

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG SỐ ỨNG XỬ CƠ HỌC CỦA XỐP SIÊU NHẹ EPS

EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL SIMULATION ON MECHANICAL BEHAVIOURS OF EPS GEOFOAM

TRƯƠNG QUỐC BẢO^{a,*}, VŨ ANH TUẤN^a, PHẠM HOÀNG KIÊN^b

^aHọc viện Kỹ thuật quân sự

^bTrường Đại học Giao thông Vận tải

*Tác giả đại diện: Email: truongquocbao@lqdtu.edu.vn

Ngày nhận 01/10/2023, Ngày sửa 23/10/2023, Chấp nhận 30/10/2023

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2023.vi.vol3-7>

Tóm tắt: EPS (Expanded Poly-Styrene) geofoam là tên gọi chung cho vật liệu xốp đã được sử dụng phổ biến trong lĩnh vực địa kỹ thuật ở nhiều quốc gia trên thế giới, nhằm giảm độ lún nền đường hơn 40 năm qua. Xốp siêu nhẹ EPS là vật liệu nhựa tổng hợp từ polystyrene, có khối lượng riêng thường sử dụng 12 – 35kg/m³, chỉ bằng 1% ~ 2% so với đất, đá hoặc bê tông, đồng thời có thể chịu được ứng suất nén lớn. Trong nghiên cứu này, tác giả tiến hành các thí nghiệm nén đơn trục và thí nghiệm cắt phẳng để tìm hiểu ứng xử cơ học của EPS geofoam. Sau đó, tác giả tiến hành mô phỏng số các thí nghiệm đơn trục để lựa chọn ra mô hình vật liệu và các tham số phù hợp để mô phỏng ứng xử cơ học của xốp EPS. Từ các kết quả mô phỏng số, nhận thấy rằng mô hình vật liệu Hardening Soil (HS) và mô hình Mohr – Coulomb (MC) có thể sử dụng để mô phỏng ứng xử cơ học của EPS geofoam.

Từ khóa: EPS; nghiên cứu thực nghiệm; mô phỏng số; ứng xử cơ học.

Abstract: EPS (Expanded Polystyrene) geofoam is the generic name for any cellular material used in geotechnical applications for over 40 years, in order to reduce the settlement of the ground. The material of EPS is polystyrene resin, produced by polymerizing styrene monomer which is created by oil refining, with a density of 12-35kg/m³, whose weight is only 1% ~ 2% compared with rock or concrete with the same volume but can withstand relatively large compressive stresses. In this study, the uniaxial compression and direct shear tests were carried out to investigate the mechanical behavior of EPS geofoam. After that, the numerical simulation of the uniaxial tests was conducted to select an appropriate material model as well as the corresponding parameters to simulate the mechanical behaviour of geofoam. From the

numerical simulation results, it is seen that the Hardening Soil (HS) model and Mohr – Coulomb (MC) model can be used to simulate the mechanical behaviour of EPS geofoam.

Keywords: EPS geofoam; experimental study; numerical simulation; mechanical behaviours.

1. Giới thiệu chung

Xây dựng nền đắp trên đất yếu luôn là một vấn đề phức tạp, dù đã được nghiên cứu nhiều nhưng vẫn còn nhiều hạn chế và cần tiếp tục nghiên cứu để khắc phục những hạn chế, đảm bảo sự ổn định và độ lún cho phép của công trình. Nhiều phương pháp gia cố nền đất yếu đã được nghiên cứu và đưa vào ứng dụng như: Giải pháp sử dụng bấc thấm kết hợp gia tải trước hoặc hút chân không [1], sử dụng bệ phản áp [2]; giải pháp sử dụng cọc vật liệu rời [3-4]; giải pháp sử dụng cọc gia cường [5]; giải pháp sử dụng vải địa kỹ thuật [6]; giải pháp sử dụng các vật liệu nhẹ [7-8]. Các giải pháp đó đều mang lại những hiệu quả nhất định trong việc đảm bảo độ bền và sự ổn định của nền đắp... Với ưu điểm là một vật liệu siêu nhẹ ($\rho = 12 - 35 \text{ kg/m}^3$, bằng khoảng 1/100 so với đất), xốp siêu nhẹ EPS được sử dụng thay thế cho các vật liệu đắp nền thông thường giúp giảm tải trọng tác dụng xuống nền đất yếu phía dưới. Ngoài việc rút ngắn thời gian thi công, sử dụng vật liệu nhẹ EPS còn có ưu điểm là không ảnh hưởng tiêu cực đến công trình xung quanh (lún và lún lệch), giảm được các chi phí quản lý, duy tu bảo trì kết cấu trong giai đoạn khai thác. Khi sử dụng EPS thay nền đất đắp sau mố, do vật liệu có tính tự ổn định cao nên nó không gây ra áp lực ngang lên mố cầu. Vì vậy, EPS geofoam đã được ứng dụng phổ biến trong xây dựng công trình giao thông (Đường đầu cầu, đường đắp cao, ổn định mái dốc, đường trên nền đất yếu...) ở một số quốc gia trên thế giới như ở Châu Âu (Na Uy, Cộng hòa Séc, Đức, Hy Lạp, Hà Lan, Ba Lan, Serbia,

Thụy Điển, Anh... [9-11]), Châu Á (Nhật Bản, Trung Quốc, Malaysia, Thái Lan, Philippines, Hàn Quốc và Đài Loan, Ấn Độ, [12-13]).

Tuy nhiên, tại Việt Nam hiện nay vẫn chưa có tiêu chuẩn thiết kế, thi công và nghiệm thu đối với vật liệu EPS, chưa có nhiều các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số về ứng xử cơ học của xốp siêu nhẹ EPS. Đặc biệt, với tình trạng thiếu vật liệu đất đắp nền đường cho tuyến đường cao tốc Bắc-Nam đang là vấn đề cấp bách hiện nay. Do đó, để phục vụ cho công tác nghiên cứu khả năng áp dụng loại vật liệu này trong lĩnh vực xây dựng hạ tầng ở Việt Nam, các nghiên cứu thực nghiệm và nghiên cứu số nhằm đánh giá mối quan hệ giữa ứng suất – biến dạng, lựa chọn mô hình vật liệu và xác định các tham số mô hình tương ứng để mô phỏng ứng xử cơ học của EPS có ý nghĩa quan trọng và cần thiết. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tiến hành các thí nghiệm nén một trục đối với hai loại vật liệu EPS điển hình là DX-24H và D-20, trong đó, DX-24H được nhập khẩu từ Nhật Bản và D-20 được sản xuất tại một nhà máy ở Việt Nam (với nguyên liệu sản xuất là hạt nhựa polystyrene được nhập từ Nhật Bản), để tìm hiểu ứng xử cơ học của EPS geofoam. Sau đó, nhóm tác giả tiến hành mô phỏng số các thí nghiệm đơn trục để

lựa chọn ra mô hình vật liệu thích hợp mô phỏng ứng xử cơ học của EPS geofoam.

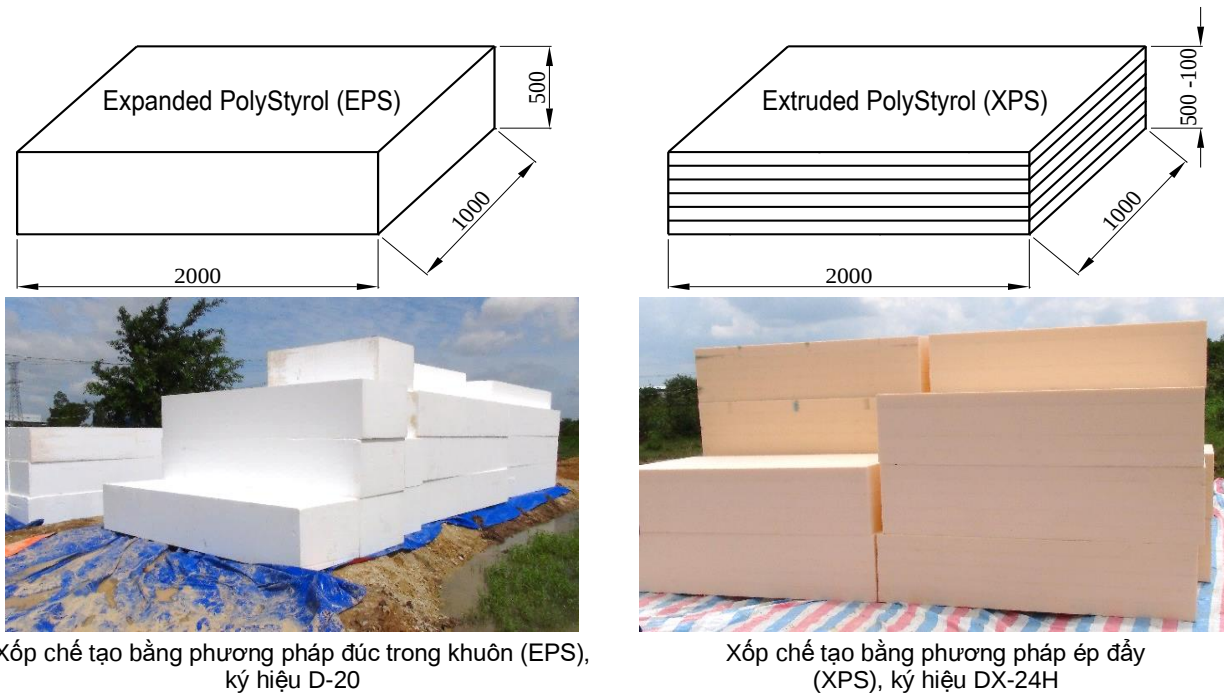
2. Nghiên cứu thực nghiệm

2.1 Đặc tính cơ học của vật liệu EPS geofoam

Vật liệu nhẹ EPS là tên gọi chung cho hai loại với phương pháp chế tạo khác nhau, nhưng ở một số quốc gia như: Nhật Bản, Na Uy..., tùy theo cách chế tạo khối EPS mà người ta lại chia thành hai loại với hai tên gọi khác nhau, cụ thể như sau: Khối EPS được đúc trong khuôn (vẫn dùng tên gọi là EPS) và tấm EPS được chế tạo bằng phương pháp ép đẩy (được gọi là XPS). Các tấm XPS thường được chế tạo với chiều dày 10 cm. Để tạo ra khối XPS có cùng chiều dày với khối EPS (50 cm) người ta thường dán 5 tấm XPS lại với nhau. Bằng việc thay đổi số tấm XPS, người ta cũng có thể tạo ra các khối XPS có chiều dày khác nhau (bước thay đổi là 10 cm), được thể hiện trên Hình 1. Tùy theo trọng lượng thể tích mà EPS lại được chia thành 5 loại khác nhau: D-12, D-16, D-20, D-25 và D-30. Tương tự như vậy, XPS cũng được chia thành 5 loại khác nhau tùy theo trọng lượng thể tích: DX-24, DX-24H, DX-29, DX-35 và DX-45, đặc tính cơ học cơ bản của vật liệu EPS geofoam được thể hiện trong Bảng 1, [14].

Bảng 1. Đặc tính cơ học cơ bản của vật liệu EPS

Phương pháp chế tạo khối EPS	Đúc trong khuôn (EPS)					Phương pháp ép đẩy (XPS)				
Loại vật liệu	D-12	D-16	D-20	D-25	D-30	DX-24	DX-24H	DX-29	DX-35	DX-45
Trọng lượng thể tích (kN/m ³)	0,12	0,16	0,20	0,25	0,30	0,24	0,24	0,29	0,35	0,45
Ứng suất nén cho phép (kN/m ²)	20	35	50	70	90	60	100	140	200	350
Mô đun đàn hồi (kN/m ²)	2000	3500	5000	7000	9000	6000	10000	14000	20000	35000



Hình 1. Kích thước tiêu chuẩn của vật liệu EPS

2.2 Thí nghiệm nén đơn trục và đo biến dạng theo phương ngang

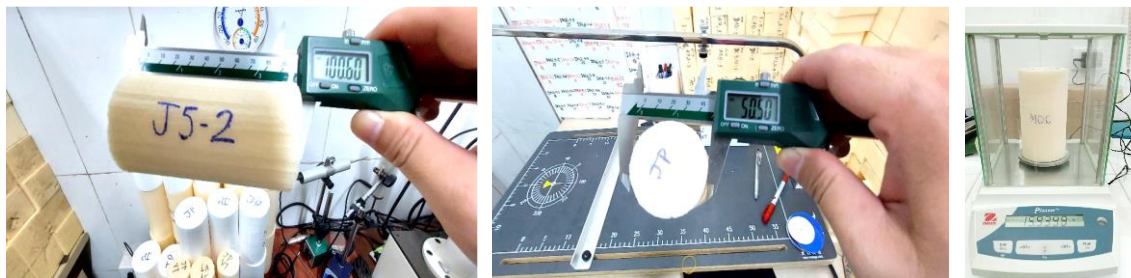
a. Vật liệu thí nghiệm

Các mẫu geofoam được cắt từ các khối EPS và XPS geofoam có ký hiệu D-20 (kích thước 4×1×0,7 m, và DX-24H (kích thước 2×1×0,5 m) được thí nghiệm theo tiêu chuẩn ASTM D1622/D1622M - 14 [15] với tốc độ nén gia tải 10 mm/phút. Những dụng cụ chính để tiến hành tạo mẫu EPS geofoam (Hình

2), bao gồm: Thiết bị cắt EPS có dây cắt bằng nhiệt, đường kính dây cắt 0.2 mm, cân điện tử chính xác đến ± 0.1 g, và thước kẹp có độ chính xác đến ± 0.1 mm và những dụng cụ bảo đảm an toàn trong phòng thí nghiệm. Mẫu thí nghiệm có dạng hình trụ với đường kính $d = 50$ mm, chiều cao $h = 100$ mm; xác định kích thước và cân khối lượng mẫu EPS theo quy trình thí nghiệm (Hình 3), các mẫu được cắt ra từ các vị trí tâm, góc và cạnh của khối EPS và XPS.



Hình 2. Thiết bị chế tạo mẫu EPS trong phòng thí nghiệm

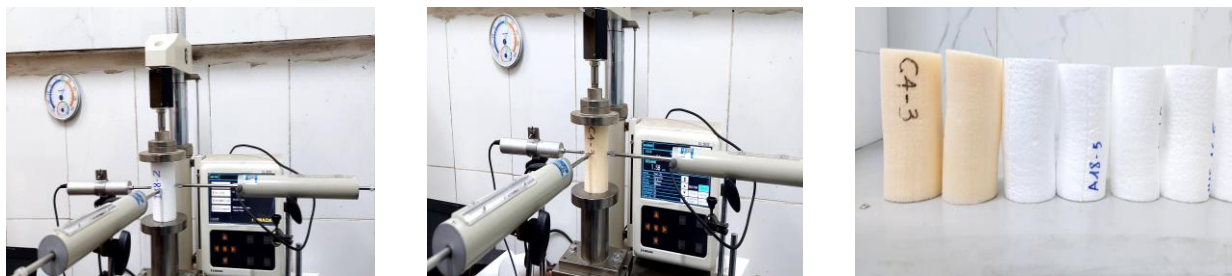


Hình 3. Đo kích thước và cân khối lượng mẫu EPS

b. Mô tả thí nghiệm

Các thí nghiệm nén một trục nhằm tìm hiểu quan hệ ứng suất - biến dạng của hai loại vật liệu EPS: D-20 và DX-24H sử dụng máy nén một trục SVZ-200NB. Mẫu thí nghiệm có dạng hình trụ tròn có chiều cao 100 mm và đường kính 50

mm. Mỗi loại cần kiểm tra số lượng tối thiểu là 10 mẫu. Ghi lại số đọc giá trị của biến dạng dọc trục và biến dạng ngang. Quá trình gia tải được duy trì cho đến khi mẫu bị phá hoại hoặc biến dạng tối thiểu 10%, tùy theo điều kiện nào xảy ra trước (Hình 4).



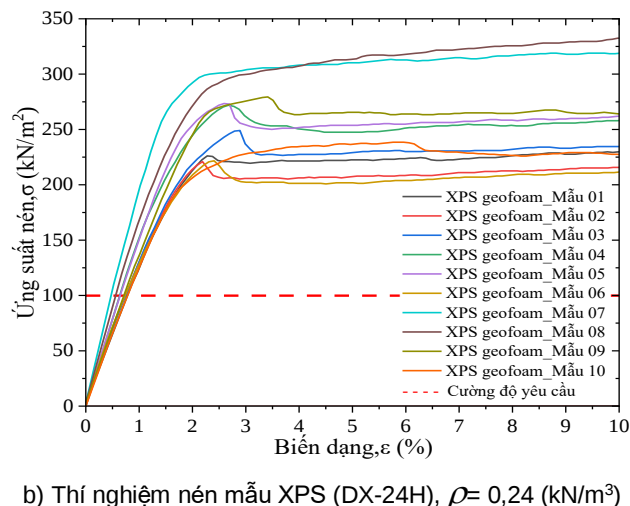
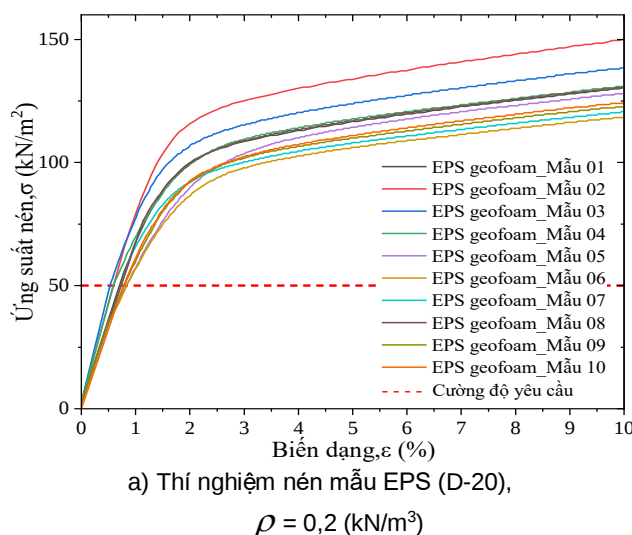
Hình 4. Thí nghiệm nén 1 trục và đo biến dạng ngang mẫu EPS và XPS

c. Kết quả thí nghiệm

Hình 5(a) và 5(b) tương ứng thể hiện quan hệ ứng suất (σ) – biến dạng (ε) của mẫu xốp D-20 và mẫu xốp DX-24H. Nhận thấy, đối với cả 2 mẫu xốp, khi biến dạng dọc trục $\varepsilon \leq 1,5\%$, quan hệ ứng suất – biến dạng là quan hệ tuyến tính. Đối với mẫu xốp EPS (D-20), sau giai đoạn tuyến tính, ứng suất vẫn tăng khi biến dạng tăng. So sánh với Tiêu chuẩn [14] (xốp D-20 có cường độ nén yêu cầu $\sigma_{yêu cầu} = 50$ kPa) thì nhận thấy mẫu xốp D-20 hoàn toàn thỏa mãn yêu cầu về cường độ với hệ số an toàn khoảng 2,0 nếu chỉ

xét trong giai đoạn đàn hồi tuyến tính.

Trong khi đó, đối với mẫu xốp XPS (DX-24H), sau giai đoạn tuyến tính, ứng suất tiếp tục tăng đến giá trị cực đại tại biến dạng dọc trục, $\varepsilon = 2,5\%$, sau đó ứng suất có xu hướng đi ngang. So sánh với Tiêu chuẩn [14] (xốp DX-24H có cường độ nén yêu cầu $\sigma_{yêu cầu} = 100$ kPa) thì nhận thấy mẫu xốp DX-24H cũng hoàn toàn thỏa mãn yêu cầu về cường độ và cũng có hệ số an toàn khoảng 2,0 nếu chỉ xét trong giai đoạn biến dạng tuyến tính.



Hình 5. Quan hệ ứng suất – biến dạng thí nghiệm nén một trục mẫu EPS và XPS

Kết quả thí nghiệm xác định hệ số Poisson với 2 loại xốp EPS (D-20) và xốp XPS (DX-24H) được trình

bày trong Bảng 2, so sánh với Tiêu chuẩn Nhật Bản (EDO-EPS) [14] là hoàn toàn phù hợp.

Bảng 2. So sánh kết quả thí nghiệm xác định hệ số Poisson với Tiêu chuẩn Nhật Bản [14]

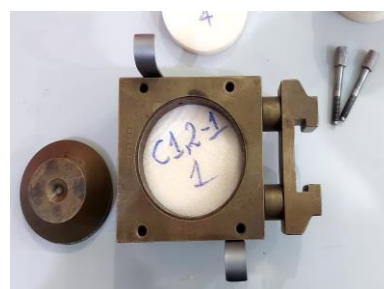
Loại xốp	Tỷ trọng (kN/m ³)	Hệ số Poisson / Thí nghiệm, Kích thước mẫu nén (cm)	
		Tiêu chuẩn Nhật Bản (EDO-EPS) [14]	Kết quả thí nghiệm
EPS (D-20)	0,2	0 / Thí nghiệm nén 1 trục, kích thước mẫu (5×5×5; 5×6×2,5; 50×50×50)	0,0167 / Thí nghiệm nén 1 trục, kích thước mẫu (φ5×10)
XPS (DX-24H)	0,24	0,1 / Thí nghiệm nén 3 trục, kích thước mẫu (φ5×10)	0,0981 / Thí nghiệm nén 1 trục, kích thước mẫu (φ5×10)

2.3 Thí nghiệm cắt phẳng

a. Vật liệu thí nghiệm

Các mẫu geofoam thí nghiệm được cắt tạo mẫu có kích thước: đường kính 6,3 cm (diện tích A =

31,17 cm²), chiều cao h = 2 cm, thí nghiệm thực hiện theo TCVN 4199:1995, thể hiện như (Hình 6, 7). Thí nghiệm được tiến hành trên máy cắt phẳng kỹ thuật số AutoShear sản xuất năm 2017 của hãng Controls – Italia.



Hình 6. Đo kích thước và chuẩn bị thí nghiệm mẫu xốp EPS và XPS

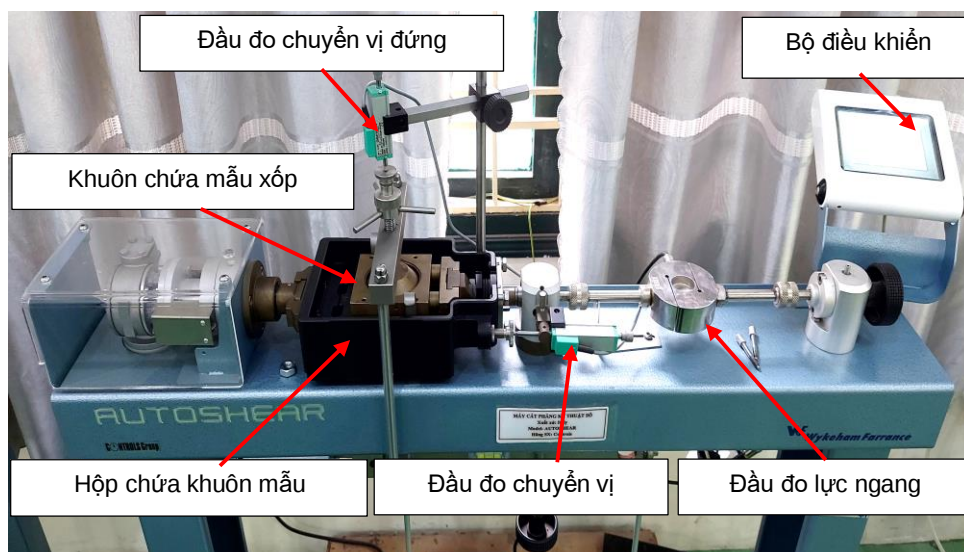
b. Mô tả thí nghiệm

Nhằm thí nghiệm xác định các đặc trưng độ bền (lực dính, c và góc ma sát trong, ϕ) đối với 2 loại xốp: EPS (D-20) và XPS (DX-24H), các thí nghiệm cắt phẳng được tiến hành theo tổ hợp 3 mẫu, với 3 cấp tải trọng 10kPa, 20kPa và 30kPa. Thí nghiệm được tiến hành theo các bước như sau:

- Đặt mẫu xốp vào hộp giữa 2 tấm đá bọt và khóa

chốt cẩn thận;

- Đặt hộp vào máy cắt, điều chỉnh đồng hồ về giá trị “0”, lấy các chốt ở hộp cắt ra;
- Đặt tải trọng đứng theo đúng với cấp tải;
- Cho máy cắt với tốc độ 1mm/phút đến biến dạng 10%, ghi lại giá trị lực cắt (τ) lớn nhất trên đồng hồ.



Hình 7. Sơ đồ bố trí thí nghiệm cắt phẳng xốp EPS và XPS

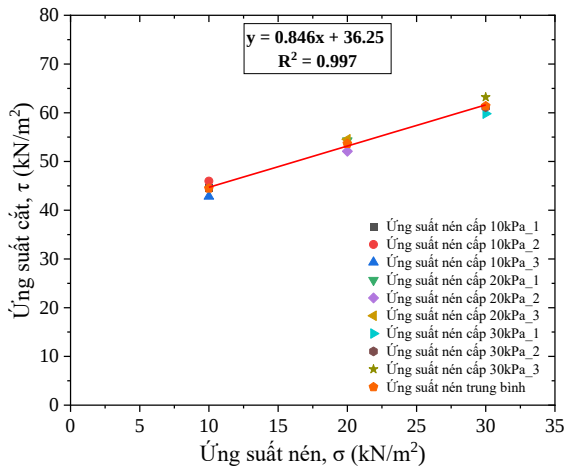
c. Kết quả thí nghiệm

Hình 8(a) và 8(b) tương ứng thể hiện kết quả thí

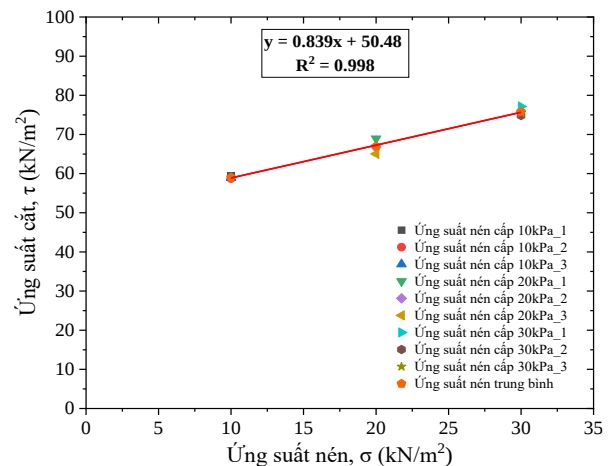
nghiệm cắt đối với 2 loại xốp EPS và XPS, kết quả cụ thể được thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Giá trị lực dính và góc ma sát trong của xốp EPS và XPS

Loại xốp	Tỷ trọng (kN/m^3)	Lực dính đơn vị, c (kPa)	Góc nội ma sát, ϕ ($^\circ$)
EPS (D-20)	0,2	36,25	40,22
XPS (DX-24H)	0,24	50,48	40,02



a) Xốp EPS (D-20), $\rho = 0,2$ (kN/m^3)

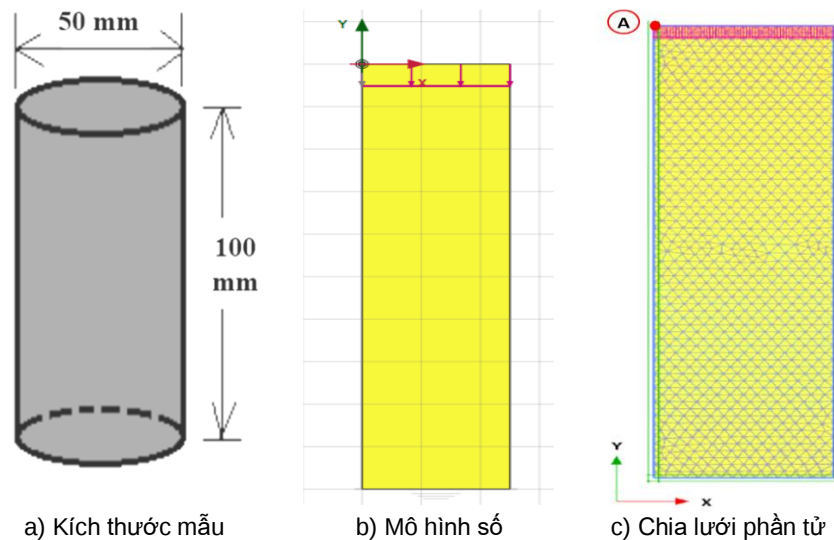


b) Xốp XPS (DX-24H), $\rho = 0,24$ (kN/m^3)

Hình 8. Quan hệ ứng suất nén - ứng suất cắt trong thí nghiệm cắt phẳng xốp

3. Mô phỏng số thí nghiệm nén một trục

3.1 Mô hình số mô phỏng thí nghiệm nén một trục



Hình 9. Mô hình số mô phỏng thí nghiệm nén một trục xốp EPS và XPS

Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm PLAXIS 2D để tiến hành mô phỏng các thí nghiệm số mô phỏng thí nghiệm nén một trục được thể hiện ở Hình 9.

Trong mô phỏng số, tác giả sử dụng mô hình đối xứng trục khối lăng trụ tròn để đảm bảo điều kiện biên của bài toán và sử dụng. Từ các kết quả mô phỏng số, nhận thấy rằng mô hình vật liệu Hardening Soil

(HS) và mô hình Mohr – Coulomb (MC) có thể sử dụng để mô phỏng ứng xử cơ học của geofoam. Thông số vật liệu của các mô hình sử dụng trong bài báo này được trình bày ở Bảng 4, số liệu từ kết quả các thí nghiệm trình bày ở mục 2.2 và 2.3. Trong phạm vi nghiên cứu này, tác giả lấy giá trị $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$, $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$ tham khảo nghiên cứu [16]. Các kết quả mô phỏng so sánh với kết quả thí nghiệm sẽ được trình bày ở mục 3.2.

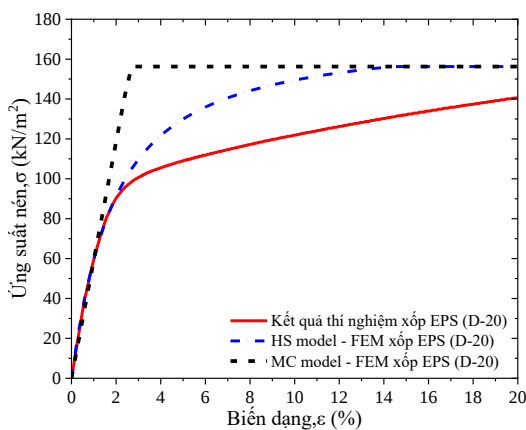
Bảng 4. Tham số mô hình sử dụng mô phỏng số đối với xốp EPS và XPS

Loại xốp	EPS (D-20)		XPS (DX-24H)	
	Mohr – Coulomb (MC)	Hardening Soil (HS)	Mohr – Coulomb (MC)	Hardening Soil (HS)
Mô hình vật liệu				
γ (kN/m ³)	0,2	0,2	0,24	0,24
Lực dính đơn vị, c (kPa)	36,25	36,25	50,48	50,48
Góc nội ma sát, ϕ (°)	40,22	40,22	40,02	40,02
Góc trương nở, ψ (°)	0	0	0	0
Mô đun cắt tuyến tham chiếu, E_{50}^{ref} (kPa)	5926	5926	13030	13030
Mô đun cốt kết tham chiếu, E_{oed}^{ref} (kPa)		5926		13030
Mô đun đỡ/tải chất tải tham chiếu, E_{ur}^{ref} (kN/m ²)		17777		39090
Hệ số Poisson's, ν	0,01	0,01	0,1	0,1

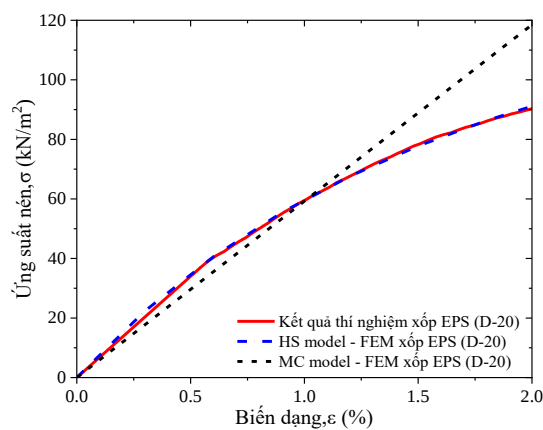
3.2 Kết quả mô phỏng số

Hình 10 và Hình 11 thể hiện các kết quả thực nghiệm và mô phỏng số thí nghiệm nén một trục đối với 2 loại xốp EPS (D-20) và XPS (DX-24H). Lưu ý rằng mô hình số trong bài báo này là mô hình đối xứng trục nên điểm A (Hình 9c) tương ứng với điểm chính giữa tại bề mặt mẫu. Trong mô phỏng số, gia tải theo chuyển vị được sử dụng (xem Hình 9b) với chuyển vị bằng nhau tại bề mặt mô hình, điều này tương ứng với chuyển vị bằng nhau tại bề

mặt mẫu trong thí nghiệm. Từ kết quả thí nghiệm (lấy giá trị trung bình của tổ hợp 3 mẫu EPS và XPS có giá trị nhỏ nhất trong 10 lần nén) kết hợp mô phỏng số theo 2 mô hình HS và MC, so sánh với các nghiên cứu [17- 18] nhận thấy mô hình Hardening Soil (HS) là mô hình vật liệu thích hợp mô phỏng ứng xử cơ học của xốp EPS (D-20), mô hình MC thích hợp mô phỏng ứng xử cơ học của xốp XPS (DX-24H), đặc biệt trong giai đoạn biến dạng dọc trục $\varepsilon \leq 2\%$.

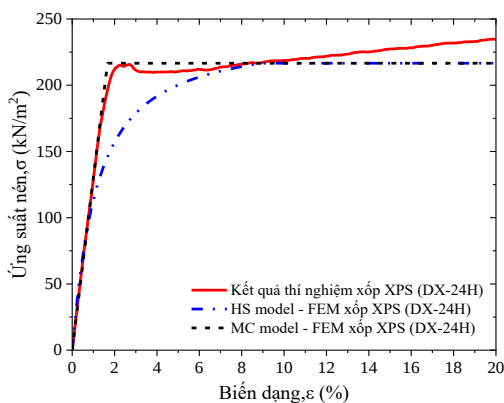


a) Kết quả thí nghiệm nén 1 trục

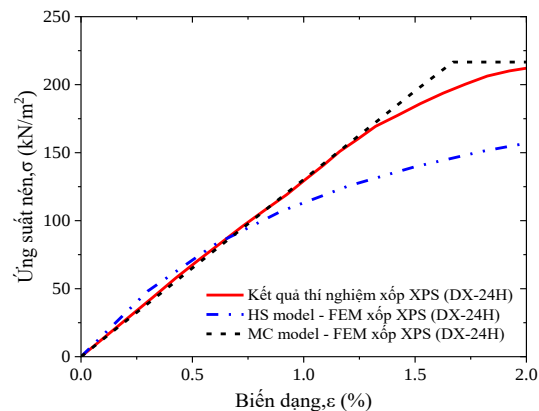


b) Phóng to kết quả thí nghiệm nén 1 trục

Hình 10. Kết quả thí nghiệm và mô phỏng số xốp EPS (D-20)



a) Kết quả thí nghiệm nén 1 trục



b) Phóng to kết quả thí nghiệm nén 1 trục

Hình 11. Kết quả thí nghiệm và mô phỏng số xốp XPS (DX-24H)

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày các kết quả nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số ứng xử cơ học của hai

loại xốp EPS (D-20; $\rho = 20$ kg/m³) và XPS (DX-24H; $\rho = 24$ kg/m³). Từ kết quả nghiên cứu rút ra kết luận sau:

- Các mẫu xếp XPS (DX-24H) và EPS (D-20) được sử dụng trong nghiên cứu đều thỏa mãn các yêu cầu về cường độ theo Tiêu chuẩn thiết kế và thi công [14];

- Đối với cả 2 loại xếp, khi biến dạng dọc trục $\varepsilon \leq 1,5\%$, quan hệ ứng suất – biến dạng là quan hệ tuyến tính;

- Xếp XPS (DX-24H) có độ cứng và cường độ lớn hơn so với xếp EPS (D-20), do đó nên sử dụng loại xếp DX-24H tại các lớp trên của nền đường và sử dụng xếp D-20 tại các lớp phía dưới;

- Mô hình Hardening Soil, với các tham số vật liệu như trong Bảng 4, có thể được sử dụng để mô phỏng quan hệ ứng suất-biến dạng của xếp EPS (D-20) và mô hình Mohr – Coulomb (MC) có thể được sử dụng để mô phỏng quan hệ ứng suất-biến dạng của xếp XPS (DX-24H), đặc biệt trong phạm vi biến dạng dọc trục $\varepsilon \leq 2\%$.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu có sử dụng các trang thiết bị của Phòng thí nghiệm Địa kỹ thuật - Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt - Học viện Kỹ thuật quân sự. Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn các đồng nghiệp tại Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt đã giúp đỡ, tạo điều kiện thuận lợi để hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lê Bá Vinh (2015), “*Phân tích ảnh hưởng của bậc thấm lý tưởng và bậc thấm không lý tưởng trong mô phỏng xử lý nền bằng phương pháp hút chân không kết hợp với bậc thấm*”, Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, số 49, tháng 6, Tr.14-21.
- [2] Nguyễn Minh Khoa, Hoàng Đình Đạm (2013), “*Nghiên cứu bộ phản áp tăng cường tải trọng giới hạn nền đất yếu chịu tải trọng của nền đường đắp*”, Tạp chí Cầu đường Việt Nam, tháng 3, Tr.15-18.
- [3] Nguyễn Đức Thuận (2017), “*Nghiên cứu ổn định nền đường đắp trên nền đất yếu gia cố bằng cọc xi than từ nhà máy nhiệt điện Duyên Hải, tỉnh Trà Vinh*”, Luận văn thạc sĩ, Trường Đại học Bách Khoa Đà Nẵng.
- [4] Almedia M. S. S., Hosseinpour I., Riccio M. and Alexiew D. (2014), “*Behavior of geotextile-encased granula columns supporting test embankment on soft deposit*”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 141(3), p.04014116.
- [5] Zheng J. J., Chen B. G., Lu Y. E., Abusharar S. W. and Yin J. H. (2009), “*The performance of an embankment on soft ground reinforced with geosynthetics and pile walls*”, Geosynthetics International, 16(1), pp.1-10.
- [6] Hosseinpour I., Almedia M. S. S., and Riccio M. (2015), “*Full-scale load test and finite-element analysis of soft ground improved by geotextile-encased granular columns*”, Geosynthetics International, 22(6), pp. 428-438.
- [7] Baykal G., Edinçliler A. and Saygili A. (2009), “*Highway embankment construction using fly ash in cold regions*”, Resources Conservation and Recycling, 42, pp.209-222.6.
- [8] Yoon S., Prezzi M., Siddiki N. Z. and Kim B. (2006), “*Construction of a test embankment using a sand-tire shred mixture as fill material*”, Waste Management, 26, pp.1033-1044.
- [9] Herle V. (2011). *Design and monitoring of EPS embankment on D1 near Ivanovice in the Czech Republic*. 4th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications, Lillestrøm, Norway.
- [10] Milan D., Martin D.U. and Michael F. (2018). *Dutch A75 highway widening using EPS embankment with a vertical side*. 5th International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications, pp. 81-87.
- [11] O'Brian AS (2001). *Design and construction of the UK's first polystyrene embankment for railway use*. 3rd International Conference on Geofoam Blocks in Construction Applications, Salt Lake City, USA.
- [12] Tsukamoto H. (1996). *Slope stabilization by the EPS method and its applications*. International symposium on EPS construction method (EPS Tokyo '96'), EPS construction method development organization, Tokyo, Japan, pp. 362–380.
- [13] Kim, H., Joo, T., Yoo, K., Han, T., Kim, T., and Jung, J. (2003). *Case studies of EPS failure and quality control by site monitoring*. Proceeding of the Korean Geotechnical Society 2003 National Conference, Daejeon, Korea, March 21, Korean Geotechnical Society, pp. 401–408, in Korean.
- [14] EPS Development Organization (2019), *EDO-EPS Construction method – Standard plan of Design and Construction*.
- [15] D1622/D1622M – 14, *Standard Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics*.
- [16] Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. (1999). *The hardening-soil model: Formulation and verification*. In R.B.J. Brinkgreve, Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam. 281–290.
- [17] Sherif S. Abdelsalam, Salem A. Azzam, Abdel-Rahman S. Abdel-Awad.(2015). *Laboratory Characterization and Numerical Modeling of EPS Geofoam*. International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering "ICASGE'15".
- [18] Henry Wong, Chin Jian Leo.(2006). *A simple elastoplastic hardening constitutive model for EPS geofoam*. Geotextiles and Geomembranes 24 (2006) 299–310.