

Ứng dụng mạng lưới lò xo vào xử lý ổn định toàn khối nền đất yếu tại đồng bằng sông Cửu Long

Nguyễn Thế Anh¹

¹Khoa Xây Dựng, Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

Xử lý nền đất yếu
 Gia cố nông
 Xi măng trộn đất
 Môi trường rỗng
 Mạng lưới lò xo
 LSM
 LSMnS

KEYWORDS

Cement-soil mixing method
 Soil improvement
 Porous media
 Lattice Spring Models
 LSMnS

TÓM TẮT

Nội dung bài báo này nhằm nghiên cứu hiệu quả của phương pháp gia cố nông nền đất yếu tại khu vực đồng bằng sông Cửu Long thông qua phương pháp mô phỏng số. Phương pháp trộn nông xi măng đất được đề xuất và hiệu quả của nó được đánh giá thông qua mô hình LSMnS; đây là mô hình mới được phát triển từ mô hình mạng lưới lò xo đàn hồi (LSM) để có thể tính toán các tính chất cơ học của môi trường rỗng với một hay nhiều thành phần rắn khác nhau. Tính đúng đắn của LSMnS được kiểm tra dựa trên sự so sánh với các công cụ và mô hình sẵn có, sai số lớn nhất luôn nhỏ hơn 1,6 %. Mô hình này được áp dụng để tính các mô đun đàn hồi hữu hiệu của một số mẫu đất với tỷ lệ xi măng trộn khác nhau nhằm đánh giá sự tăng cường tính chất của các mẫu trộn này. Kết quả cho thấy mô đun cứng và cắt hữu hiệu tăng tới 47 % và 50 % khi hàm lượng xi măng ở mức 13 %.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to study the effectiveness of various soft soil improvement methods in the Mekong delta by modelisation. The shallow soil-cement mixing method was proposed and its performance can be evaluated by lattice spring model for many solids (LSMnS) that was extended from the basic model (LSM) to determinate effective mechanical properties of porous media with one or many solid components. This model was validated by comparisons with the other existing models, the maximal difference was always less than 1.6 %. Various soil-cement mixed samples with different cement proportions were simulated to investigate their different physical properties in order to evaluate the shallow soil-cement mixing method. It is demonstrated that the effective bulk modulus K_e and shear modulus G_e are increased by 47 % and 50 %, respectively, when the cement proportion is equal to 13 %.

1. Giới thiệu

Vấn đề xử lý nền đất yếu đã xuất hiện từ rất lâu và được nghiên cứu nhiều trên thế giới. Hiện tại đã có nhiều phương pháp được các nhà khoa học đề xuất để xử lý nền đất yếu trong ngành xây dựng và giao thông được công bố trên các tạp chí. Điều đó nói lên tầm quan trọng của nghiên cứu này nhằm giải quyết các vấn đề về dân sinh cũng như phát triển cơ sở hạ tầng không chỉ ở Việt Nam mà còn trên thế giới.

Tsytoich và cộng sự (1974) đã đề xuất phương pháp sử dụng cọc cát, giếng cát phổ biến ngày nay. Ống thép được cắm vào đất làm cho nền tảng được ép chặt lại. Đất được nén chặt thêm bởi quá trình tạo ra lỗ khoan. Còn nước ở trong đất thì sẽ bị nén cho thoát ra ngoài lỗ khoan được nhồi cát. Thi công kiểu này cũng đơn giản và bằng vật liệu tương đối rẻ tiền từ sạn sỏi hoặc cát thô cho nên có chi phí tương đối thấp hơn đệm cát, các loại móng bê tông, các loại chuyên dùng để xử lý nền đất khác. Sản phẩm này chuyên được dùng để gia cố cho phần đất yếu dày

hơn 3 mét. Độ rỗng của đất được giảm xuống do đất được nén chặt thêm nên từ đó tính chất của nền cọc cát được cải thiện.

Phương pháp đầm chặt đất bằng đầm rung sâu được đề xuất bởi Moseley và Kirsch (1993), một thanh thép được đưa xuống đến độ sâu quy định và một máy rung tạo ra dao động theo phương ngang và phương thẳng đứng làm cho đất nền được đầm chặt trong khi thanh thép được rút dần lên. Độ sâu và khoảng cách đầm phụ thuộc vào các yếu tố: độ lún toàn phần lớn nhất cho phép, độ lún lệch lớn nhất cho phép; sức chịu tải yêu cầu; sức kháng cắt cần đạt được và mức tăng sức kháng chống hoá lỏng.

Phương pháp trộn vôi và xi măng dưới sâu với cách trộn khô được trình bày trong nghiên cứu của Chida (1982). Cọc vôi thường được dùng để xử lý, nén chặt các lớp đất yếu như bùn, sét và sét pha ở trạng thái dẻo nhão. Việc sử dụng cọc vôi có những tác dụng sau đầm chặt, đường kính cọc vôi sẽ tăng lên 20 % làm cho đất xung quanh nén chặt lại ngoài ra nó toả ra một nhiệt lượng lớn làm cho nước lỗ rỗng

bốc hơi làm giảm độ ẩm và tăng nhanh quá trình nén chặt. Sau khi xử lý bằng cọc vôi nền đất được cải thiện đáng kể: độ ẩm của đất giảm 5 đến 8 %, lực dính tăng lên khoảng 1,5 đến 3 lần. Việc chế tạo cọc đất – xi măng cũng giống như đối với cọc đất – vôi, hàm lượng xi măng có thể từ 7 % đến 15 % và kết quả cho thấy sức kháng xuyên của đất nền tăng lên từ 4 đến 5 lần so với khi chưa gia cố.

Trong phương pháp điện thấm (Eggestad, 1983), 2 điện cực được đưa vào đất và khi nối với nguồn điện 1 chiều thì nước lỗ rỗng từ cực dương tới cực âm. Do hiệu ứng vật lý này, khu vực gần cực dương có áp lực nước lỗ rỗng thấp sẽ mở rộng dần theo thời gian và độ bền của đất tăng do hệ quả của sự cố kết của đất nền còn độ nén lún của đất thì giảm đi). Trong đất nén lún, điện thấm đẩy nước đến cực âm và ở đó nước được hút đi nên không quay trở lại cực dương. Sự cố kết đất xảy ra tương ứng với thể tích đất được hút đi.

Các phương pháp này đã tỏ ra hiệu quả và được áp dụng mạnh mẽ trong thực tế. Tuy nhiên, vẫn còn nhiều khó khăn tồn tại khi các địa chất khác nhau sẽ có hiệu quả khác nhau với từng phương pháp.

Hầu hết các phương pháp được nêu ở trên đều đã được nghiên cứu và ứng dụng ở Việt Nam, tuy nhiên, do sự khác nhau về địa chất nên cần có sự điều chỉnh để đem lại hiệu quả tốt hơn điển hình như phương pháp cọc cát (Nguyễn Đình Đức, 2009, Nguyễn Uyên, 2011), cọc xi măng đất (TCVN 385-2006, TCCS 05: 2010/VKHTLVN), bác thấm đứng (PVD) (TCVN 9355-2012), công nghệ khoan phụt cao áp (Nguyễn Quốc Dũng và cộng sự, 2005)... Trong thực tế, việc lựa chọn phương pháp nào đối với từng loại địa chất công trình là một nhiệm vụ khó khăn về kỹ thuật và kinh tế.

Thời gian gần đây, một số phương pháp hiện đại khác đã được các nhà khoa học trong nước nghiên cứu và đề xuất để phù hợp với điều kiện đặc thù của khu vực đồng bằng sông Cửu Long. Các nghiên cứu của Nguyễn Minh Đức và cộng sự (2018, 2019, 2020) đã chỉ ra rằng, nền đất điển hình ở đồng bằng sông Cửu Long có thành phần chủ yếu là đất sét hoặc bùn sét. Tác giả đề xuất sử dụng đệm cát kết hợp với sử dụng vải địa kỹ thuật nhằm làm tăng khả năng thoát nước trong đất cũng như tăng cường khả năng cố kết của đất như một giải pháp để gia cố nền đất yếu. Các kết quả chỉ ra rằng phương pháp này đem lại hiệu quả tốt để cải tạo nền đất san lấp bằng sét yếu hoặc bùn nạo vét lòng sông phù hợp với các loại công trình như đường giao thông nông thôn ở đồng bằng sông Cửu Long, tuy nhiên việc áp dụng với công trình xây dựng dân sinh, công trình móng nông còn đem lại nhiều khó khăn, chưa thực sự hiệu quả.

Nguyễn Sỹ Hùng và Hoàng Anh (2020) đã đề xuất phương pháp sử dụng túi đất D-box tương tự như viên nghiên cứu Nhật Bản để gia cố nền đất yếu bằng cát san lấp ở khu vực tỉnh An Giang. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng Việc sử dụng móng trên bao D - BOX là một giải pháp tốt cho nhà thấp tầng (có quy mô dưới 3 tầng). Sức chịu tải của móng

chủ yếu là do sức căng của bao D-BOX truyền vào vật liệu độn bên trong; áp lực truyền xuống lớp đất xấu phía dưới là không đáng kể. Tuy nhiên phương pháp này gặp khó khăn trong việc thi công đại trà khi túi D-BOX là không phổ biến dẫn đến khả năng áp dụng rộng rãi là hạn chế.

Trong nghiên cứu của Nguyễn Sỹ Hùng và Vương Hoàng Thạch (2020) đã bàn về các phương pháp gia cố nền đất phổ biến ở đồng bằng sông Cửu Long như phương pháp gia cố bằng cọc cừ tràm, cọc tre; phương pháp gia cố bằng cọc đá chẻ, cọc bê tông cốt thép, cọc xi măng đất trộn sâu và trộn nông. Theo kết quả của nghiên cứu này, phương pháp trộn đất tại chỗ với phương pháp trộn nông là phương pháp hữu hiệu để nhằm cải thiện các đặc tính kỹ thuật và môi trường đối với lớp đất nền mềm hoặc bị ô nhiễm.

Từ các kết quả trên có thể thấy rằng, phương pháp trộn nông xi măng đất để xử lý nền đất yếu, tạo sự ổn định toàn khối là một giải pháp phù hợp với khu vực đồng bằng sông Cửu Long. Do đó, đề tài này sẽ tập trung nghiên cứu hiệu quả của phương pháp trộn nông xi măng đất khi áp dụng cho địa chất điển hình của khu vực, có thành phần chính là sét nhão hoặc bùn sét yếu. Tuy nhiên, điểm mới của đề tài là không đi sâu vào nghiên cứu thực nghiệm, mà sẽ đánh giá hiệu quả phương pháp bằng cách xác định tính chất của đất sau khi được cải tạo bằng phương pháp mô phỏng số. Các mẫu đất trộn xi măng với các tỷ lệ khác nhau sẽ được số hóa, sau đó mô phỏng bằng phương pháp mạng lưới lò xo (Lattice spring model) để tính toán ra các đặc tính của mẫu như độ cứng hữu hiệu (Ke), mô đun cắt hữu hiệu (Ge), mô đun Young, hệ số Poisson nhằm đánh giá hiệu quả của việc trộn xi măng trong mẫu đất. Phương pháp gia cố nông đã được nhắc đến nhiều trước đây, bài báo này trình bày nghiên cứu phát triển mô hình LSM, LSMnS và áp dụng chúng vào mô phỏng các mẫu đất trộn xi măng với tỉ lệ khác nhau.

Việc xác định các tính chất cơ học của môi trường rỗng đã trở thành một chủ đề rất được chú ý, nó có ứng dụng rất lớn trong các mảng cơ học, vật lý, vật liệu và cả trong tính toán động đất. Các vật liệu rỗng được phát triển và dùng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp trong đó có cả ngành xây dựng.

Trước đây, việc tính toán các tính chất cơ học của môi trường rỗng rất phức tạp và khó khăn, nhiều phương pháp được sử dụng như phương pháp đồng nhất (homogenization method), (Malinouskaya, 2007), Buxton và cộng sự (2005), (Boutin và Auriault, 1990), phương pháp số học (Nemat-Nasser và Iwakuma, 1982), (Torquato, 1998) Cohen (2004)... Tuy nhiên các phương pháp này đều có nhiều hạn chế như khó khăn khi áp dụng cho các môi trường có thành phần phức tạp hoặc kích thước quá lớn. Sau đó, với sự tiến bộ của khoa học công nghệ, sự mạnh mẽ vượt bậc của các máy tính, nhiều công cụ số được đề xuất và sử dụng để giải quyết vấn đề trên ví dụ như công cụ giải số FMD của Malinouskaya (Malinouskaya, 2007) ...

Gần đây, mô hình mạng lưới lò xo (LSM) được phát triển bởi Padzniakou, (2012) nó có thể sử dụng trên các máy tính mạnh mẽ để mô phỏng và tính toán các môi trường đàn hồi kích thước lớn., sau đó mở rộng cho môi trường rỗng. Tuy nhiên, mô hình này chỉ được sử dụng cho môi trường rỗng với một pha rắn trong khi các môi trường thực tế thường có nhiều pha rắn và rỗng kết hợp với nhau.

Bài báo này giới thiệu các tính chất cơ bản của LSM như mô hình, các loại lò xo, phân tử đàn hồi, các điều kiện biên... và mở rộng nó thành mô hình LSMnS để áp dụng cho môi trường rỗng với nhiều pha rắn khác nhau. Sau đó, mô hình mới LSMnS được áp dụng để tính toán tenso độ cứng hữu hiệu và các mô đun đàn hồi (mô đun cứng, cắt...) của một số môi trường rỗng giả định và thực tế. Các kết quả này được so sánh với các phương pháp số học trước đây (Malinouskaya, 2007), (Nemat-Nasser và Iwakuma, 1982), (Torquato, 1998) Cohen (2004) và với kết quả thực nghiệm [7]. Các phép so sánh này cho thấy sự khác biệt luôn rất nhỏ (< 2 %). Do đó, mô hình LSMnS đã cho thấy được khả năng và sự chính xác của nó.

2. Mô hình mạng lưới lò xo cơ bản (Basic Lattice Spring Model)

2.1 3D LSM, lò xo đơn, lò xo góc

Phương pháp mạng lưới lò xo được dùng để mô phỏng môi trường đàn hồi, sau đó được mở rộng để tính toán các môi trường rỗng (Padzniakou, 2012). Trong mô hình 3D, mỗi thành phần rắn được thể hiện bởi lưới lập phương với 18 lò xo (Hình 1a). Các vecto tọa độ ứng với 6 nút lân cận loại 1 (màu xanh, Hình 1a) như sau

$$\mathbf{c}^{(b)} = (\pm a, 0, 0), (0, \pm a, 0), (0, 0, \pm a), \quad b = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

12 nút lân cận loại 2 được xác định bằng các vecto sau (màu đỏ, Hình 1a)

$$\mathbf{c}^{(b)} = (\pm a, \pm a, 0), (0, \pm a, \pm a), (\pm a, 0, \pm a), \quad b = 7, \dots, 18 \quad (2)$$

với a là kích thước cạnh khối lập phương cơ bản (màu đỏ, Hình 1b). Vecto đơn vị tương ứng theo cùng phương được xác định bởi

$$\mathbf{n}^{(b)} = \frac{\mathbf{c}^{(b)}}{|\mathbf{c}^{(b)}|} \quad (3)$$

Một vài nút mạng có thể được xem như nằm ở trung tâm của khối lập phương cơ bản (Hình 1b), khi đó, các vecto tương ứng là

$$\mathbf{r}^{(b)} = \frac{\mathbf{c}^{(b)}}{2} \quad (4)$$

Trong LSM, có 2 loại lò xo được tính toán là lò xo đơn nối hai nút mạng gần nhau và lò xo góc tạo bởi hai lò xo đơn trong cùng mặt phẳng. Trong đơn vị lưới lập phương, có 24 lò xo góc loại $\pi/3$ và 24 lò xo góc loại $\pi/4$ như thể hiện ở Hình 1c,d.

Năng lượng trong một đơn vị là một hàm phức tạp có thể biểu diễn qua chuyển vị và biến dạng góc. Nếu các điểm nút của một lò xo đơn là m và n thì chuyển vị của được tính theo

$$\mathbf{u}^b = \mathbf{u}_m - \mathbf{u}_n \quad (5)$$

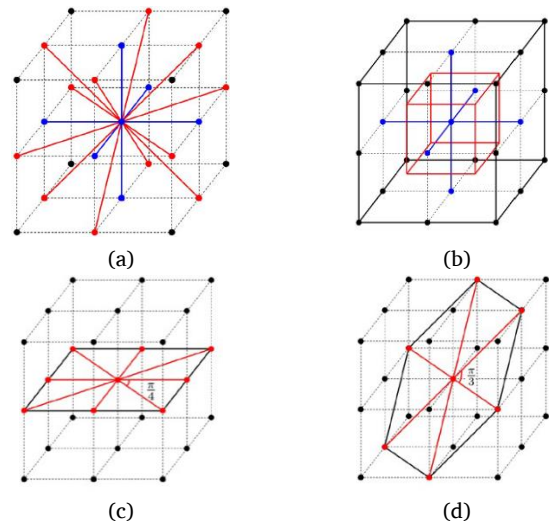
Nếu lò xo góc được hợp bởi 2 lò xo đơn b và b' , biến dạng góc có thể tính bằng

$$\Delta\varphi^{(b,b')} = \Delta\theta^{(b')} - \Delta\theta^{(b)} \quad (6)$$

Trong một khối lập phương cơ bản, độ dài của tất cả các lò xo đơn bằng một nửa độ dài ban đầu của nó. Do đó, hệ số đàn hồi lò xo $\kappa^{(b)} = 2\alpha^{(b)}$ với $\alpha^{(b)}$ là hệ số tương ứng với độ dài ban đầu. Lúc đó, tổng năng lượng trong một khối lập phương đơn vị được xác định bằng công thức

$$E = \frac{1}{2} \sum_b \kappa^{(b)} |\mathbf{u}^{(b)}|^2 + \frac{1}{2} \sum_{b,b'} \beta^{(b,b')} (\Delta\varphi^{(b,b')})^2 \quad (7)$$

với $\beta^{(b)}$ là hệ số lò xo góc.



Hình 1. Mô hình 3D LSM với 2 loại lò xo. a) 18 lò xo đơn. b) Lò xo góc $\pi/4$. c) Lò xo góc $\pi/3$.

Năng lượng của tất cả lò xo đơn trong một khối đơn vị được xác định bởi

$$E_c = \frac{1}{2} \sum_b \kappa^{(b)} |\mathbf{u}^{(b)}|^2 \quad (8)$$

Theo Pazniakou (2012), độ dịch chuyển tương đối $\mathbf{u}^{(b)}$ có thể tính thông qua tenso ứng suất như sau

$$u_i^{(b)} = \varepsilon_{ij} r_j^{(b)} = |\mathbf{r}^{(b)}| \varepsilon_{ij} n_j^{(b)} \quad (9)$$

Với chuyển vị bé, chúng ta có

$$|\mathbf{u}^{(b)}| = \mathbf{u}^{(b)} \cdot \mathbf{n}^{(b)} = |\mathbf{r}^{(b)}| \varepsilon_{ij} n_j^{(b)} n_i^{(b)} \quad (10)$$

Do đó, năng lượng E_c từ công thức (8) được thể viết lại như sau

$$E_c = \frac{1}{2} \sum_b \kappa^{(b)} |\mathbf{u}^{(b)}|^2 = \frac{1}{2} \sum_b |\mathbf{r}^{(b)}|^2 |n_i^{(b)} n_j^{(b)}| n_k^{(b)} n_l^{(b)} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} \quad (11)$$

Và mật độ năng lượng đàn hồi trong khối đơn vị

$$W_C = \frac{E_C}{V} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{a^3} \sum_b \mathbf{r}^b |n_i^{(b)} n_j^{(b)} n_k^{(b)} n_l^{(b)}| \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} \right] \quad (12)$$

Từ đó, ta có thể xác định tenso độ cứng đơn tương ứng với các lực tập trung

$$C_{ijkl}^{(cf)} = \frac{1}{a^3} \sum_b \mathbf{r}^b |n_i^{(b)} n_j^{(b)} n_k^{(b)} n_l^{(b)}| \quad (13)$$

Với cùng một giá trị của $\kappa^{(b)}$, các hệ số của tenso độ cứng được tính như sau

$$C_{xxxx}^{cf} = \frac{3\alpha}{a}; \quad C_{xxyy}^{cf} = \frac{\alpha}{a}; \quad C_{xyxy}^{cf} = \frac{\alpha}{a} \quad (14)$$

Tương tự, từ mật độ năng lượng của lò xo góc trong một khối đơn vị, các hệ số tenso độ cứng góc tương ứng được xác định như sau

$$C_{xxxx}^{(af)} = \frac{8\beta}{a^3}; \quad C_{xxyy}^{(af)} = -\frac{4\beta}{a^3}; \quad C_{xyxy}^{(af)} = \frac{6\beta}{a^3} \quad (15)$$

Từ đó, ta có thể xác định được tenso độ cứng tổng từ các tenso đơn và góc tương ứng là

$$C_{xxxx} = \frac{3\alpha}{a} + \frac{8\beta}{a^3}; \quad C_{xxyy} = \frac{\alpha}{a} - \frac{4\beta}{a^3}; \quad C_{xyxy} = \frac{\alpha}{a} + \frac{6\beta}{a^3} \quad (16)$$

Do đó, các tính chất của môi trường có thể xác định như sau

$$\lambda_s = \frac{\alpha}{a} - \frac{4\beta}{a^3}; \quad \mu_s = \frac{\alpha}{a} + \frac{6\beta}{a^3}; \quad K = \frac{5\alpha}{a}; \quad \nu = \frac{\alpha - \frac{4\beta}{a^3}}{4\alpha + \frac{4\beta}{a^2}} \quad (17)$$

Với λ_s và μ_s là các hệ số Lamé, K mô đun cứng và ν hệ số Poisson.

2.2 Xác định ứng suất hữu hiệu bằng thuật toán lặp Velvet Buxton và cộng sự (2005)

Theo Pazdaniakou, lực tác động bởi các lò xo đơn lên các nút mạng i được thể hiện bởi

$$F_i = \alpha \sum_n ((\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_i) \cdot \hat{\mathbf{c}}_{i,n}) \hat{\mathbf{c}}_{i,n} \quad (18)$$

trong đó $\hat{\mathbf{c}}_{i,n}$ là vecto chuẩn hóa nối các nút i và n . Và lực tác động bởi lò xo góc b - i - b' lên các nút cuối b , b' và nút góc i được tính bằng

$$F^{(b)} = \beta \Delta \phi(b, b') \frac{\mathbf{n}^{(b)} \times \mathbf{n}^{(b')}}{|\mathbf{n}^{(b)} \times \mathbf{n}^{(b')}| |\mathbf{c}^{(b)}|} \quad (19)$$

$$F^{(b')} = \beta \Delta \phi(b, b') \frac{\mathbf{n}^{(b')} \times \mathbf{n}^{(b)}}{|\mathbf{n}^{(b')} \times \mathbf{n}^{(b)}| |\mathbf{c}^{(b')}|}$$

$$F^{(i)} = (F^{(b)} + F^{(b')})$$

Để xác định tenso độ cứng hữu hiệu của môi trường rỗng bằng mô hình LSM, điều kiện biên không gian theo chu kỳ (spatial periodic boundary condition) cần được áp dụng (xem chi tiết trong (Malinouskaya, 2007), (Padzaniakou và Adler, 2013)). Sau đó, thuật toán Velvet có thể được áp dụng để xác định sự phát triển của trường chuyển

vị nhưng cần chú ý thêm một hệ số nhớt θ nhằm giảm sự rung động trong mô phỏng (Buxton và cộng sự, 2005). Thuật toán Velvet được thể hiện như sau

$$\mathbf{v}_i(t + \frac{\delta t}{2}) = \mathbf{v}_i(t) + \frac{\mathbf{a}_i(t)}{2} \delta t$$

$$\mathbf{u}_i(t + \delta t) = \mathbf{u}_i(t) + \mathbf{v}_i(t + \frac{\delta t}{2}) \delta t \quad (20)$$

$$\mathbf{a}_i(t + \delta t) = \frac{\mathbf{F}_i(t + \delta t)}{m_i} - \theta \mathbf{v}_i(t + \frac{\delta t}{2})$$

$$\mathbf{v}_i(t + \delta t) = \mathbf{v}_i(t + \frac{\delta t}{2}) + \frac{\mathbf{a}_i(t + \delta t)}{2} \delta t$$

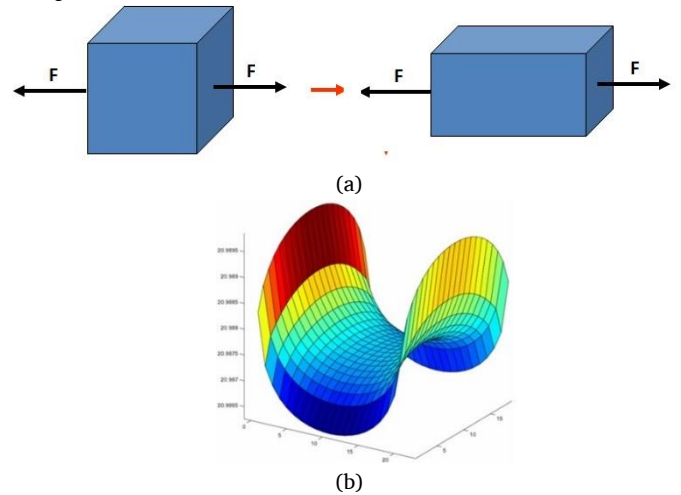
Theo Padzaniakou (2012), (Nguyen, 2015), giá trị tối ưu của θ có thể dùng là 0,5 và ở mức độ vĩ mô (macroscopic level), tính chất đàn hồi của môi trường rỗng được thể hiện bởi tenso độ cứng hữu hiệu $\mathbf{C}^{(eff)}$. Khi quá trình đạt được cân bằng, chúng ta nhận được tenso ứng suất trung bình và $\mathbf{C}^{(eff)}$ có thể tính dựa trên công thức

$$\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle = \mathbf{C}^{(eff)} : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle \quad (21)$$

trong đó $\langle \boldsymbol{\sigma} \rangle$ và $\langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle$ là các giá trị trung bình của ứng suất và biến dạng ở cấp độ vĩ mô.

2.3 Một số vấn đề với mô hình LSM cơ bản, điều kiện biên

Trên thực tế, các thí nghiệm mô phỏng môi trường đàn hồi và môi trường rỗng bằng mô hình LSM cơ bản với các tính chất nêu trên mang đến hai vấn đề cơ bản.

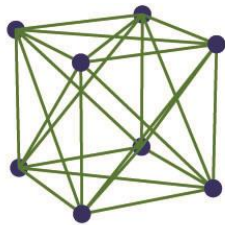


Hình 2. Mô phỏng kéo đơn giản theo phương x vật liệu đàn hồi đẳng hướng. a) Kết quả theo lý thuyết đàn hồi. b) Kết quả mô phỏng trực tiếp bằng LSM.

Vấn đề đầu tiên là về hệ số Poisson, với công thức (17), nó dao động từ -1 tới 0,25 khi hệ số β/α biến đổi từ 0 tới ∞ . Tuy nhiên với một số vật liệu thực tế, giá trị của nó có thể lớn hơn 0,25.

Vấn đề thứ hai là điều kiện biên, ta có thể thấy với công thức (17), giá trị các của hệ số đàn hồi α và β là giống nhau cho mọi lò xo đơn và góc. Điều này chỉ đúng khi chúng nằm ở trong lòng môi trường; nhưng thực tế thì nhiều lò xo nằm ở bề mặt hoặc trên bề mặt tiếp xúc lỗ rỗng (Ladd và cộng sự, 1997). Để chứng minh điều đó, mô phỏng kéo đơn giản theo phương x một khối lập phương làm bằng vật liệu đàn hồi đẳng hướng (Hình 2) được tiến hành khi xem các lò xo có độ cứng giống nhau bất kể vị trí của chúng. Theo lý thuyết đàn hồi, khối lập phương sẽ biến dạng thành hình hộp chữ nhật như Hình 2a. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng trực tiếp với LSM theo điều kiện trên cho mặt phẳng biến dạng như Hình 2b.

Rõ ràng, hệ số đàn hồi của các lò xo nằm trên bề mặt cần phải khác biệt. Để giải quyết vấn đề này, (Ladd và cộng sự, 1997), (Ladd và cộng sự, 1997b) đã đề xuất ý tưởng phần tử đàn hồi (elastic element). Một phần tử đàn hồi (PTĐH) là một khối lập phương cơ bản được thiết lập bởi 8 nút mạng liên kết với nhau bằng các lò xo (Hình 3) và đây là phần tử nhỏ nhất của một môi trường đàn hồi. Phụ thuộc vào số PTĐH liên kề, một lò xo có thể thuộc một hoặc vài phần tử khác nhau. Ví dụ, lò xo đơn dạng $[1\ 0\ 0]$ có thể thuộc 1, 2, 3 hay 4 phần tử khác nhau; lúc này độ cứng của chúng lần lượt là $\alpha/4$, $\alpha/2$, $3\alpha/4$ và α . Còn lò xo đơn dạng $[1\ 1\ 0]$ có thể thuộc 1 hoặc 2 phần tử và độ cứng tương ứng sẽ là $\alpha/2$ hoặc α . Tương tự với lò xo góc $\pi/4$, hệ số sẽ là $\beta/2$ hoặc β ứng với trường hợp nó thuộc 1 hoặc 2 phần tử; riêng loại $\pi/3$ chỉ có thể thuộc 1 phần tử nên hệ số của nó luôn là β . Rõ ràng lúc này, các lò xo ở các vị trí khác nhau sẽ có các hệ số đàn hồi khác nhau.



Hình 3. Phần tử đàn hồi (elastic element) trong LSM.

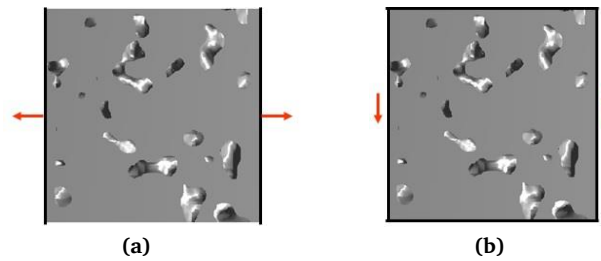
Padzniakou, (2012) chỉ ra rằng, PTĐH cũng có thể giải quyết được vấn đề hệ số Poisson nêu trên bằng cách gán các giá trị âm cho hệ số đàn hồi β , lúc đó ν sẽ lớn hơn 0,25. Điều này là hợp lý khi trong PTĐH, giữa hai nút cuối của một lò xo góc, luôn có một lò xo đơn và nó sẽ bù vào lực tác dụng gây ra bởi giá trị âm của β (Ladd và cộng sự, 1997), (Ladd và cộng sự, 1997b).

Với PTĐH, điều kiện biên về lực tác dụng cũng được áp dụng. Lực phân bố đều lên PTĐH sẽ được quy đổi về 4 nút mạng thuộc mặt phẳng tác dụng và tương tự như hệ số đàn hồi, độ lớn của lực sẽ phụ thuộc vào số lượng phần tử mà nút mạng đó thuộc vào (Padzniakou, 2012).

2.4. Mô phỏng tính toán tenso độ cứng hữu hiệu của môi trường rỗng

Ứng xử đàn hồi của một môi trường rỗng thể hiện qua công thức (21). Để xác định tenso độ cứng hữu hiệu $C^{(eff)}$ của mẫu rỗng, chúng ta dùng 6 mô phỏng được lập trình trên hệ ngôn ngữ Fortran với mô hình LSM và PTĐH bao gồm 3 mô phỏng kéo đơn giản theo 3 phương x, y, z và 3 mô phỏng cắt theo các mặt phẳng xy, xz và yz .

Nếu môi trường được xem như đẳng hướng, chỉ cần 1 thí nghiệm kéo và 1 thí nghiệm cắt được tiến hành để xác định $C^{(eff)}$.



Hình 4. Mô phỏng kéo xác định hệ số C_{xxxx} và C_{xxyy} và cắt xác định hệ số C_{xxyx} .

Với trường hợp tổng quát, cả 6 mô phỏng đều cần được tiến hành để xác định 9 giá trị của tenso độ cứng hữu hiệu của môi trường có dạng

$$C^{(eff)} = \begin{pmatrix} C_{xxxx} & C_{xxyy} & C_{xxzz} & 0 & 0 & 0 \\ C_{xxyy} & C_{yyyy} & C_{yyzz} & 0 & 0 & 0 \\ C_{xxzz} & C_{yyzz} & C_{zzzz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{yyyz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{zzxz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{xyxy} \end{pmatrix} \quad (22)$$

3. Phát triển LSM thành LSMnS cho môi trường rỗng gồm nhiều thành phần rắn khác nhau

Mô hình LSM được dùng rộng rãi để mô phỏng môi trường rỗng, từ đó có nhiều áp dụng trong cơ học, vật liệu, tính toán động đất (Padzniakou, 2012), (Malinouskaya, 2007), (Buxton và cộng sự, 2005). Tuy nhiên, một hạn chế rất lớn của nó là phạm vi áp dụng bị giới hạn với môi trường rỗng chỉ gồm một pha rắn và lỗ rỗng. Điều này gây nhiều khó khăn khi ứng dụng bởi vì hầu hết môi trường, vật liệu rỗng trong thực tế thường có ít nhất hai pha rắn kết hợp cùng lỗ rỗng. Do đó, mô hình mở rộng LSMnS được phát triển để có thể mô phỏng môi trường rỗng với nhiều pha rắn nhằm khắc phục hạn chế trên.

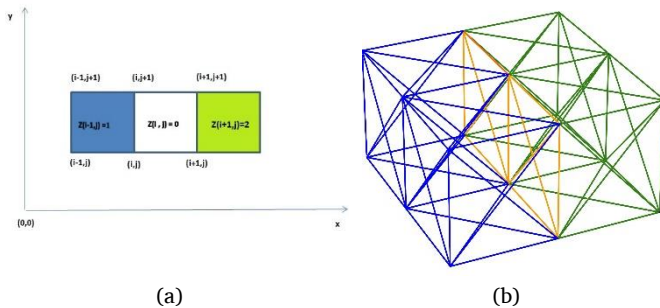
Mô hình LSMnS được phát triển dựa trên LSM cơ bản với PTĐH nên những tính chất cơ bản nêu trong mục 2 vẫn được giữ lại.

3.1 Dạng hình học của môi trường

Dạng hình học của môi trường nhiều pha rắn cũng được rời rạc hóa như môi trường một pha rắn (Nguyen, 2015). Mẫu rỗng sẽ được xử lý bằng kỹ thuật chụp cắt lớp m-CT với bề dày lớp bằng kích thước a của PTĐH (thường vài μm). Lúc này theo 3 phương, mẫu được chia ra làm $N_x \times N_y \times N_z$ khối lập phương có kích thước a^3 và được đặc trưng bởi hàm số biểu diễn pha (phase function) $Z(i,j,k)$. Với môi trường nhiều pha rắn, mỗi pha rắn được gán tương ứng một số (1,2,...). Trong phạm vi bài báo này, chúng ta xét môi trường có 2 pha rắn và 1 pha rỗng, lúc đó, hàm số pha trở thành

$$Z(i,j,k) = \begin{cases} 0 & \text{nếu khối thuộc pha rỗng} \\ 1 & \text{nếu khối thuộc pha rắn 1} \\ 2 & \text{nếu khối thuộc pha rắn 2} \end{cases} \quad (23)$$

Lúc này, để tính toán sự tác động giữa các pha rắn với nhau và giữa pha rắn và pha rỗng, các PTĐH tương tự như LSM sẽ được sử dụng. Dựa vào hàm số pha trước đó, các khối lập phương cơ sở thuộc pha rắn 1 sẽ tương ứng với PTĐH loại 1 (màu xanh dương, Hình 5b) với 8 nút mạng là 8 đỉnh, và pha rắn 2 sẽ tương ứng với PTĐH loại 2 (xanh lá). Sự tác động giữa các pha sẽ được thể hiện qua các lò xo nằm trên mặt tiếp xúc, chúng sẽ làm việc theo cả hai loại PTĐH.



Hình 5. Mô hình mạng lưới với 2 pha rắn. a) Dạng hình học tương ứng với hàm số pha. b) 2 loại PTĐH ứng với pha rắn 1 (xanh dương), pha rắn 2 (xanh lá), màu cam là mặt tiếp xúc.

3.2 Hệ số đàn hồi lò xo với nhiều pha rắn

Rất rõ ràng rằng độ cứng hữu hiệu của môi trường phụ thuộc vào sự phân bố của các thành phần rắn trong đó, và độ cứng của các lò xo nằm ở các vị trí khác nhau trong mạng lưới cũng sẽ khác nhau. Theo lý thuyết đàn hồi và công thức (17), ta có thể xác định được hệ số đàn hồi của lò xo đơn (α) và góc (β) trong PTĐH tương ứng với từng pha rắn như sau

$$\alpha = \frac{aE}{5(1-2\nu)} \quad \beta = \frac{a^3 E(4\nu-1)}{20(2\nu-1)(1+\nu)} \quad (24)$$

trong đó E là mô đun Young, ν hệ số Poisson của thành phần rắn. Do đó, ta có các hệ số đàn hồi α_1, β_1 ứng với pha rắn 1 và α_2, β_2 với pha rắn 2. Một lò xo trong mạng lưới lúc này có thể thuộc về PTĐH loại 1 hoặc loại 2 hoặc cả hai loại như trong Hình 5. Do đó, hệ số đàn hồi của nó lúc này không chỉ phụ thuộc vào số lượng mà còn phụ thuộc vào loại của PTĐH mà nó thuộc về. Lúc này hệ số của các lò xo đơn [1 0 0], [1 1 0], lò xo góc $\pi/4$ hay $\pi/3$ được xác định như sau

$$\alpha_{[1\ 0\ 0]} = \eta_1 \frac{\alpha_1}{4} + \eta_2 \frac{\alpha_2}{4} \quad \alpha_{[1\ 1\ 0]} = \eta_1 \frac{\alpha_1}{2} + \eta_2 \frac{\alpha_2}{2} a \quad (25)$$

$$\beta_{\pi/4} = \eta_1 \frac{\beta_1}{2} + \eta_2 \frac{\beta_2}{2} \quad \beta_{\pi/3} = \eta_1 \beta_1 + \eta_2 \beta_2$$

với η_1 và η_2 là số lượng PTĐH loại 1 và 2 mà nó thuộc về.

3.3 Điều kiện biên và thuật toán

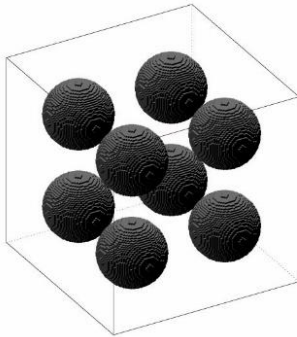
Trong giới hạn bài báo, chúng ta xét đến môi trường rỗng tuần hoàn theo không gian và hoàn toàn có thể được đại diện bởi một ô mạng cơ sở (Padzniakou, 2012). Để tính toán độ cứng hữu hiệu của môi trường, 6 biến dạng vĩ mô tương ứng với 6 mô phỏng đơn giản ở mục 2.4 được áp dụng cho ô mạng cơ sở để xác định ứng xử của ô mạng trong toàn bộ môi trường (Padzniakou và Adler, 2013). Lúc đó, biến dạng và chuyển vị của các mặt đối diện phụ thuộc lẫn nhau và tuân thủ điều kiện tuần hoàn không gian (Burla và cộng sự, 2009). Các điều kiện về phân bố lực phân bố đều về các nút mạng hoàn toàn tương tự như mô hình LSM nêu ở trên. Trong trường hợp tổng quát, ba mô phỏng kéo và ba mô phỏng cắt theo ba phương là cần thiết để xác định 9 thành phần của $C^{(eff)}$. Và nếu môi trường được xem là đẳng hướng thì chỉ cần một thí nghiệm kéo và cắt đơn giản để xác định $C^{(eff)}$.

Với mô hình LSMnS, thuật toán Velvet cũng được áp dụng hoàn toàn giống như LSM trong các mô phỏng được xây dựng trên ngôn ngữ lập trình Fortran. Sự phức tạp của LSMnS là phải dùng nhiều thời gian để xác định chính xác hệ số đàn hồi của từng lò xo trong ô mạng cơ sở. Tuy nhiên, khi thời gian của các mô phỏng chủ yếu dành cho vòng lặp Velvet và bước xác định này nằm ngoài vòng lặp đó nên thời gian mô phỏng bởi LSMnS cũng không quá chênh lệch với LSM. Thực tế, với mô hình LSMnS, chúng ta sử dụng tiêu chuẩn hỗ trợ OpenMP (Open MultiProcessing) trên Fortran để giảm bớt thời gian mô phỏng. Chuẩn này giúp một mô phỏng được chạy song song trên một máy tính có nhiều nhân. Theo qua tác Amdahl (Che và Nguyen, 2014), với LSMnS, nếu dùng OMP và chạy song song trên máy tính 8 nhân, tốc độ chạy nhanh gấp 5,2 lần và 10,4 trên máy 48 nhân (Nguyen, 2015).

4. Ứng dụng mô phỏng số một số môi trường rỗng

4.1 Môi trường với hai pha rắn có cùng hệ số Poisson

(Nemat-Nasser và Iwakuma, 1982), (Torquato, 1998), Cohen (2004) đã đề xuất một số phương pháp dự báo độ cứng hữu hiệu của các môi trường không đồng nhất. (Nemat-Nasser và Iwakuma, 1982) sử dụng phương pháp cộng hưởng đàn hồi, (Torquato, 1998), Cohen (2004) dùng các khai triển mở rộng để tính toán các các hệ số cơ học hữu hiệu cho môi trường dạng khối lập phương 3D với các khối cầu vật liệu (Hình 6).



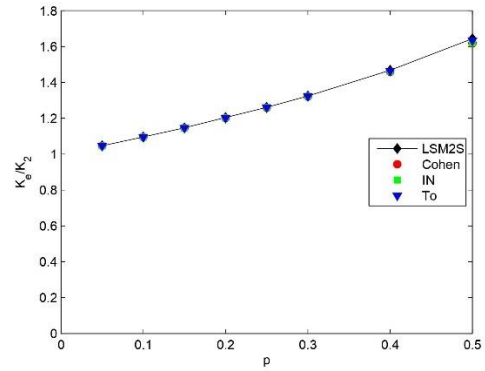
Hình 6. Môi trường 2 pha rắn dạng khối lập phương với các khối cầu vật liệu. Pha rắn 1 trong suốt, pha rắn 2 màu xám.

Dựa vào các kết quả đó, chúng ta thực hiện mô phỏng với môi trường có ô mạng cơ sở như Hình 6, được tạo bởi hai pha rắn có các tính chất cơ học thỏa mãn các điều kiện quy định trong (Nemat-Nasser và Iwakuma, 1982), (Torquato, 1998) là $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ và $G_1 / G_2 = 3$ với G là mô đun cắt của chất rắn. Do môi trường trong trường hợp này là đẳng hướng, do đó chúng ta chỉ cần thực hiện một mô phỏng kéo và cắt theo phương x để xác định các thành phần của tenso độ cứng hữu hiệu như (22). Từ đó, mô đun cứng hữu hiệu, mô đun cắt hữu hiệu đầu tiên và thứ hai có thể được xác định như sau

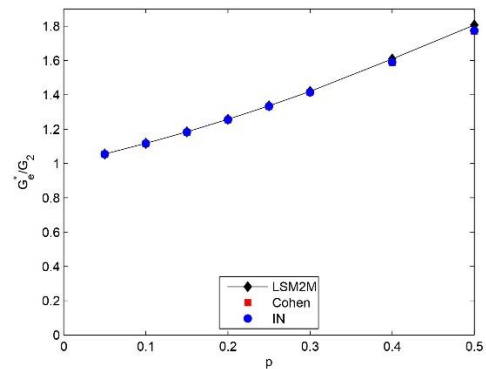
$$K_e = \frac{C_{xxxx} + 2C_{xyxy}}{3}; \quad G_e = C_{yzyz}; \quad G_e^* = \frac{C_{xxxx} - C_{xyxy}}{2} \quad (26)$$

Các kết quả có được từ mô phỏng bởi LSMnS cho các mẫu có kích thước và tỉ lệ thể tích pha rắn 2 $\rho = V_{ran2} / V_{tong}$ khác nhau được so sánh với các kết quả của (Nemat-Nasser và Iwakuma, 1982), (Torquato, 1998)Cohen (2004) như trong các Hình 7.a, 7.b và 7.c.

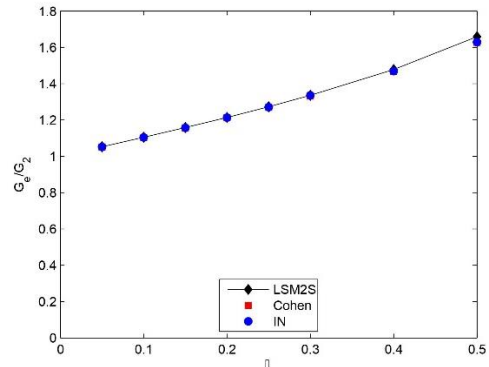
Ta có thể thấy được rằng các kết quả mô phỏng và tính toán rất gần nhau, sai số lớn nhất là 1,6 %. Lưu ý rằng các so sánh được thực hiện với nhiều kích thước khác nhau của môi trường và kết quả không đem lại nhiều sự khác biệt; rõ ràng điều này đã chỉ ra độ chính xác cao của LSMnS.



(a)



(b)



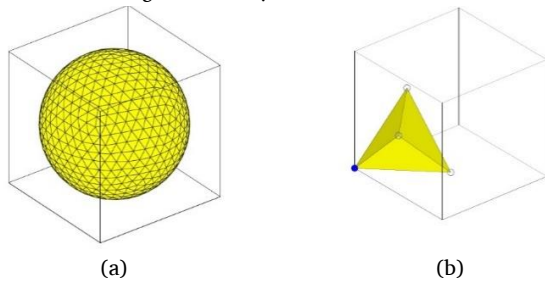
(c)

Hình 7. So sánh giữa kết quả mô phỏng bằng LSMnS và (Nemat-Nasser và Iwakuma, 1982), (Torquato, 1998)Cohen (2004). (a) Mô đun cứng hữu hiệu K_e / K_2 . (b) Mô đun cắt hữu hiệu đầu tiên

G_e / G_2 . (c) Mô đun cắt hữu hiệu thứ hai G_e^* / G_2 .

4.2. Môi trường với hai pha rắn bất kì

LSMnS đã chứng minh khả năng làm việc hiệu quả với môi trường có 2 pha rắn có cùng hệ số Poisson, tiếp theo, chúng ta sẽ kiểm tra với hai pha rắn bất kì bằng cách so sánh với kết quả của công cụ tính toán FMD được đề xuất bởi Malinouskaya (Malinouskaya, 2007). FMD được phát triển dựa trên phương pháp thể tích hữu hạn với bài toán rời rạc không gian bậc một. Môi trường trong FMD được tạo bằng các lưới tứ diện; dựa vào số lượng tứ diện trong một ô mạng cơ sở, FMD có 4 loại lưới mạng là SCT6, SCT24, TUT, SUT. Theo (Malinouskaya, 2007), SCT24 là loại dễ mô phỏng và đem lại kết quả chính xác nhất nên trong bài báo này, chúng ta sẽ so sánh kết quả của LSMnS với FMD dùng lưới tứ diện SCT24.



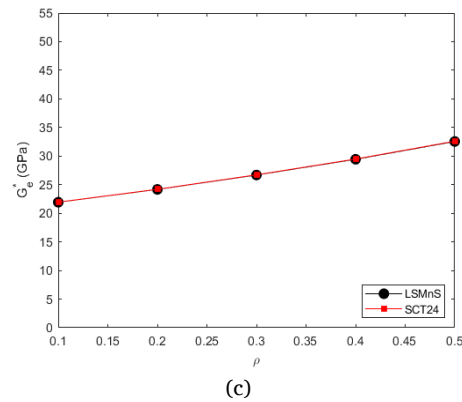
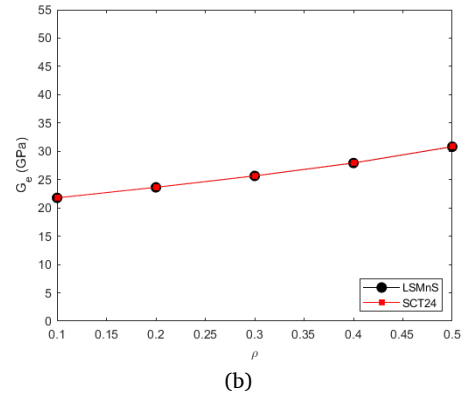
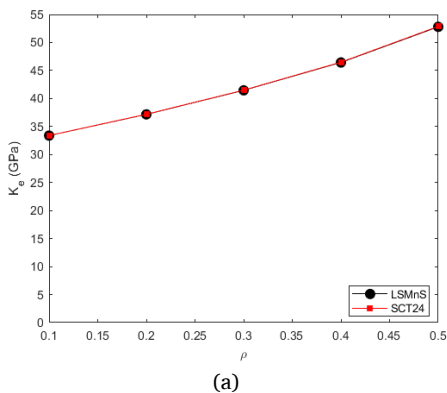
Hình 8. a) Môi trường tạo bởi công cụ FMD (Malinouskaya, 2007).
b) Tứ diện SCT24 trong một ô mạng cơ sở.

Môi trường trong các so sánh này cũng có cùng dạng như trong Hình 6 với các tỷ lệ thể tích ρ thay đổi từ 0,05 đến 0,5. Hai pha rắn lúc này không bị ràng buộc như trong so sánh trước, trong trường hợp này, chúng có các mô đun đàn hồi như trong Bảng 1.

Bảng 1.

Hệ số đàn hồi của hai pha rắn dùng trong so sánh.

Mô đun đàn hồi	Mô đun cứng	Mô đun cắt	Mô đun Young	Hệ số Poisson
Chất rắn 1	30	20	49,091	0,2273
Chất rắn 2	100	50	128,57	0,2857



Hình 9. So sánh kết quả mô phỏng với LSMnS (đen) và SCT₂₄ (đỏ). a) K_e . b) G_e . c) G_e^* .

Các kết quả mô phỏng được so sánh trong Hình 9. Sự khác nhau giữa LSMnS và SCT24 là rất nhỏ, với tỉ lệ thể tích $\rho = 0,1$, sai số cho cả mô đun cứng, mô đun cắt thứ nhất và thứ hai đều dưới 0,1%; sai số lớn nhất là 0,8% với $\rho = 0,5$ cho G_e^* . Nhờ vào các kết quả này, ta có thể nói rằng LSMnS làm việc tốt với các môi trường với hai pha rắn có các mô đun đàn hồi khác nhau.

5. Áp dụng cho các mẫu xi măng trộn đất

5.1. Chuẩn bị mẫu

Các mẫu mô phỏng được số hóa từ các mẫu trộn trong phòng thí nghiệm, quy trình chuẩn bị mẫu bao gồm xác định tỉ lệ phù hợp, trộn mẫu thực tế rồi số hóa mẫu để có mẫu đảm bảo đầu vào của mô hình mạng lưới lò xo.

Việc lựa chọn tỷ lệ xi măng với đất ảnh hưởng rất lớn đến tính chất của hỗn hợp vật liệu xi măng đất và giá thành công trình. Tỷ lệ xi măng với đất được tính theo % khối lượng xi măng so với khối lượng đất khô theo phương pháp thí nghiệm trong phòng xác định sức kháng nén của xi măng đất (TCVN:9403-2012). Tỷ lệ xi măng với đất thích hợp

thay đổi theo từng loại đất và có giá trị biến đổi trong phạm vi nhất định. Theo Thân Văn Văn (2009), lượng xi măng trộn vào là 7 % - 15 % trọng lượng khô của đất cần gia cố hoặc lượng xi măng từ 180- 250 kg/m³ đất gia cố. Thông thường khi hàm lượng hạt sét trong đất yếu tăng thì lượng xi măng yêu cầu cũng tăng.

Dựa vào thực tế của đất nền khu vực đồng bằng sông Cửu Long chủ yếu là sét và bùn sét yếu (Nguyễn Minh Đức và cộng sự, 2018), nghiên cứu này sẽ sử dụng các mẫu với tỉ lệ khác nhau từ 7 %, 9 %, 13 % 18 % và 21 % để đánh giá hiệu quả của phương pháp trộn xi măng đất và ảnh hưởng của tỷ lệ xi măng tới cường độ kháng nén của hỗn hợp trộn.

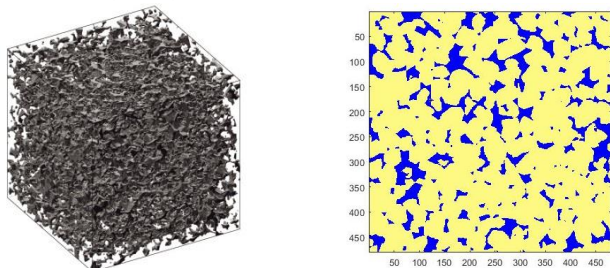
Bảng 2.

Thành phần cấp phối các mẫu đất trộn xi măng.

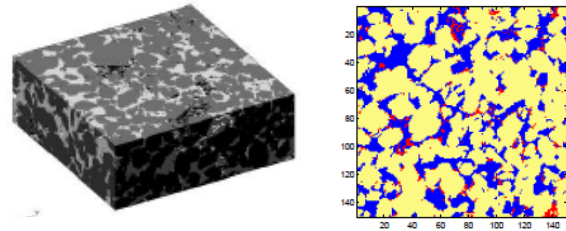
Mẫu	F0	F7	F9	F13	F18	F21
Tỷ lệ xi măng (%)	0	7	9	13	18	21

5.2. Số hóa mẫu

Quy trình xử lý số hóa mẫu từ mẫu trộn thực tế được trình bày trong nghiên cứu của Padzniakou (2012) và Nguyễn Thế Anh (2015) thông qua các bước chụp cắt lớp mẫu (m-CT), phân tích thông qua công cụ Direct samples (Nguyen K T, 2013). Mẫu được chụp cắt lớp nhiều lần, thông qua đó xác định sự phân bố các thành phần trong mỗi lớp cắt, các thành phần rắn khác nhau sẽ được gán các giá trị 0, 1, 2... từ đó tạo nên mẫu số hóa như trình bày ở mục 3. Trong nghiên cứu của Nguyễn Thế Anh (2015), các mẫu được chụp m-CT với bề dày mỗi lớp chụp khoảng 5,7 nm; rõ ràng, công nghệ này đòi hỏi chi phí cao so với giới hạn của đề tài, do đó, tác giả sử dụng công nghệ chụp ảnh các lớp của mẫu, dựa vào màu ảnh và xử lý qua công cụ Direct samples (Nguyen K T, 2013) để có được các mẫu cần dùng cho mô phỏng. Do giới hạn tính toán của mô hình mạng lưới lò xo hiện tại chỉ áp dụng cho 2 đến 3 thành phần rắn và tỉ lệ các vật chất khác trong mẫu rất bé (Hình 10, Hình 11) nên các mẫu này được xem như chỉ gồm thành phần sét, xi măng và lỗ rỗng trong mẫu. Biện pháp này đơn giản hơn, chi phí thấp hơn tuy nhiên nó cũng làm giảm độ thực tế của mẫu số hóa.



Hình 10. Mẫu đất 2 thành phần rắn F18 số hóa và một mặt cắt ngang của nó, màu xanh là XM.



Hình 11. Mẫu F21 thực tế và mặt cắt ngang của nó (tỉ lệ lớn hơn), có thể có lẫn thành phần khác: màu xanh là XM, màu đỏ là cát, màu vàng là sét.

5.3. Kết quả mô phỏng

Trong mục này, chúng ta sẽ áp dụng LSMnS để mô phỏng các mẫu với tỉ lệ cấp phối khác nhau như trình bày tại Bảng 2. Sau khi được xử lý bằng kỹ thuật chụp hình ảnh và Direct Samples, chúng ta có 6 mẫu dạng lập phương được chia làm 480×480×480 ô mạng lập phương cơ sở như Hình 10 và Hình 11. Các mô đun đàn hồi của hạt sét và xi măng được sử dụng trong mô phỏng được lấy theo các kết quả nghiên cứu của Han (1986), Arns (1996), Nguyễn Uyên (2009), Wang và cộng sự (2015), cụ thể cho như trong Bảng 3.

Bảng 3.

Đặc tính vật lý các hạt rắn trong mô phỏng.

	K (GPa)	G (GPa)	ρ (g/cm ³)
Sét	37	44	2,65
XM	17,5	13,1	2,56

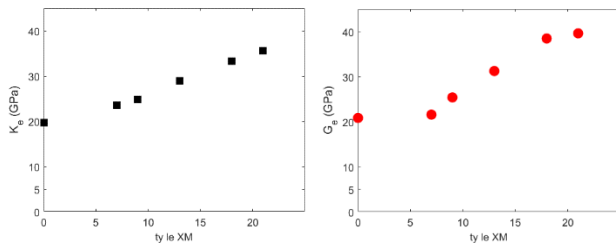
Bảng 4.

Kết quả mô phỏng mô đun đàn hồi hữu hiệu K_e và G_e của mẫu.

Mẫu	K_e (GPa)	G_e (GPa)
F0	19,62	20,8307
F7	23,56	21,56907376
F9	24,84	25,3881931
F13	28,96	31,25033126
F18	33,32	38,4717207
F21	35,54	39,60876769

Các kết quả mô phỏng là các thành phần của tenso ứng suất hữu hiệu $C^{(eff)}$ ngoài được sử dụng để tính các mô đun đàn hồi hữu hiệu K_e và G_e như thể hiện trong Bảng 4 và Hình 12. Kết quả này tương đồng với các kết quả nghiên cứu của Thân Văn Văn (2009), Nguyễn Sỹ Hùng và Vương Hoàng Thạch (2020) khi nó cho thấy các tính chất của đất

được gia cường khi tăng tỷ lệ của hàm lượng xi măng trộn trong đất. Tại hàm lượng xi măng 13 % (gần tương ứng 340 kg/m³), giá trị K_e tăng 47 % trong khi G_e tăng 50 % so với mẫu không trộn. Hàm lượng càng tăng thì mô đun đàn hồi hữu hiệu của mẫu càng tăng, tuy nhiên sau khi hàm lượng vượt qua 13 % thì mức độ tăng của các tính chất giảm lại.



Hình 12. Mối quan hệ giữa tỉ lệ xi măng trộn đất và Mô đun đàn hồi hữu hiệu K_e và G_e .

Các kết quả liên hệ với kết quả nén thực tế phòng thí nghiệm đang tồn tại nhiều vấn đề cần giải quyết khi tính toán sơ bộ cho thấy kết quả kháng nén của mẫu đất qua mô phỏng và thực tế chưa đồng nhất với nhau. Vấn đề này có thể do mô hình chưa xét đến tương tác hóa học giữa xi măng trong quá trình đông kết và hạt sét hoặc do quá trình số hóa mẫu quá thô khi không sử dụng công nghệ m-CT. Điều này cũng là giới hạn của đề tài, cần nghiên cứu mở rộng để đánh giá chính xác kết quả mô phỏng khi so sánh với thực tế.

6. Kết luận và mở rộng

Kết quả nghiên cứu cho thấy địa hình nền đất yếu của khu vực đồng bằng sông Cửu Long là có thành phần chủ yếu là sét hoặc bùn sét yếu. Nhiều phương pháp xử lý đã được đề xuất và nghiên cứu này cho thấy phương pháp trộn nông xi măng đất là một trong những biện pháp phù hợp, có thể triển khai rộng rãi và chi phí phù hợp.

Việc sử dụng các mô hình số để mô phỏng các loại vật liệu và kết cấu đã trở thành xu hướng và được sử dụng rộng rãi. Nghiên cứu này đã đề xuất và phát triển một công cụ hữu ích đó là mô hình mạng lưới lò xo đàn hồi. Mô hình LSM cơ bản hay mở rộng LSMnS đều có thể dễ dàng áp dụng cho các môi trường rỗng với một hay nhiều thành phần rắn để xác định các tính cơ học của chúng.

Việc mô phỏng các mẫu đất trộn với tỉ lệ xi măng khác nhau cho thấy hàm lượng xi măng càng tăng thì các tính chất của đất càng tốt hơn. Tại hàm lượng 13 %, giá trị K_e và G_e tăng lần lượt tương ứng là 47 % và 50 %, tuy nhiên sau đó mức độ tăng giảm dần theo hàm lượng xi măng thêm vào. Bài báo có thể đề xuất hàm lượng hợp lý là 13 % đến 15 %.

Kết quả mô phỏng còn thiếu sự liên hệ với kết quả thí nghiệm thực tế như cường độ kháng nén của mẫu khi có sự chênh lệch tương đối lớn giữa mô phỏng và thực tế. Điều này có thể do các công thức liên hệ tương quan giữa hệ số đàn hồi hữu hiệu và cường độ kháng nén được công bố có biên thiên quá lớn hoặc mô hình chưa xét đến tương tác hóa học giữa xi măng trong quá trình đông kết và hạt sét hoặc do quá trình số hóa mẫu quá thô khi không sử dụng công nghệ m-CT. Điều này cũng là giới hạn của bài báo, cần nghiên cứu mở rộng để đánh giá chính xác kết quả mô phỏng khi so sánh với thực tế.

Tài liệu tham khảo

- [1]. C.H. Arns, "The influence of morphology on physical properties of reservoir rocks," Ph.D.thesis, University of technology, Aachen, 1996.
- [2]. C. Boutin and J. L. Auriault, "Dynamic behaviour of porous media saturated by a viscoelastic fluid. Application to bituminous concretes," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 28, no. 11, pp. 1157–1181, 1990.
- [3]. R. Burla, A. Kumar, and B. Sankar, "Implicit boundary method for determination of effective properties of composite microstructures," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 46, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2009.02.003.
- [4]. G. A. Buxton, R. Verberg, D. Jasnow, and A. C. Balazs, "Newtonian fluid meets an elastic solid: Coupling lattice Boltzmann and lattice-spring models," *Phys. Rev. E*, vol. 71, no. 5, p. 056707, May 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.71.056707.
- [5]. H. Che and M. Nguyen, "Amdahl's law for multithreaded multicore processors," *J. Parallel Distrib. Comput.*, vol. 10, no. 74, pp. 3056–3069, 2014, doi: 10.1016/j.jpdc.2014.06.012.
- [6]. I. Cohen, "Simple Algebraic Approximations for The Effective Elastic Moduli of a Cubic Array of Spheres," *J. Mech. Phys. Solids - J MECH PHYS SOLIDS*, vol. 52, pp. 2167–2183, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.jmps.2004.02.008.
- [7]. Chida, S, "Development of dry jet mixing methods. Public Works Research Institute," Japan: Ministry of Construction, 1982, pp. 29–35.
- [8]. A. Eggstad, "Improvement of cohesive soils". State of the art report, *Proc. of the 8 th ECSMFE*, Main Session A, 1983, pp.991-1007.
- [9]. S. Kazemian and B. Huat, "Assessment of stabilization methods for soft soils by admixtures," *2010 Int. Conf. Sci. Soc. Res. CSSR 2010*, 2010, doi: 10.1109/CSSR.2010.5773714.
- [10]. D.Han, "Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments," Ph.D. thesis, University of Stanford, 1986.
- [11]. S. Horpibulsuk, N. Miura, H. Koga, and T. S. Nagaraj, "Analysis of strength development in deep mixing: a field study," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Ground Improv.*, vol. 8, no. 2, pp. 59–68, Jan. 2004, doi: 10.1680/grim.2004.8.2.59.
- [12]. A. J. C. Ladd, J. H. Kinney, and T. M. Breunig, "Deformation and failure in cellular materials," *Phys. Rev. E*, vol. 55, no. 3, pp. 3271–3275, Mar. 1997, doi: 10.1103/PhysRevE.55.3271.

- [13]. A. J. C. Ladd and J. H. Kinney, "Elastic constants of cellular structures," *Phys. Stat. Mech. Its Appl.*, vol. 240, no. 1, pp. 349–360, Jun. 1997, doi: 10.1016/S0378-4371(97)00158-1.
- [14]. K. H. Law, "Strength & deformation characteristics of cement treated clay," M. Eng. Thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1989.
- [15]. G. A. Lorenzo and D. T. Bergado, "Fundamental Characteristics of Cement-Admixed Clay in Deep Mixing," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 161–174, Apr. 2006, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(161).
- [16]. L. Malinetskaya, "Propagation des ondes acoustiques dans les milieux hétérogènes," Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2007.
- [17]. N. Miura, B. T. Bergado and A. Sakai. Improvement of soft marine clays by special admixtures using dry and wet jet mixing method. *Proc. 9th SEAGC*, Bangkok, 1987, 8:46-8:35.
- [18]. M. P. Moseley and K. Kirsch, Eds., *Ground improvement*, 2nd ed. London ; New York: Spon Press, 2004.
- [19]. S. Nemat-Nasser, and T. H. M. Iwakuma. On composite with periodic structure, *Mech.Mater.* 1, 1982, 239-267.
- [20]. A. Nguyen The, "Acoustic wave in porous media. Numerical study of wave propagation in porous media with one or many mineral components. Applications to real Fontainebleau and STATOIL samples," Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2015.
- [21]. K. T. Nguyen, "Direct samples," Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2013.
- [22]. Đ. Nguyễn Đình, "Nghiên cứu giải pháp cọc cát để gia cố tầng đất yếu khu vực thành phố Hải Phòng." Đề tài nghiên cứu khoa học trường Đại học dân lập Hải Phòng, 2009.
- [23]. B. Nguyễn Ngọc, B. Lê Thị Thanh, and P. Vũ Đình, *Đất xây dựng – Địa chất công trình và Kỹ thuật cải tạo đất trong xây dựng*. Hà Nội: Nhà xuất bản Xây dựng, 2005.
- [24]. U. Nguyễn, *Xử lý nền đất yếu trong xây dựng*. Hà Nội: NXB Xây dựng, 2009.
- [25]. D. Nguyễn Quốc, A. Phùng Vĩnh, and H. Nguyễn Quốc, *Công nghệ khoan phụt cao áp trong xử lý đất yếu*. Nhà xuất bản Nông nghiệp, 2005.
- [26]. Đ. Nguyễn Minh, Đ. Nguyễn Văn, and A. Nguyễn Thế, "Nghiên cứu cường độ của đất sét yếu gia cường vải địa kỹ thuật trong điều kiện thí nghiệm CBR hiện trường," *Tạp Chí Xây Dựng*, no. 617, pp. 192–196, 2019.
- [27]. Đ. Nguyễn Minh and L. Lê Đức, "Nghiên cứu cải tạo đất bùn nạo vét lòng sông thay thế cát trong công tác san lấp mặt bằng tỉnh An Giang," *Tạp Chí Xây Dựng*, pp. 59–63, Nov. 2018.
- [28]. Đ. Nguyễn Minh and L. Trần Ngọc, "Nghiên cứu ứng xử lún của công trình móng nông trên nền cát san lấp và đất sét yếu bão hòa tại tỉnh An Giang," *Tạp Chí Xây Dựng*, pp. 53–58, 2018.
- [29]. H. Nguyễn Sỹ and A. Hoàng, "Nghiên cứu thực nghiệm giải pháp gia cố nền đất yếu có cát san lấp bằng túi đất D-BOX," *Tạp Chí Xây Dựng*, 2020.
- [30]. H. Nguyễn Sỹ and T. Vương Hoàng, "Gia cường nông đất yếu có cát san lấp bằng cọc xi măng đất," *Tạp Chí Xây Dựng*, 2020.
- [31]. Pazdniakou, A, "Lattice model in porous media studies," Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie, Paris VI, 2012.
- [32]. A. Pazdniakou and P. M. Adler, "Dynamic permeability of porous media by the lattice Boltzmann method," *Adv. Water Resour.*, vol. 62, pp. 292–302, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.advwatres.2013.06.001.
- [33]. Thân Văn Văn, "Lựa chọn tỷ lệ xi măng với đất khi chế tạo cọc xử lý nền đất yếu," *Tạp Chí Khoa Học Kỹ Thuật Thủ Lợi Và Môi Trường*, no. 26, pp. 66–69, Sep. 2006.
- [34]. Tsytoich N., Berezantsev V., Dalmatov B. and Abelev M, *Foundation soils and substructures*. Moscow: Mir publisher, 1974.
- [35]. TCCS 05:2010/VKHTLVN, "Hướng dẫn sử dụng cọc xi măng đất thi công theo phương pháp Jet-grouting để xử lý nền đất yếu và chống thấm công trình bằng đất." Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam.
- [36]. TCXDVN 385:2006, "Gia cố đất yếu bằng trụ đất xi măng."
- [37]. S. Torquato, "Effective stiffness tensor of composite media : II. Applications to isotropic dispersions," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 46, no. 8, pp. 1411–1440, Aug. 1998, doi: 10.1016/S0022-5096(97)00083-5.
- [38]. Z. Wang *et al.*, "A new dynamic testing method for elastic, shear modulus and Poisson's ratio of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 100, pp. 129–135, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.060.