô hình lý thuyết cho thấy độ bền cắt của bản rỗng là khoảng 60% đến 80% so với bản đặc có cùng bề dày. Điều này thường được khắc phục bằng cách loại bỏ các khối rỗng xung quanh các khu vực có lực cắt cao như gối để tạo ra các dầm ngang kết hợp.

Theo Jackson (2008), với điều kiện đường kính khối rỗng nhỏ hơn 60% đô dày của bản, bản rỗng có thể được phân tích dưới dạng bản đặc mà không xem xét đến sự giảm sức kháng cắt. Nếu các khối rỗng lớn hơn, sự giảm sức kháng cắt phải được tính đến. Khả năng kháng cắt có thể được tăng lên bằng cách loại bỏ đi các khối rỗng ở các khu vực chịu cắt cao và cũng có thể thông qua việc sử dụng các bản sườn với bề dày tối thiểu giữa những khối rỗng để bổ sung sự kháng cắt.

2.3. Biến dạng riêng của khối rỗng

Khi kích thước khối rỗng tăng lên, bản rỗng bắt đầu hoạt động theo cách tương tự như một dầm hộp với bản nắp, bản đáy ở trên và dưới khối rỗng, bản sườn ở giữa hai khối rỗng. Các bản nắp, bản đáy và bản sườn này bị uốn cong theo các trục riêng của chúng làm cho khối rỗng bị biến dạng méo mó so với hình dạng ban đầu (tạm gọi biến dạng này là biến dạng riêng của khối rỗng và được thể hiện trong *Hình 2.3*).



Hình 2.3: Ảnh hưởng biến dạng riêng của khối rỗng (theo Bakht et al., 1981a)

Việc bỏ qua biến dạng riêng của khối rỗng này có thể dẫn đến sự đánh giá thấp cả về các mô-men, lực cắt và chuyển vị. Bakht et al. (1981a) đề xuất rằng ảnh hưởng biến dạng riêng của khối rỗng có thể được tính bằng cách sử dụng phương pháp phân tích đơn giản (tức là bỏ qua biến dạng riêng này) nhưng phải bổ sung thêm sự gia tăng nhất định cho các mô-men, lực cắt và chuyển vị của mặt cắt ngang bản rỗng do biến dạng riêng này gây ra. Sự gia tăng này được biểu thị bằng ba thông số vô hướng và có thể được tính toán bằng những công thức đơn giản sau:

$$\alpha = \frac{D_{xy} + D_{yx} + D_x + D_y}{2(D_x D_y)^{0.5}}$$

$$\theta = \frac{b}{L}\left[\frac{D_x}{D_y}\right]^{0.25}$$

$$\delta = \frac{\pi^2 b}{L}\left[\frac{D_x}{n_y}\right]^{0.5}$$

Trong đó: D đại diện cho các hệ số độ cứng theo các hướng tương ứng, *b* là chiều rộng của bản, *L* là chiều dài nhịp và S_y là độ cứng cắt theo phương ngang trên mỗi đơn vị chiều dài (transverse shear rigidity per unit length).

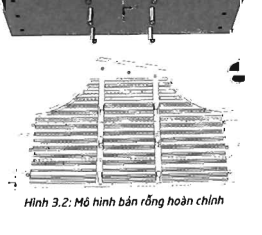
3. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

3.1. Thông số hình học của mô hình

Bài báo sử dụng mô hình lấy từ kích thước thực tế của phần cấu nối dạng bản rỗng của công trình cầu kết nối khu dân cư Him Lam qua rạch Bàng, phường Tân Phong, Quận 7, TP. Hồ Chí Minh. *Hình 3.1* và *Hình 3.2* thể hiện các kích thước cơ bản của mô hình (đơn vị sử dụng là mét).

Hình 3.1: Kích thước bản rỗng (chiều cao 1,45m) và thân trụ (chiều cao 3,5m)

Mô hình hoàn chỉnh được thể hiện trong *Hình 3.2*.



Hình 3.2: Mô hình bản rỗng hoàn chỉnh

3.2. Thông số vật liệu của mô hình

Vật liệu bê tông dùng cho bản rỗng trong mô hình được lấy theo hồ sơ thiết kế cầu kết nối khu dân cư Him Lam là bê tông thường có các đặc trưng như sau:

- Cường độ chịu nén $f'_c = 40MPa$;
- Khối lượng riêng $w_c = 2240 + 2{,}29f'_c = 2.331{,}6kg/m^3$ (theo TCVN 11823-3:2017);
- Mô-đun đàn hồi $E_c = 0{,}0017K_1w_c^2\sqrt{f'_c}^{0,33} = 31.220{,}3MPa$ (theo TCVN 11823-5:2017);
- Hệ số Poisson $\upsilon = 0{,}2$.

Tấm đệm thép tại gối có các đặc trưng như sau:

- Giới hạn chảy $f_y = 400MPa$;
- Khối lượng riêng $w_s = 7.850kg/m^3$;
- Mô-đun đàn hồi $E_s = 200.000MPa$;
- Hệ số Poisson $\upsilon = 0{,}3$.

3.3. Tải trọng

Hoạt tải HL-93 và tải trọng bản thân được dùng để tính toán bản rỗng.

Xe tải thiết kế được chọn có cự ly giữa 2 trục 145kN là 4,3m. Bề rộng mỗi vệt bánh xe theo quy định của trục 145kN và 35kN lần lượt là (0,5x0,25)m và (0,25x0,25)m, do đó áp lực trên mỗi vệt bánh xe khi đưa vào mô hình như sau:

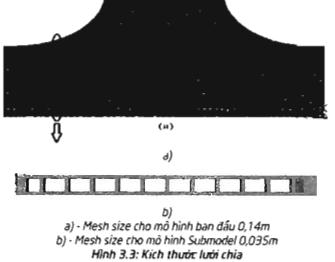
- Trục 145kN: $\frac{145}{2\times(0{,}5\times0{,}25)} = 580kN/m^2$;
- Trục 35kN: $\frac{35}{2\times(0{,}25\times0{,}25)} = 280kN/m^2$.

Áp lực tải trọng làn khi đưa vào mô hình là: (9,3kN/m)/3m = 3,1kN/m².

3.4. Loại phần tử và kích thước lưới chia

Toàn bộ mô hình sử dụng loại phần tử tứ diện bậc 2 có 10 nút C3D10.

Về kích thước lưới chia (mesh size) ban đầu chọn ở mức vừa phải, sau đó sử dụng kỹ thuật Submodeling trong phần mềm Abaqus/CAE để cắt nhỏ đến gần vị trí cần xem xét rồi mới tiến hành chia mịn (refinement) mô hình đã cắt. Trong bài báo này chọn mesh size cho mô hình ban đầu là 0,14m và mesh size ở bước Submodel là 0,035m, với bề rộng mô hình Submodel được cắt ra cho mỗi vị trí là 1,0m.



a) - Mesh size cho mô hình ban đầu 0,14m
b) - Mesh size cho mô hình Submodel 0,035m
Hình 3.3: Kích thước lưới chia

4. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH

4.1. Các trường hợp phân tích

** TH1*: Hình dạng khối rỗng được thay đổi từ hình chữ nhật sang hình tròn, hình elip và hình capsule. Các khối rỗng có cùng chiều cao và chiều dài, còn chiều rộng và khoảng cách giữa các khối rỗng được chọn sao cho tạo thành các bản rỗng có khối lượng bằng nhau. Chi tiết các kích thước khối rỗng được thể hiện trong *Bảng 4.1*.

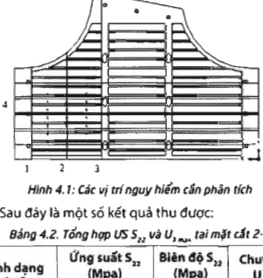
Bảng 4.1. Bảng các thông số hình dạng khối rỗng

Hình dạng khối rỗng	Kích thước (m)		KC tâm khối rỗng (m)	Khối lượng bản rỗng (kg)	Mômen quán tính I_m (m⁴)
	Chiều rộng	Chiều cao			
Chữ nhật	1,338	1,05	2,00	3322467,5	1,01E+9
Tròn	1,050	1,05	1,25	3322467,5	1,01E+9
Elip	1,701	1,05	2,00	3322467,5	1,02E+9
Capsule	1,567	1,05	2,00	3322467,5	1,02E+9

Tiến hành phân tích ứng suất và chuyển vị tại các vị trí nguy hiểm sau đây:

- Thớ biên trên và biên dưới của mặt cắt ngang tại giữa nhịp chính của bản rỗng (Mặt cắt 2-2).
- Thớ biên trên và biên dưới của mặt cắt ngang tại vị trí chuyển tiếp từ bản dạng rỗng sang bản dạng đặc (Mặt cắt 1-1 hoặc 3-3).
- Thớ biên trên và biên dưới của mặt cắt dọc đi qua trong tâm vùng đặt hoạt tải (Mặt cắt 4-4).

Các vị trí nguy hiểm được thể hiện trong *Hình 4.1*.

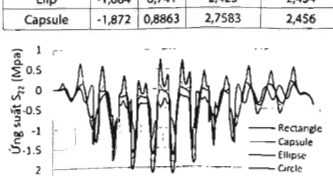


Hình 4.1: Các vị trí nguy hiểm cần phân tích

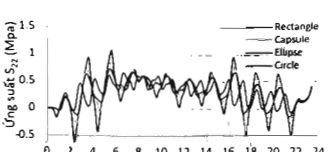
Sau đây là một số kết quả thu được:

Bảng 4.2. Tổng hợp ứng suất S_{22} và $U_{3,max}$ tại mặt cắt 2-2

Hình dạng khối rỗng	Ứng suất S_{22} (Mpa)		Biên độ S_{22} (Mpa)	Chuyển vị $U_{3\text{-}max}$ (mm)
	Min	Max	Max - Min	
Chữ nhật	-2,785	1,725	4,51	2,587
Tròn	-1,337	0,7701	2,1071	2,38
Elip	-1,684	0,741	2,425	2,434
Capsule	-1,872	0,8863	2,7583	2,456

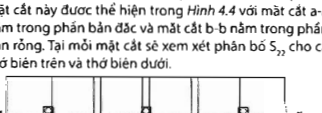


Hình 4.2: Phân bố ứng suất S_{22} cho thớ biên trên tại mặt cắt 2-2



Hình 4.3: Phân bố US S_{22} cho thớ biên dưới tại mặt cắt 2-2

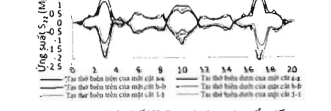
Tại mặt cắt 1-1 có sự biến đổi đột ngột về kết cấu bản nên phân bố ứng suất S_{22} trong bài báo này được xem xét theo ba mặt cắt cho vị trí chuyển tiếp này. Mặt cắt thứ nhất chính là mặt cắt 1-1, hai mặt cắt còn lại nằm về 2 bên mặt cắt 1-1 và cách mặt cắt 1-1 0,25m. Vị trí ba mặt cắt này được thể hiện trong *Hình 4.4* với mặt cắt a-a nằm trong phần bản đặc và mặt cắt b-b nằm trong phần bản rỗng. Tại mỗi mặt cắt sẽ xem xét phân bố S_{22} cho cả thớ biên trên và thớ biên dưới.



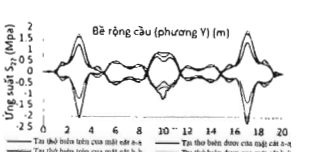
Hình 4.4: Vị trí ba mặt cắt để xem xét phân bố S_{22} tại vùng chuyển tiếp

Hình 4.5: Phân bố US S_{22} tại vùng chuyển tiếp với khối rỗng hình tròn

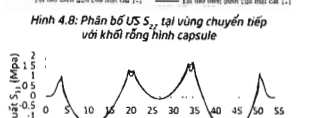
Hình 4.6: Phân bố US S_{22} tại vùng chuyển tiếp với khối rỗng hình chữ nhật



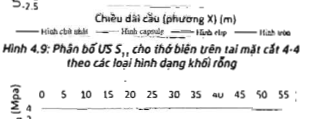
Hình 4.7: Phân bố US S_{22} tại vùng chuyển tiếp với khối rỗng hình elip



Hình 4.8: Phân bố US S_{22} tại vùng chuyển tiếp với khối rỗng hình capsule



Hình 4.9: Phân bố US S_{11} cho thớ biên trên tại mặt cắt 4-4 theo các loại hình dạng khối rỗng

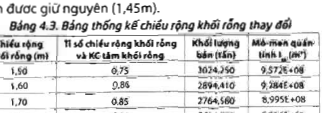


Hình 4.10: Phân bố US S_{11} cho thớ biên dưới tại mặt cắt 4-4 theo các loại hình dạng khối rỗng

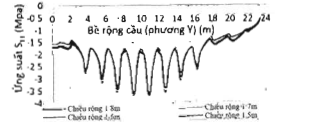
* *TH2*: Khối rỗng hình chữ nhật được giữ nguyên chiều cao (1,05m) và thay đổi chiều rộng. Chiều cao bản vẫn được giữ nguyên (1,45m).

Bảng 4.3. Bảng thống kê chiều rộng khối rỗng thay đổi

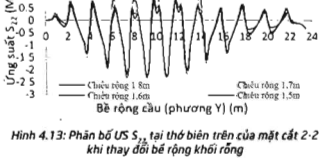
Chiều rộng khối rỗng (m)	Tỉ số chiều rộng khối rỗng và KC tâm khối rỗng	Khối lượng bản (tấn)	Mô-men quán tính I_{zz} (m⁴)
1,50	0,75	3024,250	9,572E+08
1,60	0,86	2894,410	9,384E+08
1,70	0,85	2764,560	8,995E+08
1,80	0,90	2634,770	8,706E+08



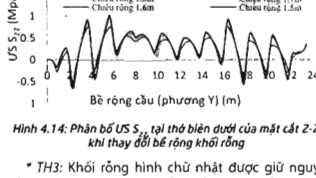
Hình 4.11: Phân bố US S_{11} tại thớ biên trên của mặt cắt 2-2 khi thay đổi bề rộng khối rỗng



Hình 4.12: Phân bố US S_{11} tại thớ biên dưới của mặt cắt 2-2 khi thay đổi bề rộng khối rỗng



Hình 4.13: Phân bố ỨS S_{22} tại thớ biên trên của mặt cắt 2-2 khi thay đổi bề rộng khối rỗng



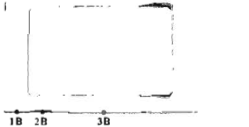
Hình 4.14: Phân bố US S_{22} tại thớ biên dưới của mặt cắt 2-2 khi thay đổi bề rộng khối rỗng

** TH3:* Khối rỗng hình chữ nhật được giữ nguyên chiều rộng (1,7m) và thay đổi chiều cao. Chiều cao bản vẫn được giữ nguyên (1,45m).

Bảng 4.4. Bảng thống kê chiều cao khối rỗng thay đổi

Chiều cao khối rỗng (m)	Tỉ số chiều cao khối rỗng và chiều cao bản	Khối lượng bản (tấn)	Mô-men quán tính I_x (m^4)
0,95	0,655	2077,230	9,473E+08
1,00	0,690	2070,900	9,234E+08
1,05	0,724	2764,580	8,995E+08
1,10	0,759	2658,260	8,756E+08

Trên *mặt cắt 2-2* tiến hành chọn ra ba vị trí đặc biệt để so sánh sự thay đổi ứng suất S_{22}, thể hiện trên *Hình 4.13.*



Hình 4.15: Ba vị trí dùng để so sánh ứng suất S_{22}

Vị trí 1: điểm giữa bản sườn (T - thớ biên trên; B - thớ biên dưới); Vị trí 2: điểm có ỨS cực đại gần kề góc khối rỗng; Vị trí 3: điểm giữa khối rỗng.

Bảng 4.5. Ứng suất S_{22} tại ba vị trí cần so sánh

Tỉ số chiều cao khối rỗng và chiều cao bản	Ứng suất S_{22} tại vị trí 1 (Pa)		Ứng suất S_{22} tại vị trí 2 (Pa)		Ứng suất S_{22} tại vị trí 3 (Pa)	
	1T	1B	2T	2B	3T	3B
0,655	382991	-767733,5	509753	-475903	-376984	283293
0,690	389350	-838338,1	602966	-571019	-380447	286628
0,724	1118237	-896932	705286	-693650	-345280	289940
0,759	1385425	-1081149	855287	-828459	-374656	308696

Chọn các giá trị trong dòng 1 của *Bảng 4.5* làm gốc so sánh, lập thành *Bảng 4.6* như sau:

Bảng 4.6. Bảng so sánh ứng suất S_{22}.

So sánh về tỉ số (%)	So sánh S_{22} tại vị trí 1 (%)		So sánh S_{22} tại vị trí 2 (%)		So sánh S_{22} tại vị trí 3 (%)	
	1T	1B	2T	2B	3T	3B
-	-	-	-	-	-	-
5,263	6,174	9,193	18,128	20,176	2,832	1,177
10,526	14,797	29,844	40,319	45,754	7,905	2,346
15,789	31,492	40,857	67,783	74,081	17,086	7,343

4.2. Nhận xét kết quả

Bảng 4.2 và Hình 4.2, 4.3 cho thấy biên độ dao động của S_{22} và giá trị $U_{1,max}$ đều có sự sắp xếp theo thứ tự từ nhỏ đến lớn như sau: Tròn < Elip < Capsule < Chữ nhật. Điều này chứng tỏ với khối rỗng hình tròn, ứng suất S_{22} được phân bố đồng đều hơn, sự chênh lệch về ứng suất S_{22} giữa các vị trí là nhỏ nhất, từ đó tạo nên một kết cấu làm việc hiệu quả hơn các loại khối rỗng khác. Thứ tự trên cũng là thứ tự về độ hiệu quả (với cùng trọng lượng và vật liệu tạo nên kết cấu chịu lực tốt hơn) của bản rỗng do sự thay đổi của hình dang khối rỗng gây ra.

Các *Hình 4.5 - 4.8* cho thấy phân bố ứng suất S_{22} có khuynh hướng dần ít lượn sóng hơn khi thay đổi từ vùng bản rỗng sang vùng bản đặc chứng tỏ sự hiện diện của dầm ngang đã làm giảm đi đáng kể ảnh hưởng của các khối rỗng đến phân bố ứng suất S_{22}. Tuy nhiên, đường phân bố ứng suất S_{22} tại mặt cắt a-a vẫn có sự lươn sóng nhẹ cho thấy do chuyển tiếp quá đột ngột từ dạng bản rỗng sang bản đặc nên trong một vùng nhỏ của bản đặc vẫn còn bị ảnh hưởng bởi các khối rỗng.

Các *Hình 4.5 - 4.8* cũng cho thấy tại ba khu vực gối S_{22} đều khá lớn, tuy nhiên với khối rỗng hình tròn S_{22} có độ lớn khá đồng đều nhau tại cả ba khu vực gối, còn các khối rỗng hình khác có S_{22} tại khu vực hai gối bên lớn hơn khá nhiều so với gối còn lại. Độ lớn ứng suất S_{22} lớn nhất (S_{22-max}) của hình tròn vẫn nhỏ hơn các hình khác dù tại khu vực gối giữa ứng suất S_{22} của hình tròn là lớn nhất. Chính sự tăng đó lớn S_{22} tại khu vực gối giữa đã kéo giảm S_{22} tại khu vực hai gối bên và kết quả là hình tròn có độ lớn S_{22-max} nhỏ nhất.

Hình 4.9, 4.10 cho thấy, các đường ứng suất S_{11} với các loại hình dạng khối rỗng khác nhau thì khá tương đồng nhau. Rõ ràng hình dạng các khối rỗng không ảnh hưởng đến sự phân bố ứng suất S_{11}.

Các *Hình 4.11 - 4.14* cho thấy rằng, cả S_{11} và S_{22} đều tăng khi chiều cao (hoặc chiều rộng) khối rỗng tăng, điều này được cho là do khi các khối rỗng tăng chiều cao (hoặc chiều rộng) đã làm giảm mô-men quán tính của bản rỗng và làm giảm bề dày bản nắp, bản đáy (hoặc tăng khẩu độ bản nắp, bản đáy) khiến khối rỗng bị biến dạng riêng (khối rỗng bị méo mó) dưới tác dụng của tải trọng.

Bảng 4.5, 4.6 cho thấy mức độ tăng ứng suất tại điểm 2T, 2B là lớn nhất và tại điểm 3T, 3B là nhỏ nhất khi tăng chiều cao khối rỗng. Mức độ tăng này càng lớn khi chiều cao khối rỗng càng lớn. Các điểm 2T, 2B có ứng suất S_{22} cực đại và nằm trong phạm vi cách điểm 1T, 1B từ 0,2m đến 0,3m (cách góc khối rỗng từ 0,05 đến 0,15m).

Kết quả này càng cho thấy rõ về sự biến dạng riêng của khối rỗng trong quá trình làm việc. Đấy là tính chất đặc thù của bản rỗng.

5. KẾT LUẬN

Qua phân tích có thể rút ra một số kết luận sơ bộ sau:

- Trong cùng điều kiện về khối lượng vật liệu, hiệu quả làm việc của bản dạng khối rỗng được sắp xếp theo thứ tự từ thấp đến cao theo hình dạng khối rỗng như sau: hình chữ nhật < hình capsule < hình elip < hình tròn.

- Hình dạng các khối rỗng không ảnh hưởng đến sự phân bố ứng suất theo chiều dài khối rỗng mà chỉ làm thay đổi độ lớn ứng suất do các khối rỗng làm thay đổi mô-men quán tính của bản. Ngược lại, sự phân bố ứng suất theo phương vuông góc với chiều dài khối rỗng chịu ảnh hưởng nặng nề bởi hình dạng khối rỗng gây ra. Các khối rỗng gây ảnh hưởng lớn nhất tại giữa nhịp và giảm dần khi về gần đầm ngang.

- Đối với khối rỗng hình chữ nhật thì tại các vị trí cách góc khối rỗng từ 5cm đến 15cm sẽ xảy ra sự tập trung ứng suất tại thớ biên trên và biên dưới, kết quả của việc khối rỗng bị biến dạng méo mó khi chịu tải, do đó cần lưu ý đến vấn đề này khi thực hiện dạng cấu này.

Tài liệu tham khảo

[1]. P. K. I. a. C. Sam (December 1991), *"Engineering Mechanics", 3-D Elastic Analysis of Three Pile Caps*, vol.117, no.12, pp.2862-2883.

[2]. Z. Ming-hua (2008), *3D finite element analysis on pile-soil interaction of passive pile group*, J.Cent. South Univ, Technol, vol.15, pp.75-80.

[3]. Đỗ Kiến Quốc, Nguyễn Thị Hiền Lương, Bùi Công Thành, Lê Hoàng Tuấn, Trần Tấn Quốc (2011), *Giáo trình Sức bền vật liệu*, NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.

[4]. P. G. a. J. M. R. Maryam Mardfekri (2013), *Modeling Laterally Loaded Single Piles Accounting for Nonlinear Soil-Pile Interactions*, Journal of Engineering, vol.2013.

[5]. A. Help, SOLID 187 Element Description, *Contains proprietary and confident information of ANSYS*, Inc.

Ngày nhận bài: 10/3/2020
Ngày chấp nhận đăng: 14/4/2020
Người phản biện: TS. Nguyễn Cảnh Tuấn
TS. Huỳnh Ngọc Thi