

Nghiên cứu tham số động của hỗn hợp cát cao su với tỷ lệ khác nhau bằng thí nghiệm nén ba trục động

Hồ Đình Nguyên¹, Vũ Văn Tuấn¹, Phạm Đức Tiệp¹

¹ Học viện Kỹ thuật quân sự, 236 Hoàng Quốc Việt, Cổ Nhuế, Bắc Từ Liêm, Hà Nội

TỪ KHOẢ

Tham số động
 Mô đun trượt
 Tỷ số cản
 Cao su hạt
 Thí nghiệm nén ba trục động
 Góc ma sát trong
 Lực dính
 Thí nghiệm cắt phẳng

TÓM TẮT

Về mặt định tính cao su có khả năng giảm chấn nên khi kết hợp với vật liệu cát sẽ tạo thành hỗn hợp vật liệu vừa có khả năng chịu lực và vừa có khả năng giảm xung động. Để khẳng định các nhận định trên nghiên cứu này sẽ tiến hành xác định các tham số động (mô đun trượt, tỷ số cản) của hỗn hợp cát cao su với các hàm lượng cao su khác nhau bằng thí nghiệm nén ba trục động dưới điều kiện biến dạng cắt lớn. Đồng thời để đánh giá về khả năng chịu lực của hỗn hợp cát cao su, nhóm tác giả tiến hành nghiên cứu đặc trưng chống cắt của hỗn hợp dựa vào thiết bị thí nghiệm cắt phẳng tự động Shearmatic. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy hỗn hợp cát cao su phù hợp để làm vật liệu đắp hay làm nền cho các công trình chịu tải trọng động.

KEYWORDS

Dynamic property
 Shear modulus
 Damping ratio
 Granulated rubber
 Waste tire
 Mixture
 Dynamic triaxial tests
 Direct shear test

ABSTRACT

Rubber has the ability to absorb shock thus waste tires mixed with soil has the ability to reduce vibration while still having a high bearing capacity. This paper will study the dynamic property (shear modulus and damping ratio) of granulated rubber and sand mixtures at several different percentages by dynamic triaxial tests in the laboratory. The strength characteristics of granulated rubber and sand mixtures will also be determined by Automatic Shear Testing equipment. The results show that the granulated rubber and sand mixtures are suitable for filling material that may be subjected to seismic loads.

1. Đặt vấn đề

Sự gia tăng nhanh chóng số lượng lốp xe phế liệu mỗi năm trên toàn thế giới đang là một vấn đề lớn được quan tâm của nhiều quốc gia. Sự tích tụ quá mức này đe dọa đến cả môi trường và sức khỏe con người. Mặc dù đã có những nghiên cứu để tái sử dụng lốp xe phế liệu như: nghiên cứu cao su phế thải để sử dụng làm vật liệu mặt đường [2, 4]; nghiên cứu cao su phế thải làm vật liệu đắp cho nền đường cao tốc, gia cố đất – tường chắn [1, 3, 5] được thực hiện nhưng dường như là không đủ để giảm lượng chất thải này. Do đó, việc nghiên cứu xác định các đặc tính địa kỹ thuật chung của hỗn hợp cát - cao su nhằm phát triển các phương pháp mới tái sử dụng lốp xe phế liệu đã trở thành một mục tiêu cấp thiết quan trọng nhằm giảm tác động của chúng đến môi trường, cũng như sức khỏe cộng đồng.

Thời gian gần đây nhiều nghiên cứu thực nghiệm khác nhau về đặc tính động học của hỗn hợp cát - cao su đã được tiến hành. Pistolas [9] đã chỉ ra rõ ràng rằng biến dạng cắt có ảnh hưởng đáng kể đến tỷ số cản. Sarajpoor [10] báo cáo rằng ở biên độ biến dạng cắt nhỏ hơn 0,1 % sự gia tăng hàm lượng thể tích cao su dẫn đến tỷ số cản cao hơn, trong khi ở biên độ biến dạng cắt lớn hơn khoảng 0,1 %, xu hướng ngược lại. Trong khi Okur [8] thu được những phát hiện trái ngược bằng cách sử dụng các thử nghiệm cột cộng hưởng, chỉ ra rằng biên độ biến dạng cắt nhỏ hơn khoảng 0,05 %, sự gia tăng hàm lượng thể tích cao su dẫn đến tỷ số cản thấp hơn và ngược lại.

Madhusudhan [7] thậm chí còn báo cáo rằng tỷ lệ giảm chấn của hỗn hợp cát - cao su giảm khi biến dạng cắt tăng lên.

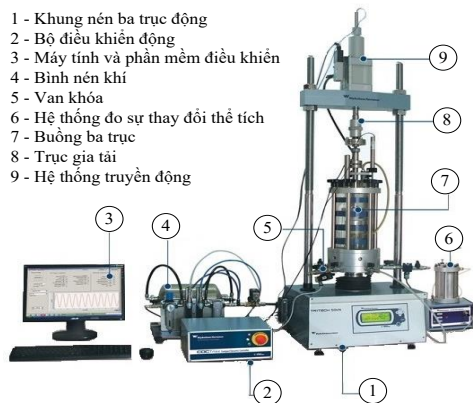
Từ các tổng hợp trên cho thấy, mặc dù các nghiên cứu đã thu được kết quả sơ bộ nhưng vẫn còn một số kết quả chưa mang tính thuyết phục và toàn diện như tỷ lệ trộn cao su trong hỗn hợp, sự ảnh hưởng của mức độ biến dạng cắt đến tính chất hỗn hợp... Vì vậy trong nội dung nghiên cứu, nhóm tác giả tiến hành nghiên cứu thực nghiệm trong phòng xem xét sự thay đổi tham số động (mô đun trượt G, tỷ số cản D) của hỗn hợp cát - cao su với tỷ lệ cao su khác nhau bằng thí nghiệm nén ba trục động. Kostas Senetakis và đồng nghiệp [11] đã tổng hợp các nghiên cứu về hỗn hợp cát cao su cho thấy các nghiên cứu trước đây thường đưa ra 2 phương pháp lựa chọn hàm lượng cao su (kiểm soát theo khối lượng hoặc theo thể tích) và lựa chọn hàm lượng cao su ở mức độ từ thấp đến trung bình ($\leq 35\%$ về mặt khối lượng hoặc $\leq 55\%$ về mặt thể tích). Trong nghiên cứu này các mẫu hỗn hợp cát - cao su được kiểm soát về mặt thể tích với các tỷ lệ khác nhau là: 0 %, 20 %, 40 %, 50 %. Ứng với mỗi hỗn hợp cùng 1 tỷ lệ cao su (hệ số rỗng $e=0,6$) tiến hành thí nghiệm 2 mẫu với áp lực nén đẳng hướng khác nhau (100 kPa, 150 kPa) trong điều kiện biến dạng cắt lớn (biến dạng tương đối $\gamma > 0,1\%$). Ngoài ra để đánh giá về mặt chịu lực các tác giả sử dụng thiết bị cắt phẳng tự động Shearmatic để xác định các tham số chống cắt của hỗn hợp cát cao su theo tỷ lệ khác nhau.

*Liên hệ tác giả: dinhnguyen18088@gmail.com

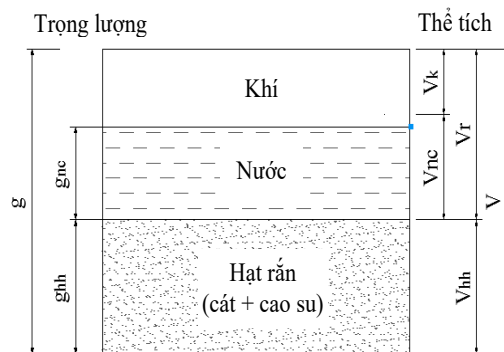
Nhận ngày 02/11/2021, sửa xong ngày 09/12/2021, chấp nhận đăng 11/05/2022

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2022.306>

2. Thí nghiệm nén ba trục động xác định các tham số động của hỗn hợp cát cao su

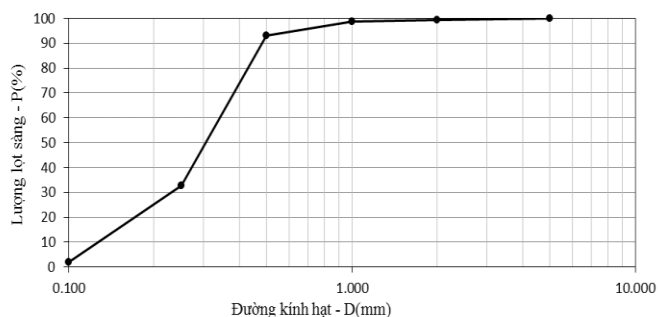


Hình 1. Hệ thống thiết bị máy nén ba trục động.

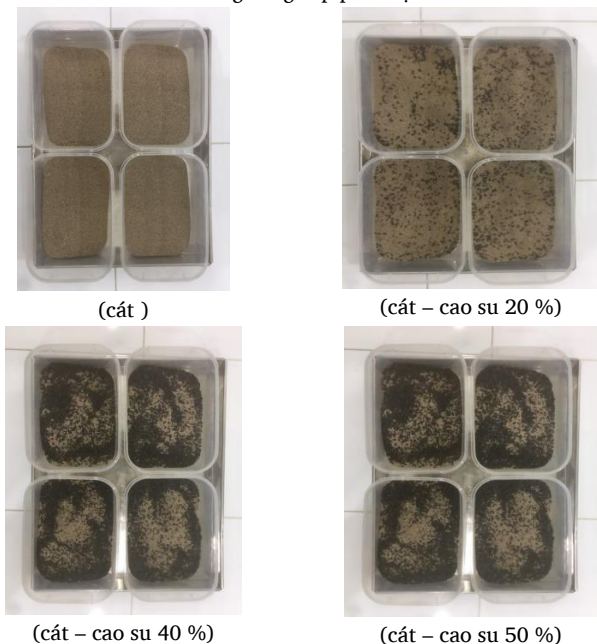


Hình 2. Sơ đồ 3 pha của hỗn hợp cát cao su.

2.1. Vật liệu thí nghiệm



Hình 3. Đường cong cấp phối hạt của cát.



Hình 4. Mẫu cát cao su với tỷ lệ thể tích cao su khác nhau.

Cát thí nghiệm sử dụng loại cát tiêu chuẩn Sông Hồng có cấp phối như Hình 3. Các hạt cao su thải được cung cấp bởi một công ty

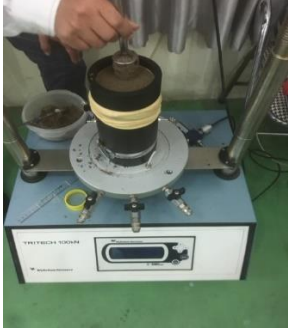
tại Hà Nội chuyên cung cấp sản phẩm phân hủy từ lốp xe cao su phế thải có kích thước khá đồng đều đường kính trung bình 2 mm. Khối lượng thể tích cao su 1,1 g/cm³. Tỷ lệ cao su trong hỗn hợp được kiểm soát về mặt thể tích so với tổng thể tích hỗn hợp hạt rắn. Mẫu thí nghiệm được phân làm 4 loại khác nhau về hàm lượng cao su là: 0 %; 20 %; 40 % và 50 %, mỗi loại sử dụng 2 mẫu tiến hành thí nghiệm. Các tổ mẫu này có cùng một hệ số rỗng $e=0,6=constant$ (Hình 4).

2.2. Mô tả sơ bộ quy trình thí nghiệm

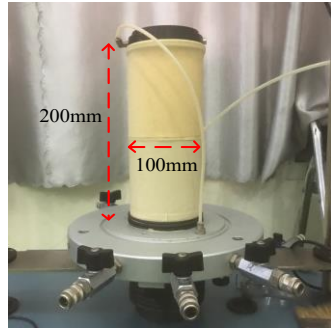
Mẫu thí nghiệm có kích thước hình trụ tròn đường kính $D=100$ mm, chiều cao $H=200$ mm, khi đầm lên từng lớp mẫu cần kiểm soát đồng đều về độ chặt (mẫu được chia làm 4 phần bằng nhau, đầm ướt và ứng với mỗi lớp đầm đến khi đạt được chiều dày mẫu là bội số của $H/4=50$ mm). Mẫu thí nghiệm được sục khí CO₂ trong vòng 30 phút. Dòng khí CO₂ qua mẫu có trọng lượng riêng lớn hơn khí trong mẫu nên nó dễ dàng chiếm chỗ của các hạt khí và đẩy các hạt khí ra ngoài mẫu. Sau khi kết thúc sục CO₂ thì trong các lỗ rỗng gần hoàn toàn được chiếm bởi CO₂, sau đó cho dòng nước sạch (đã khử khí) qua mẫu. Nước sẽ hòa tan CO₂ và lỗ rỗng chỉ còn nước. Quá trình thí nghiệm chính theo các giai đoạn sau đây:

- Giai đoạn bão hòa: mẫu được bão hòa qua việc điều chỉnh áp lực buồng và áp lực ngược. Kết thúc bão hòa khi hệ số bão hòa $B \geq 0,95$.
- Giai đoạn cố kết mẫu: thiết lập áp lực buồng và áp lực ngược theo giá trị áp lực buồng hữu hiệu mong muốn ($\sigma_3=100$ kPa hoặc $\sigma_3=150$ kPa), sau đó đợi để áp lực nước lỗ rỗng dư tiêu tán về bằng áp lực ngược thì quá trình cố kết dừng lại.
- Giai đoạn gia tải động: tải trọng được thiết lập theo tiêu chuẩn ASTM D3999 [[12]]

Tải trọng hình sin và gia tải theo áp lực trên đầu mẫu: tần số gia tải $f=1$ Hz, biên độ gia tải theo tỷ số ứng suất $CSR=0,1 \div 0,3$.



Hình 5. Đầm mẫu theo độ chặt yêu cầu.



Hình 6. Mẫu sau khi chế bị xong.



Hình 7. Tiến hành sục khí CO₂ và cấp nước đi qua mẫu thí nghiệm.



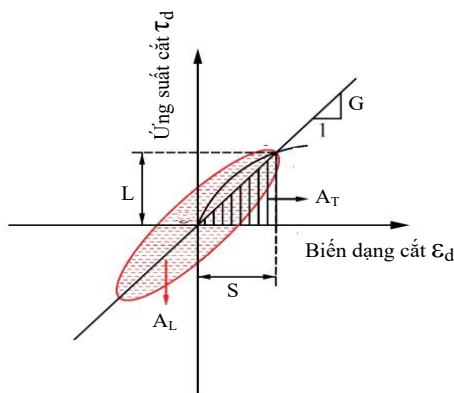
Hình 8 trình bày đặc tính ứng suất - biến dạng của đất khi chịu tải trọng dọc trục theo chu kỳ, các tham số mô đun trượt G và hệ số cản D cũng sẽ tự động tính toán và tự động ghi lại theo tiêu chuẩn ASTM D3999 [12], cụ thể như sau:

- Biến dạng cắt động trong mẫu thử:

$$\gamma_{SA} = \frac{\epsilon_{SA}}{1 + \nu} \cdot 100\% \quad (1)$$

trong đó:

- + $\epsilon_{DA} = S_{DA}/L_S$ là biến dạng dọc trục biên độ kép;
- + $\epsilon_{SA} = \epsilon_{SA}/2$ là biến dạng dọc trục biên độ đơn;
- + ν là hệ số Poisson;
- + S_{DA} là chuyển dịch biên độ kép (mm);
- + L_S là chiều cao mẫu sau khi cố kết (mm).



Hình 8. Biểu đồ xác định mô đun cắt động và tỷ số cản của hỗn hợp cát-cao su.

- Mô đun đàn hồi động được tính toán như sau:

$$E = \frac{L_{DA}}{S_{DA}} \cdot \frac{L_S}{A} \quad (2)$$

trong đó:

- + L_{DA} là tải biên độ kép (kN);
- + S_{DA} là chuyển dịch biên độ kép (mm);
- + L_S là chiều cao mẫu sau khi cố kết (mm);
- + A là diện tích mặt cắt ngang của mẫu.

- Mô đun cắt động của một mẫu được xác định:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (3)$$

- Tỷ số cản là một tham số động lực học quan trọng của đất thể hiện đặc tính trễ của ứng suất - biến dạng của đất khi chịu tải theo chu kỳ. Nó cũng phản ánh sự tiêu tán năng lượng. Tỷ số cản D có thể được xác định với công thức:

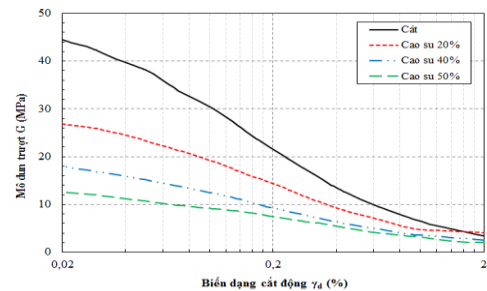
$$D = \frac{A_L}{4\pi \cdot A_T} \cdot 100\% \quad (4)$$

trong đó:

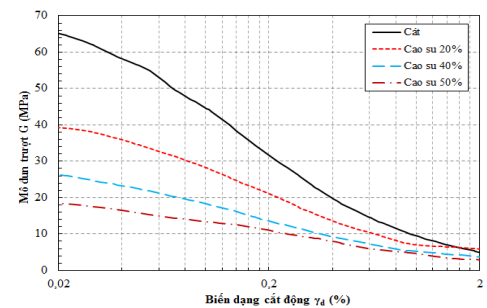
- + A_L là diện tích bên trong vòng lặp trễ (kN - m);
- + $A_T = 0,5 \cdot L \cdot S$

2.3. Kết quả thí nghiệm và bàn luận

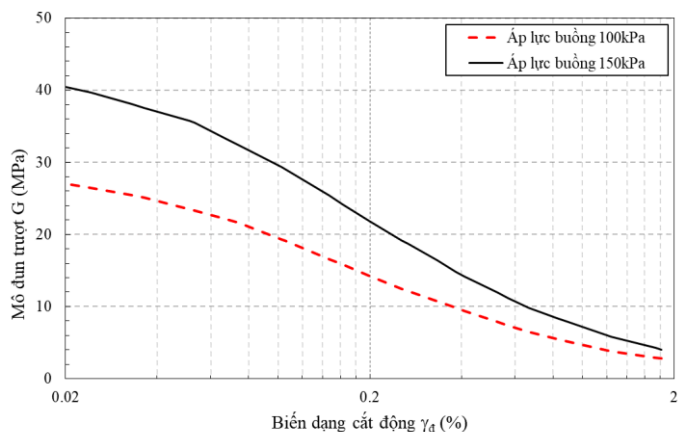
Kết quả thí nghiệm được thể hiện từ Hình 9 đến Hình 14.



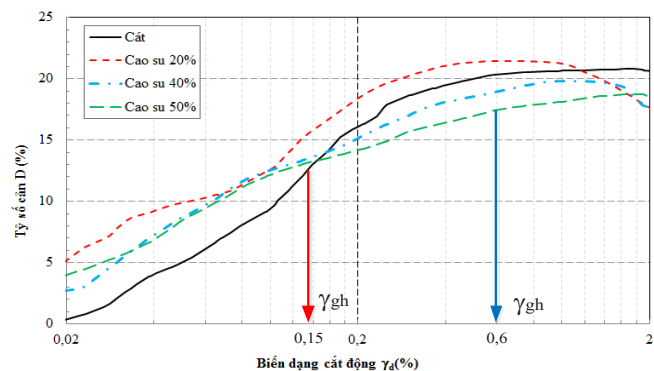
Hình 9. Quan hệ Mô đun trượt G – Biến dạng cắt động dưới áp lực buồng hữu hiệu $\sigma_3 = 100$ kPa.



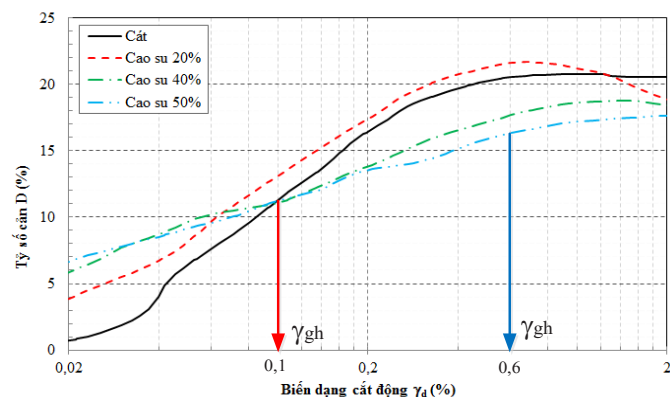
Hình 10. Quan hệ Mô đun trượt G – Biến dạng cắt động dưới áp lực buồng hữu hiệu $\sigma_3 = 150$ kPa.



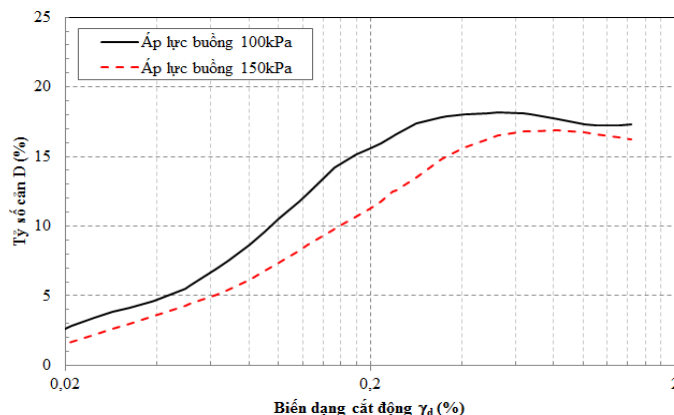
Hình 11. Quan hệ Mô đun trượt G – Biến dạng cắt động mẫu chứa 20 % cao su dưới áp lực buồng hữu hiệu khác nhau.



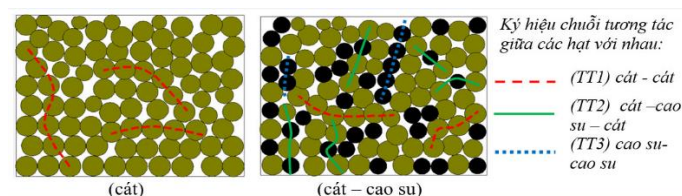
Hình 12. Quan hệ tỷ số rỗng D – Biến dạng cắt động dưới áp lực buồng hữu hiệu $\sigma_3 = 100$ kPa.



Hình 13. Quan hệ Tỷ số rỗng D – Biến dạng cắt động với áp lực buồng hữu hiệu $\sigma_3 = 150$ kPa.



Hình 14. Quan hệ Tỷ số rỗng D – Biến dạng cắt động của mẫu chứa 20 % cao su dưới áp lực buồng hữu hiệu khác nhau.



Hình 15. Sơ đồ minh họa các chuỗi tương tác trong hỗn hợp cát cao su.

Hạt cao su có độ cứng nhỏ, khả năng biến dạng lớn và tính đàn hồi cao, do đó rất dễ dàng thay đổi hình dạng. Ngược lại các hạt cát lại rất cứng (đặc biệt so với các hạt cao su). Hình 15 là sơ đồ hóa hỗn hợp cát (0 % cao su) và hỗn hợp cát – cao su, có thể hiện 3 chuỗi tương tác giữa các nhóm hạt với nhau [[6]]. Trong đó chuỗi tương tác cát – cao su – cát và cao su – cao su có xu hướng giống tính chất của cao su (biến dạng lớn và đàn hồi cao). Khi hàm lượng cao su cao thì chuỗi tương tác TT2 và TT3 tăng lên và giảm chuỗi tương tác TT1. Do vậy mẫu có hàm lượng cao su càng tăng thì mô đun đàn hồi động và mô đun trượt động giảm đi.

- Khi áp lực buồng 100 kPa, hàm lượng thể tích cao su lần lượt là 20 %, 40 % và 50 % thì mô đun cắt động ban đầu suy giảm lần lượt là 40,30 %; 59,25 % và 71,67 %.

- Khi áp lực buồng 150 kPa, hàm lượng thể tích cao su lần lượt là 20 %, 40 % và 50 % thì mô đun cắt động ban đầu suy giảm lần lượt là 38,54 %; 57,77 % và 72,77 %.

- Khi tăng áp lực buồng (từ 100 kPa lên 150 kPa) thì sẽ ngăn cản sự dịch chuyển của các hạt chính vì vậy làm tăng mô đun cắt động (Hình 11).

Tính rỗng của hỗn hợp cát – cao su được biểu hiện bởi sự rỗng của các thành phần riêng biệt như: bản thân các hạt cao su, sự dịch chuyển của hạt và ma sát giữa các hạt. Mức độ rỗng phụ thuộc độ lớn của biến dạng cắt:

- Khi biến dạng cắt nhỏ hơn 0,6 % thì tỷ số rỗng tăng lên, biến dạng cắt lớn hơn 0,6 % thì ngược lại, tỷ số rỗng lại giảm. Điều này được giải thích là do ở mức độ biến dạng lớn mẫu bị hóa lỏng hoàn toàn

nên mẫu ứng xử như chất lỏng. Do vậy tỷ số cản của nó suy giảm về giá trị của chất lỏng tương ứng.

- Mẫu với hàm lượng cao su 20 % với áp lực bùồng khác nhau đều cho thấy tỷ số cản luôn cao hơn mẫu cát với sự thay đổi của biến dạng cắt. Còn với các mẫu hàm lượng cao su cao hơn (40 %, 50 %) thì tỷ số cản của hỗn hợp cát cao su chỉ lớn hơn tỷ số cản của cát khi biến dạng cắt nhỏ hơn giá trị biến dạng cắt giới hạn ($\gamma_{gh} = 0,15$ % với áp lực bùồng bằng 100 kPa, $\gamma_{gh} = 0,1$ % với áp lực bùồng bằng 150 kPa). Sự thay đổi này có thể được giải thích như sau: khi biến dạng nhỏ hơn biến dạng cắt giới hạn, đặc tính cản của hỗn hợp chủ yếu là do bản thân các hạt cao su còn khi biến dạng lớn hơn thì đặc tính cản chủ yếu do thành phần ma sát giữa các hạt, mà sự có mặt của cao su làm suy giảm góc ma sát trong của hỗn hợp, chính vì vậy tính cản của hỗn hợp này nhỏ hơn so với cát.

- Tóm lại xét về mặt động học thì việc bổ sung các hạt cao su vào hỗn hợp cát làm tăng hệ số cản cho hỗn hợp ở mọi mức độ biến dạng ứng với hàm lượng cao su 20 %. Còn với hàm lượng 40 %-50 % chỉ có ý nghĩa với mức độ biến dạng trung bình.

3. Thí nghiệm máy cắt phẳng xác định các tham số chống cắt của hỗn hợp cát cao su.

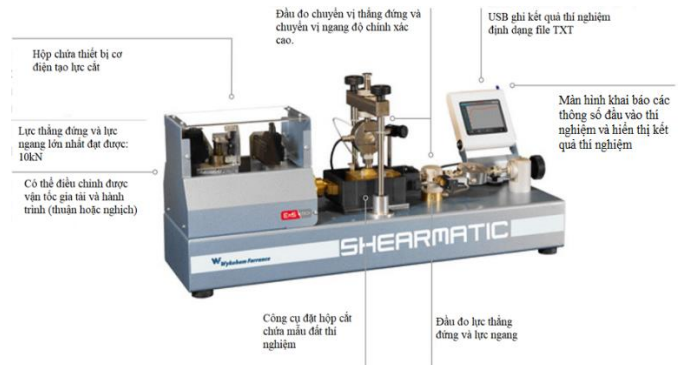
Để nghiên cứu sự ảnh hưởng của hàm lượng cao su đến góc ma sát trong của hỗn hợp cát cao su, tác giả đã sử dụng máy cắt phẳng tự động Shearmatic tiến hành nghiên cứu thực nghiệm để xác định các tham số chống cắt của hỗn hợp này với các tỷ lệ cao su thay đổi 0 %; 20 % và 40 %. Ngoài ra kết quả nghiên cứu này cũng là cơ sở để đánh giá về mặt sức chịu tải của các giải pháp móng đặt trên nền hỗn hợp cát – cao su.

Thí nghiệm xác định tham số chống cắt của mẫu cát cao su khi gia tải dưới cùng độ chặt (cùng hệ số rỗng $e = 0,6$), tiến hành thí nghiệm cắt 3 mẫu tương ứng với các cấp tải nén được cài đặt là $\sigma = 50$ kPa; 100 kPa; 150 kPa. Thí nghiệm được tiến hành trên cơ sở tiêu chuẩn TCVN 4199:1995 [13], trình tự thí nghiệm cho 1 mẫu cát cao su 20 % ứng với tải trọng nén $\sigma = 100$ kPa như sau:

- Bước 1: Xác định khối lượng thể tích cát và cao su cần để thiết kế hỗn hợp thí nghiệm.
- Bước 2: Tạo mẫu chế bị trong hộp cát. Mẫu được tạo trong hộp cát với dạng hình trụ có kích thước không đổi (đường kính $D = 6,35$ cm; chiều cao mẫu $h = 2,0$ cm).
- Bước 3: Lắp hộp cát với mẫu đã chế bị vào máy cắt phẳng kỹ thuật số tự động Sheramatic.
- Bước 4: Đổ nước vào khay đựng hộp cát tiến hành giai đoạn bão hòa mẫu.
- Bước 5: Cài đặt các thông số ban đầu trước khi tiến hành thí nghiệm

- Bước 6: Tiến hành giai đoạn cố kết mẫu.
- Bước 7: Tiến hành giai đoạn cắt trực tiếp.
- Bước 8: Lấy số liệu đo và kết thúc thí nghiệm cho mẫu chế bị đầu tiên.

Với các mẫu còn lại cũng được tiến hành như trình tự trên.

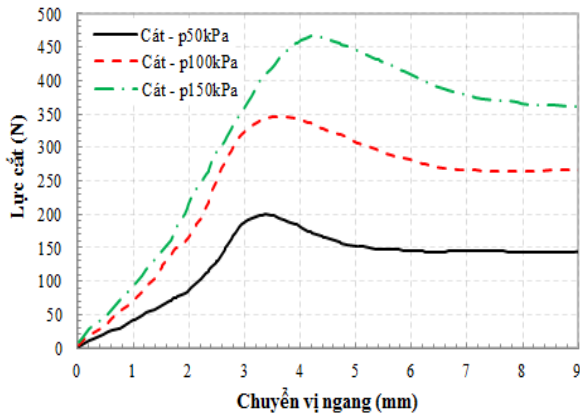


Hình 16. Các bộ phận chính máy cắt phẳng kỹ thuật số tự động Shearmatic.

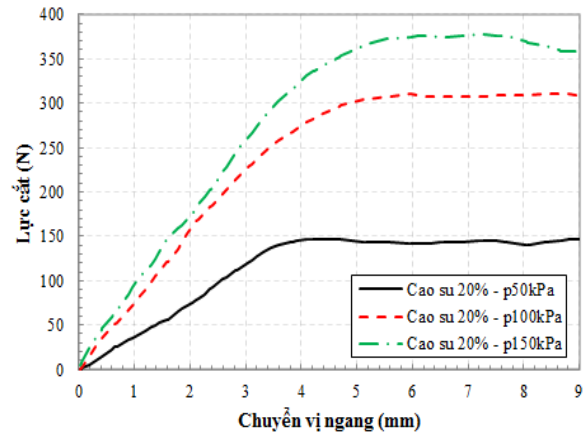


Hình 17. Chế bị mẫu cắt phẳng.

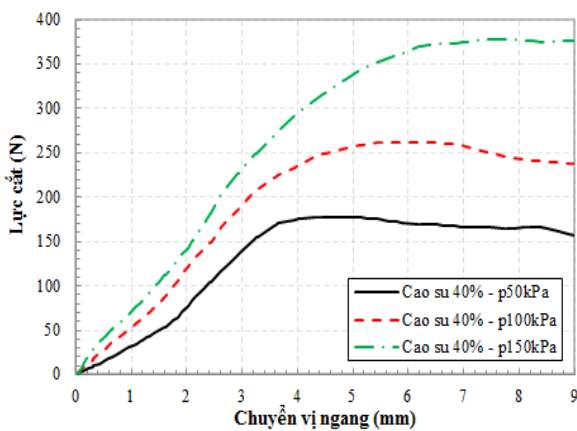
Từ Hình 18 đến Hình 23 thể hiện kết quả thí nghiệm cắt phẳng. Quy luật chung đường cong quan hệ chuyển dịch ngang giữa 2 thốt cắt và ứng suất cắt của 3 loại mẫu đều như sau: mặc dù cùng mức độ đầm chặt nhưng hỗn hợp cát – cao su không có ứng xử hóa mềm sau cực đỉnh như cát chặt. Khi hàm lượng cao su tăng lên thì cường độ chống cắt và góc ma sát trong giảm ($\varphi = 40,2^\circ$ – mẫu cát; $\varphi = 36,2^\circ$ – mẫu cát cao su 20%; $\varphi = 32,3^\circ$ – mẫu cát cao su 40 %).



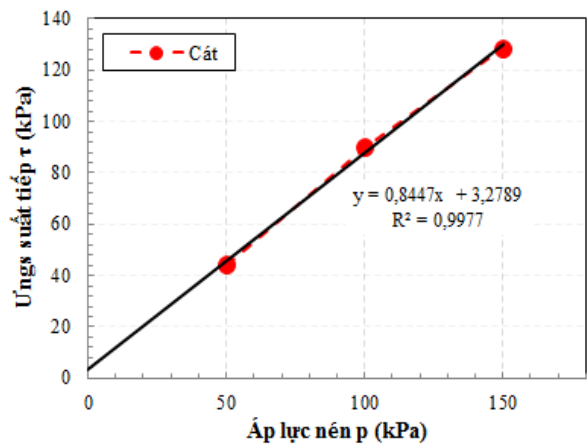
Hình 18. Quan hệ Lực cắt – Chuyển vị ngang mẫu cát.



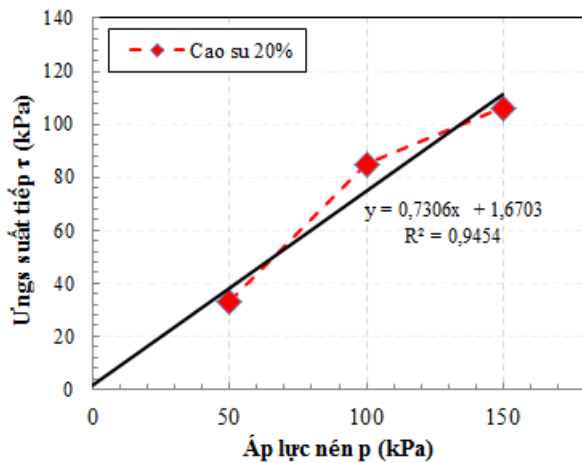
Hình 19. Quan hệ Lực cắt – Chuyển vị ngang mẫu cát – su 20 %.



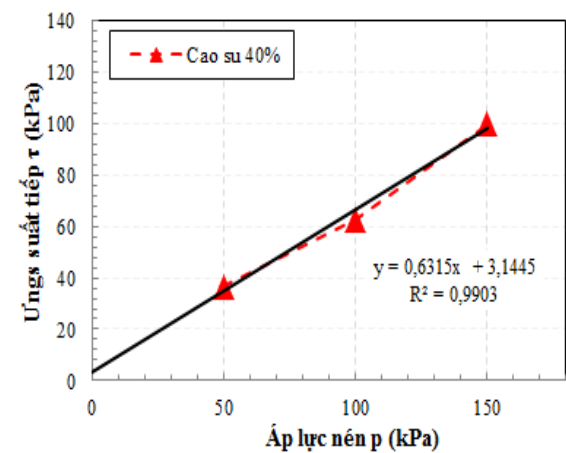
Hình 20. Quan hệ Lực cắt – Chuyển vị ngang mẫu cát – cao su 40 %.



Hình 21. Sức kháng cắt của cát.



Hình 22. Sức kháng cắt của hỗn hợp cát – cao su 20 %.



Hình 23. Sức kháng cắt của hỗn hợp cát – cao su 40 %.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm bằng thiết bị 3 trục động để xác định các tham số động của hỗn hợp cát – cao su với tỷ lệ khác nhau (0 ÷ 50 %). Kết quả nghiên cứu cho thấy tham số động không những phụ thuộc vào hàm lượng hạt cao su mà còn phụ thuộc vào áp lực ban đầu trong mẫu (áp lực buồng) và mức

độ biến dạng cát. Mặc dù số lượng mẫu thử không nhiều nhưng tác giả cũng mạnh dạn đề xuất sử dụng mẫu cát cao su tỷ lệ 20 % để làm vật liệu đắp nền, cũng như lớp đệm nhân tạo cho các công trình chịu tải trọng động. Cấp phối này đảm bảo tỷ số cân luôn lớn hơn tỷ số cân của vật liệu cát ở mọi cấp độ biến dạng trượt khác nhau. Mật khác cấp phối này cũng đảm bảo mô đun trượt động không bị suy

giảm quá nhiều so với cát, và các tham số kháng cắt của nó cũng tương đối cao.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Ahmed, I., & Lovell, C. W. (1993). *Rubber soils as lightweight geomaterials*. Transportation research record, (1422).
- [2]. Eleazer, W. E., & Barlaz, M. A. (1992, September). Technologies for utilization of waste tires in asphalt pavement. In *Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction* (pp. 193-201). ASCE.
- [3]. Humphrey, D. N., Sandford, T. C., Cribbs, M. M., & Manion, W. P. (1993). *Shear strength and compressibility of tire chips for use as retaining wall backfill*. Transportation research record, (1422).
- [4]. Liang, R. Y., & Lee, S. (1996). *Short-term and long-term aging behavior of rubber modified asphalt paving mixture*. Transportation research record, 1530(1), 11-17.
- [5]. Lee, J. H., Salgado, R., Bernal, A., & Lovell, C. W. (1999). *Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 125(2), 132-141.
- [6]. Liu, L., Cai, G., & Liu, S. (2018). *Compression properties and micro-mechanisms of rubber-sand particle mixtures considering grain breakage*. Construction and Building Materials, 187, 1061-1072.
- [7]. Madhusudhan, B. R., Boominathan, A., & Banerjee, S. (2017). *Static and large-strain dynamic properties of sand-rubber tire shred mixtures*. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(10), 04017165.
- [8]. Okur, D. V., & Umu, S. U. (2018). *Dynamic properties of clean sand modified with granulated rubber*. Advances in Civil Engineering, 2018.
- [9]. Pistolas, G. A., Anastasiadis, A., & Pitolakis, K. (2015). *Dynamic properties of gravel-recycled rubber mixtures: resonant column and cyclic triaxial tests*. In Proceedings of the XVI ECSMGE 2015, Edinburgh, UK, 13-17; pp. 2613-2618.
- [10]. Sarajpoo, S., Kavand, A., Zogh, P., & Ghalandarzadeh, A. (2020). *Dynamic behavior of sand-rubber mixtures based on hollow cylinder tests*. Construction and Building Materials, 251, 118948.
- [11]. Senetakis, K., Anastasiadis, A., & Pitolakis, K. (2012). *Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 33(1), 38-53.
- [12]. ASTM D3999. *Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus*.
- [13]. TCVN 4199:1995 “Đất xây dựng - Phương pháp xác định sức chống cắt trong phòng thí nghiệm ở máy cắt phẳng”.