



EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE STIFFNESS OF SUBGRADE SOIL UNDER CYCLIC LOADING

Bui Van Phu*, Nguyen Quang Tuan

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 27/01/2021

Revised: 26/03/2021

Accepted: 02/04/2021

Published online: 15/04/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.3.12>

* Corresponding author

Email: buiphugt@utc.edu.vn

Abstract. The resilient modulus (M_r) of subgrade soil is used to describe stress-strain relationship of subgrade soil under cyclic load. This paper presents the results of the M_r test of subgrade soils in the laboratory. There were two types of subgrade soil of two different flexible pavement construction projects in Vietnam used for this research. The tests were conducted using Cyclic Triaxial Testing System. The experimental procedure is in accordance with AASHTO T307-99. The test results show that the stress state (confining pressure and deviator stresses) is the significant factor on the resilient modulus of subgrade soil. M_r increases with the increase of confining pressure and decreases with the increase of deviator stress. Also, the subgrade soil type of coarse-grained soil or fine-grained soil affects the relationship between M_r and stress state. From the test results, the Viscoroute 2.0, a multi-layer system calculating software was employed to simulate and calculate to determine the suitable M_r value for the design of asphalt pavement structures.

Keywords: Resilient modulus M_r , subgrade soil, Viscoroute 2.0, cyclic load.



NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM MÔ ĐUN ĐỘ CỨNG CỦA ĐẤT NỀN DƯỚI TÁC DỤNG CỦA TẢI TRỌNG LẶP

Bùi Văn Phú*, Nguyễn Quang Tuấn

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 27/01/2021

Ngày nhận bài sửa: 26/03/2021

Ngày chấp nhận đăng: 02/04/2021

Ngày xuất bản Online: 15/04/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.3.12>

* Tác giả liên hệ

Email: buiphugt@utc.edu.vn

Tóm tắt. Mô đun đàn hồi động (M_r) của đất nền đường được sử dụng để mô tả mối quan hệ ứng suất-biến dạng của đất nền đường dưới tác dụng của tải trọng có tính chu kỳ. Bài báo trình bày kết quả thí nghiệm trong phòng xác định giá trị M_r của đất nền đường. Hai loại vật liệu đất nền đường của 2 dự án xây dựng kết cấu áo đường mềm tại Việt Nam được sử dụng để nghiên cứu. Thí nghiệm được thực hiện bằng máy nén 3 trục. Quy trình thí nghiệm tuân theo tiêu chuẩn AASHTO T 307-99. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng trạng thái ứng suất (áp lực buồng nén và ứng suất lệch) là yếu tố ảnh hưởng rất lớn đến mô đun đàn hồi động của đất nền. Khi cấp áp lực buồng nén tăng thì giá trị M_r tăng lên, trong khi nếu cấp ứng suất lệch tăng thì giá trị M_r giảm xuống. Ngoài ra, loại đất nền là đất hạt mịn hay đất hạt thô có ảnh hưởng tới mối quan hệ giữa giá trị M_r với trạng thái ứng suất. Từ kết quả thí nghiệm, phần mềm tính toán kết cấu hệ nhiều lớp Viscoroute 2.0 được sử dụng để mô phỏng và tính toán để xác định giá M_r phù hợp cho công tác thiết kế kết cấu áo đường cụ thể.

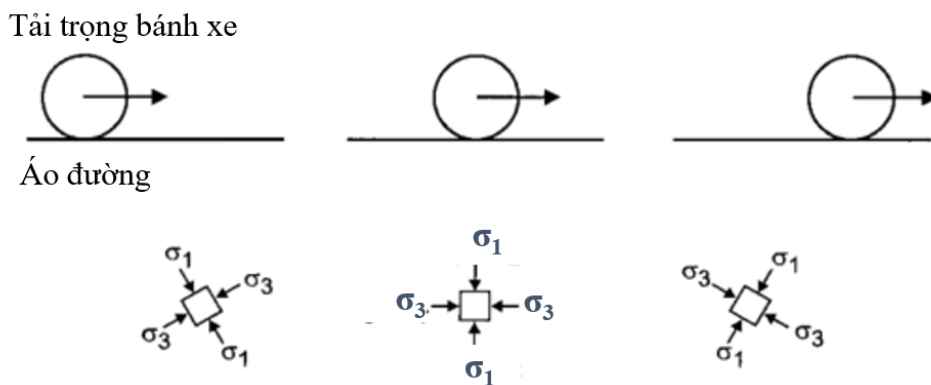
Từ khóa: Mô đun đàn hồi động M_r , đất nền đường, Viscoroute 2.0, tải trọng lặp.

© 2021 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc thiết kế kết cấu áo đường mới đảm bảo về mặt kinh tế cũng như kỹ thuật phụ thuộc chủ yếu vào việc mô tả một cách đúng đắn ứng xử cơ học của các lớp vật liệu làm đường trong đó có lớp đất đắp nền đường dưới tác dụng của tải trọng xe chạy. Hiện nay, trong tiêu chuẩn

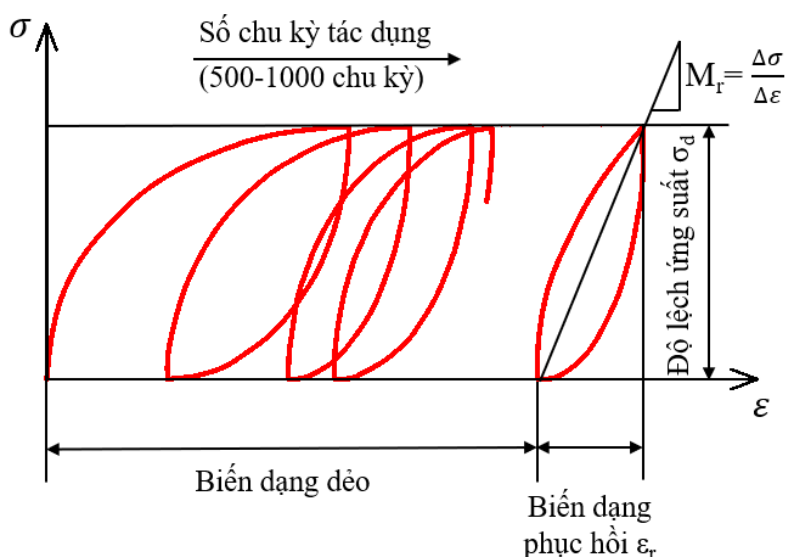
thiết kế kết cấu áo đường mềm 211-06 [1] của Việt Nam, mô đun của lớp đất nền đường được sử dụng để mô tả ứng xử của vật liệu là mô đun tĩnh. Tuy nhiên, giá trị mô đun tĩnh không phản ánh thực tế làm việc của đất nền trong kết cấu áo đường dưới tác dụng của tải trọng có tính chu kỳ (tải trọng động) khi xe chạy qua. Dưới tác dụng của tải trọng xe chạy, các vật liệu trong kết cấu áo đường chịu tải trọng có tính động, nghĩa là có sự thay đổi về độ lớn và phương chính tác dụng theo thời gian xe chạy qua. Hình 1 minh họa một phân tố ứng suất trong kết cấu áo đường dưới dụng của tải trọng xe [2]. Do vậy, khi nghiên cứu về tính chất cơ học của vật lớp đất đắp nền đường cũng như các lớp vật liệu khác của kết cấu áo đường cần phải đặt trong điều kiện tải trọng có tính động. Việc tính toán sử dụng các giá trị mô đun của vật liệu đất đắp nền đường nên được xác định bằng các thí nghiệm mô đun động để thể hiện đúng đặc tính làm việc của vật liệu trong kết cấu.



Hình 1. Minh họa trạng thái ứng suất trong kết cấu dưới tác dụng của tải trọng xe chạy.

Trong vài năm trở lại đây, phương pháp phân tích thiết kế áo đường theo phương pháp cơ học-thực nghiệm (Mechanistic Empirical Pavement Design – MEPD) bắt đầu được quan tâm nghiên cứu ở Việt Nam. Một trong những thách thức trong việc phổ biến phương pháp này ở Việt Nam là việc thiếu các đặc tính cơ học tiên tiến của vật liệu đất, đá và nhựa đường, là các dữ liệu đầu vào của phương pháp thiết kế này. Mô đun đàn hồi động M_r thể hiện đặc tính đàn hồi của đất nền và vật liệu rời dưới tác dụng của tải trọng có tính động. Nó đại diện cho một tính chất vật liệu cơ bản, đặc biệt quan trọng đối với thiết kế kết cấu áo đường vì nó đóng vai trò là thông số đầu vào chính của phương pháp thiết kế MEPD.

Các thí nghiệm mô đun động của đất nền chỉ ra rằng, dưới tác dụng của tải trọng có tính chu kỳ với biên độ nhỏ hơn cường độ phá hủy của vật liệu, vật liệu đất nền có tính dẻo và xuất hiện biến dạng dẻo. Cả biến dạng dẻo và biến dạng đàn hồi đều xảy ra ở giai đoạn đầu của lực tác dụng. Tuy nhiên, khi số lần lặp của tải trọng tăng lên, độ tăng biến dạng dẻo trong mỗi chu kỳ giảm xuống và dần dần nhỏ đi ở những chu kỳ tiếp theo. Sau một số chu kỳ tác dụng nhất định, biến dạng gần như phục hồi hoàn toàn. Mô đun đàn hồi động M_r của đất nền được xác định là tỉ số giữa độ lệch ứng suất σ_d và biến dạng phục hồi ϵ_r khi vật liệu chịu tác dụng của tải trọng lặp có tính chu kỳ (Hình 2) [3] [4]. Để xác định giá trị M_r trong phòng, mẫu đất được thí nghiệm sử dụng máy nén 3 trục. Áp lực buồng nén được thiết kế để mô phỏng áp lực hông của đất nền trong kết cấu áo đường. Trong quá trình thí nghiệm, các xung tải trọng động được tác dụng lên mẫu đất. Khoảng thời gian gia tải là 0.1 giây nhằm mục đích mô phỏng xung ứng suất trên lớp đất nền do tải trọng xe chạy qua.



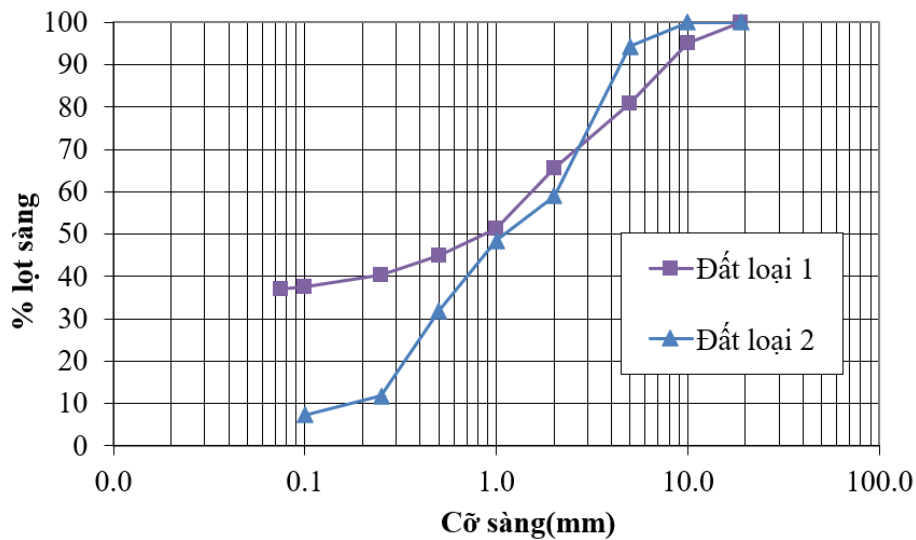
Hình 2. Tính chất của vật liệu rời dưới tác dụng của tải trọng lặp.

Thí nghiệm sử dụng máy nén 3 trục để xác định mô đun đàn hồi động của đất nền là loại thí nghiệm phức tạp và đắt tiền. Ở Việt Nam thí nghiệm đo mô đun đàn hồi động M_r của đất nền chưa được thực hiện nhiều. Một số những thí nghiệm đầu tiên đã được thực hiện như nghiên cứu của Nguyễn Quang Tuấn và các cộng sự [5], nhưng số lượng mẫu thực hiện còn ít, nhiều yếu tố ảnh hưởng khác như độ ẩm, dạng cấp phối, đầm nén ... chưa được xem xét và nghiên cứu đầy đủ. Do đó, cần phải thực hiện thêm nhiều thí nghiệm trên các loại đất nền khác nhau để có thể khái quát về ứng xử của vật liệu theo cấp tải trọng và cấp áp lực hông, giúp hoàn thiện các chỉ tiêu đánh giá vật liệu sử dụng trong thiết kế và tính toán kết cấu áo đường theo phương pháp hiện đại. Bài báo là một trong những nghiên cứu đầu tiên về thực nghiệm xác định giá trị M_r của đất nền đường tại Việt Nam.

2. VẬT LIỆU VÀ THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu

Để có thể đánh giá được ảnh hưởng của loại cấp phối của đất nền đến mô đun đàn hồi động M_r , hai loại đất đắp nền đường được sử dụng để tiến hành thí nghiệm xác định mô đun đàn hồi động. Mẫu đất loại 1 là đất đắp nền đường của dự án đường cao tốc Vân Đồn-Móng Cái và mẫu đất loại 2 là của dự án cải tạo đường Thanh Niên- thị xã Sơn Tây-Hà Nội. Hình 3 thể hiện thành phần hạt của vật liệu nghiên cứu. Mẫu đất loại 1 thuộc nhóm đất hạt mịn (được phân loại là đất A6 theo tiêu chuẩn AASHTO M 145-91 (2008) [6]) còn mẫu đất loại 2 là đất hạt thô (được phân loại là đất A-2-6 theo tiêu chuẩn AASHTO M 145-91 (2008)). Các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của các vật liệu được thể hiện trong Bảng 1. Đất đắp nền đường sau khi được lấy về từ hiện trường được chế bị trong phòng thí nghiệm thành mẫu hình trụ có đường kính 70mm, cao 140mm với độ chặt K98 (Hình 4). Quy trình chế bị mẫu tuân thủ theo tiêu chuẩn [7].



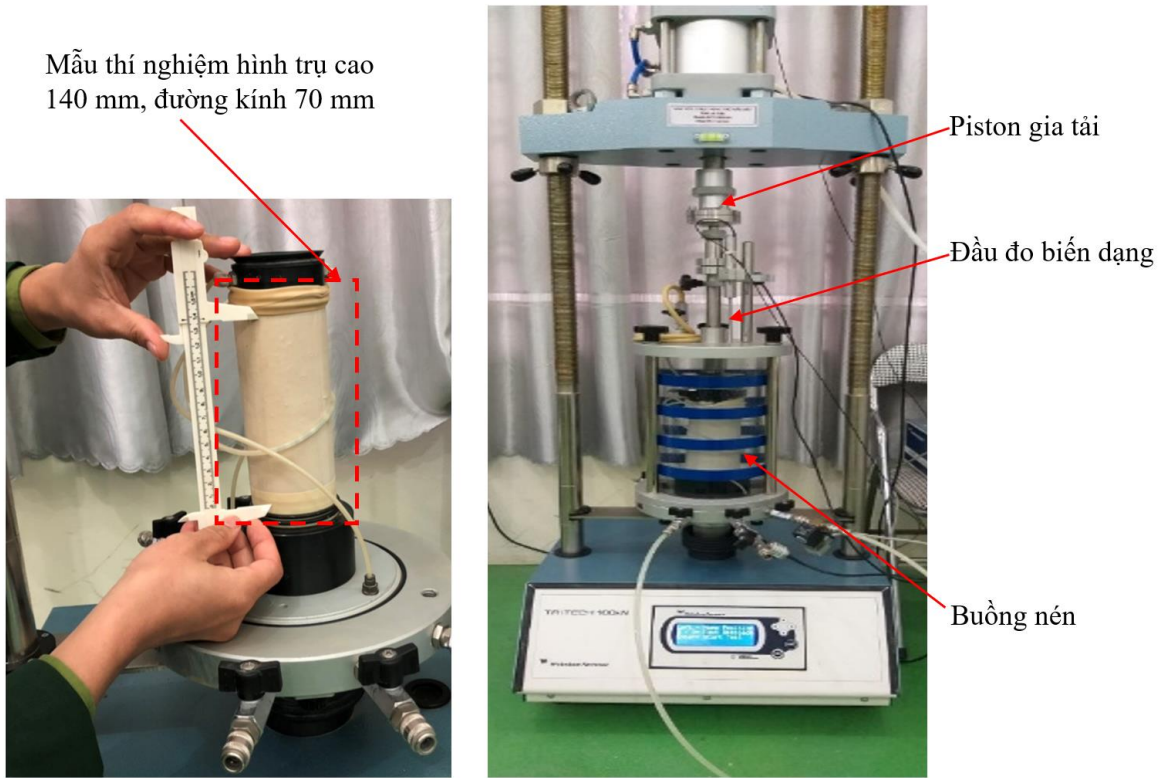
Hình 3. Biểu đồ thành phần hạt của các vật liệu nghiên cứu.

Bảng 1. Tính chất cơ lý cơ bản của vật liệu sử dụng làm thí nghiệm.

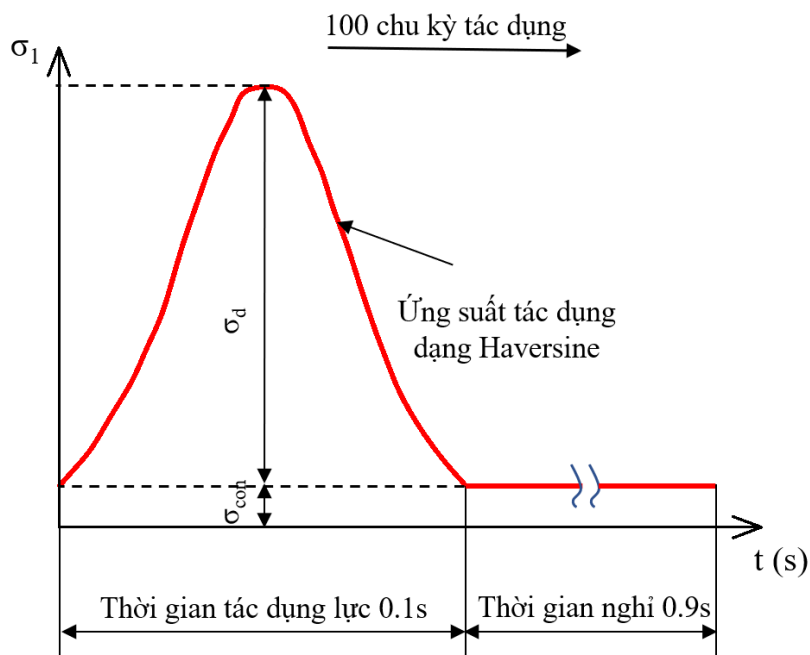
Chỉ tiêu thí nghiệm		Đất loại 1	Đất loại 2
Giới hạn chảy, dẻo (%) (TCVN 4196:2012)	Giới hạn chảy (W_L)	40.0	30.75
	Giới hạn dẻo (W_P)	22.8	17.42
	Chỉ số dẻo (PI)	17.2	13.33
Đàn nén (22 TCN 333-06)	Dung trọng khô lớn nhất (g/cm^3)	1.811	1.928
	Độ ẩm tối ưu (%)	16.82	13.16
CBR (ngâm 4 ngày) (%) (22 TCN 332-06)	CBR của đất K95	9.25	7.60
	CBR của đất K98	10.99	9.50
	CBR của đất K100	12.32	10.80
Phân loại đất theo AASHTO M 145-91 (2008)		A 6	A-2-6

2.2. Thí nghiệm

Các mẫu được tiến hành thí nghiệm đo mô đun đàn hồi động M_r trên máy nén 3 trục hiện đại tại phòng thí nghiệm vật liệu, trường Học viện Kỹ thuật Quân sự (Hình 4). Máy nén 3 trục cho phép thí nghiệm nén mẫu với nhiều cấp áp lực buồng nén khác nhau. Ở mỗi cấp áp lực buồng nén khác nhau, máy có khả năng gia tải động với nhiều biên độ và hình dạng lực tác dụng khác nhau. Tiêu chuẩn thí nghiệm [7] được áp dụng để tiến hành thí nghiệm cho từng mẫu đất với trình tự như sau: Để loại bỏ biến dạng dẻo, ban đầu mẫu được gia tải 1000 chu kỳ tại áp lực buồng nén σ_3 bằng 41.4 kPa và tải trọng lặp với độ lệch ứng suất σ_d bằng 24.8 kPa. Sau đó, mẫu được thí nghiệm tại 3 cấp áp lực buồng nén theo thứ tự lần lượt là 41.1 kPa, 27.6 kPa và 13.8 kPa. Ứng với mỗi cấp áp lực buồng nén, mẫu được tác dụng 5 cấp tải trọng lặp với σ_d theo thứ tự lần lượt bằng 12.4 kPa, 24.8 kPa, 37.3 kPa, 49.7 kPa và 62 kPa. Số lượng chu kỳ tác dụng của mỗi cấp tải trọng lặp là 100 chu kỳ. Như vậy, mỗi mẫu được thực hiện 16 lần gia tải khác nhau (bao gồm tính cả lần gia tải 1000 chu kỳ ban đầu).



Hình 4. Chuẩn bị mẫu và cài đặt máy thí nghiệm



Hình 5. Dạng tải trọng chu kỳ tác dụng lên mẫu trong thí nghiệm.

Tải trọng lặp tác dụng có dạng hình harersine với 0.1 giây tác dụng lực và 0.9 giây nghỉ như Hình 5. Trong đó, ứng suất tiếp xúc $\sigma_{con} = 0.1\sigma_d$.

3. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ VÀ XÁC ĐỊNH GIÁ TRỊ M_R PHÙ HỢP

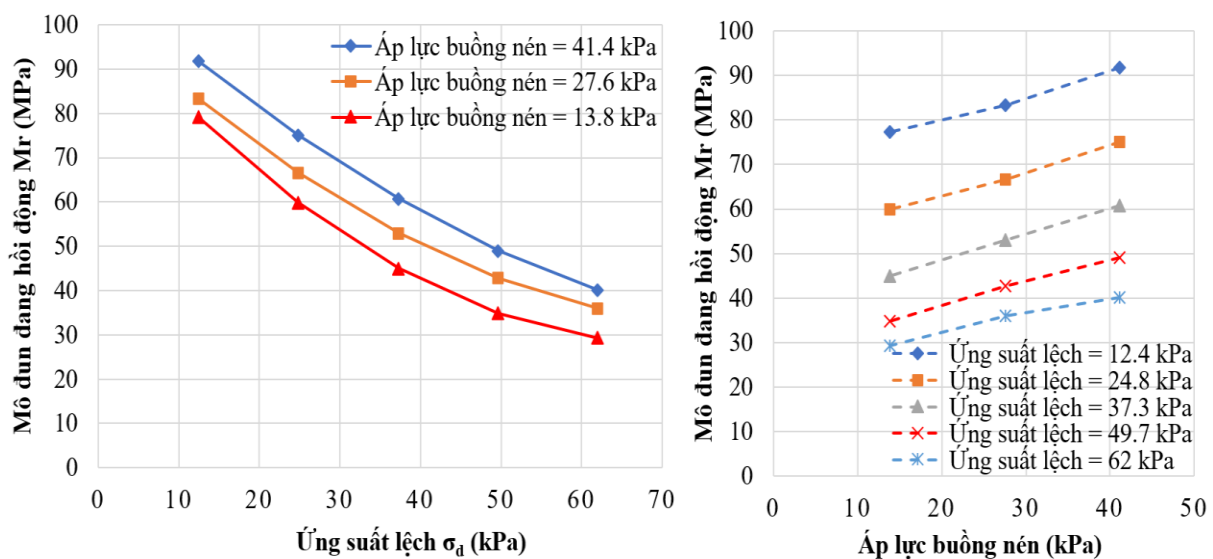
3.1. Phân tích kết quả

Giá trị mô đun động M_R của mỗi lượt gia tải được tính là giá trị trung bình của 5 chu kỳ tải cuối cùng khi mà sự biến thiên giá trị mô đun cũng như biến dạng dẻo theo lượt tải trọng tác dụng là rất nhỏ và ổn định. Kết quả đo giá trị mô đun đàn hồi động của các mẫu thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 2. Hình 6 và Hình 7 thể hiện ảnh hưởng của cấp áp lực buồng nén σ_3 và ứng suất lệch σ_d đến giá trị M_R của mẫu đất loại 1 và mẫu đất loại 2 tương ứng.

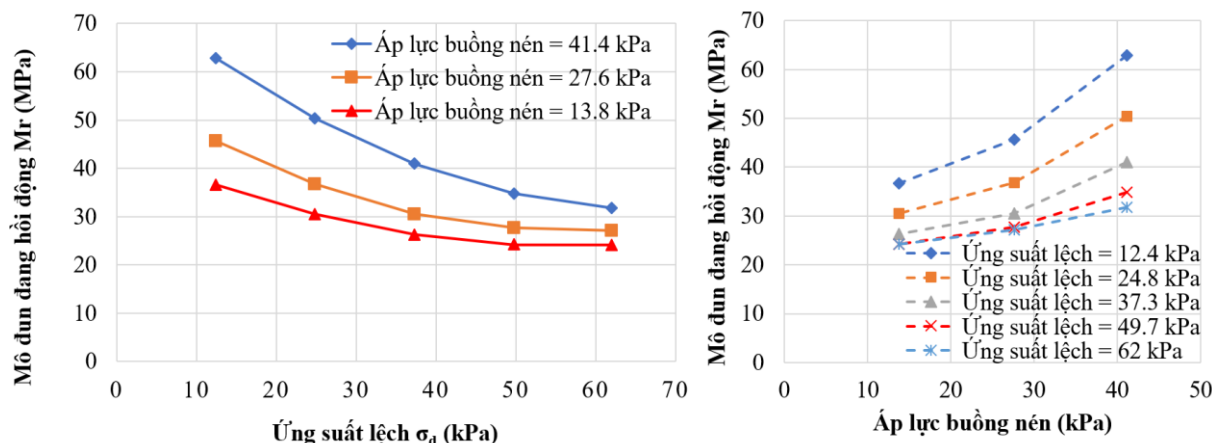
Từ Bảng 2 ta thấy mẫu đất loại 1 có giá trị mô đun đàn hồi động M_R thay đổi trong khoảng từ 29 Mpa đến 92 Mpa. Trong khi đó giá trị M_R của mẫu đất loại 2 biến thiên từ 24 MPa đến 63 MPa. Ứng với mỗi cặp cấp áp lực hông và ứng suất lệch, giá trị M_R của mẫu đất loại 2 luôn nhỏ hơn của mẫu đất loại 1. Điều này cũng phù hợp với kết quả thí nghiệm CBR của đất loại 1 cao hơn đất loại 2. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây trên thế giới được tổng hợp trong nghiên cứu [8] về mối quan hệ giữa mô đun động M_R với CBR.

Bảng 2. Giá trị mô đun đàn hồi động M_R (MPa) của các mẫu thí nghiệm.

Ứng suất lệch σ_d (kPa)	Mẫu đất loại 1			Mẫu đất loại 2		
	Cấp áp lực hông σ_3 (kPa)			Cấp áp lực hông σ_3 (kPa)		
	41.4	27.3	13.8	41.4	27.3	13.8
12.4	91.83	83.35	79.24	62.88	45.68	36.63
24.8	75.02	66.56	59.89	50.36	36.84	30.55
37.3	60.69	52.96	45.02	40.95	30.54	26.32
49.7	49.07	42.78	34.87	34.80	27.71	24.23
62	40.09	35.93	29.33	31.82	27.18	24.16



Hình 6. Ảnh hưởng của cấp áp lực buồng nén và ứng suất lệch lên giá trị mô đun đàn hồi động M_R của mẫu đất loại 1.



Hình 7. Ảnh hưởng của cấp áp lực bùồng nén và ứng suất lệch lên giá trị mô đun đàn hồi động M_r của mẫu đất loại 2.

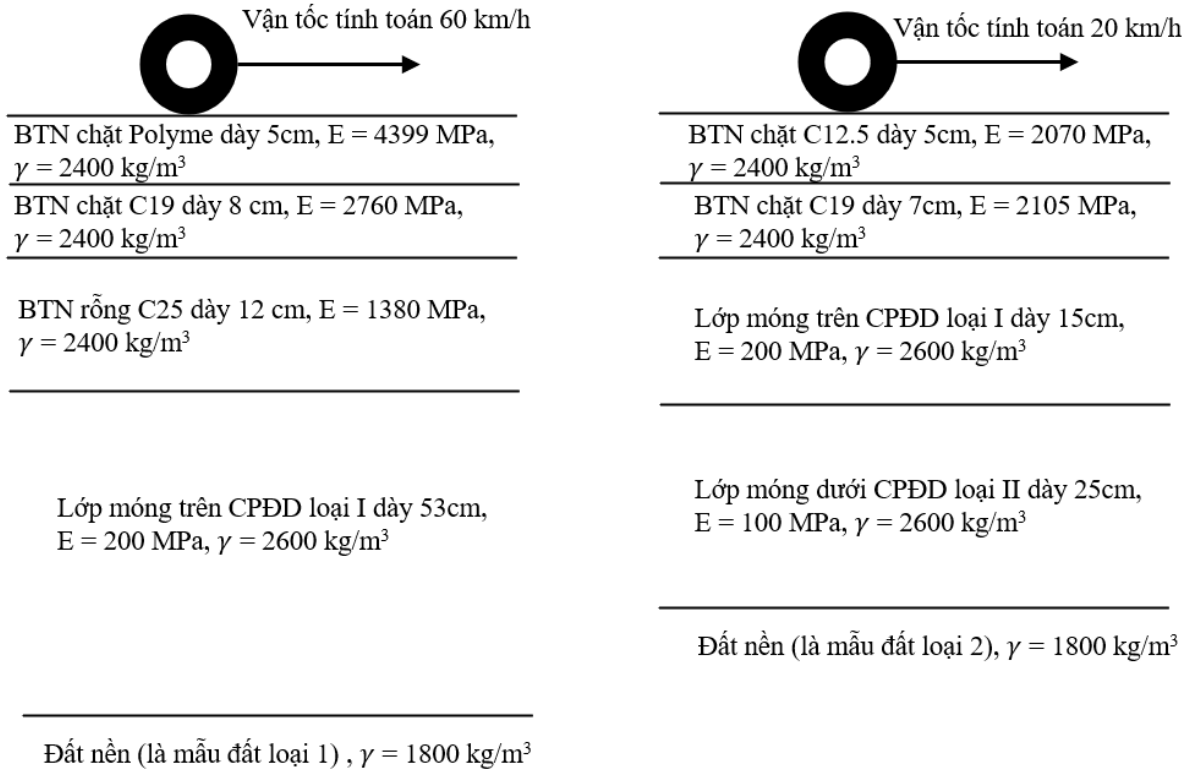
Từ Hình 6 và Hình 7 có thể nhận thấy xu hướng chung rằng cả cấp áp lực bùồng nén và ứng suất lệch đều có ảnh hưởng đáng kể đến giá trị mô đun đàn hồi động M_r . Khi áp lực bùồng nén tăng thì giá trị M_r tăng, nhưng khi giá trị ứng suất lệch tăng thì giá trị M_r lại giảm. Điều này phù hợp với xu hướng chung của M_r đất nền khi chịu tác dụng của tải động.

Rõ ràng rằng, hàm hồi quy thể hiện mối quan hệ giữa giá trị M_r và các trạng thái ứng suất là phi tuyến và có dạng khác nhau đối với 2 loại đất. Từ Hình 6 ta thấy ảnh hưởng của ứng suất lệch lên giá trị M_r là đáng kể hơn so với ảnh hưởng của cấp áp lực bùồng nén. Cụ thể, giá trị trung bình của độ giảm mô đun M_r là xấp xỉ 1.0 Mpa cho mỗi kPa tăng của cấp áp lực bùồng nén, trong khi đó ứng với mỗi kPa tăng của cấp áp lực gia tải độ giảm trung bình của mô đun M_r chỉ là 0.52 MPa. Cần lưu ý rằng loại đất thể hiện trên Hình 6 là mẫu đất hạt mịn được phân loại là đất A6 theo phân loại của AASHTO. Xu hướng như trên Hình 6 cũng đã được tìm thấy ở các nghiên cứu trước đây như nghiên cứu [9] [10] [11] và [12]. Tuy nhiên, đối với loại đất hạt thô-mẫu đất loại 2 (được phân loại là đất A-2-6 theo AASHTO) (Hình 7) cho thấy các đường cong có xu hướng chụm lại khi giá trị ứng suất lệch tăng lên. Khoảng cách giữa các đường cong ở các cấp áp lực bùồng nén khác nhau giảm dần khi cấp tải trọng tác dụng tăng lên. Nhìn chung, đối với mẫu đất loại 2, cấp áp lực hông có ảnh hưởng lớn hơn ứng suất lệch lên giá trị M_r . Cụ thể, độ giảm M_r trung bình bằng 0.41 MPa cho mỗi kPa cấp áp lực bùồng nén trong khi lại đạt 0.56 MPa cho mỗi kPa cấp áp lực hông. Hiện tượng ứng xử này của mẫu đất hạt thô cũng được tìm thấy trong nghiên cứu [9] [12].

3.2. Lựa chọn giá trị M_r phù hợp cho thiết kế kết cấu áo đường

Giá trị mô đun đàn hồi động M_r thu được từ phòng thí nghiệm là một hàm số của trạng thái ứng suất gồm áp lực hông và ứng suất lệch. Một vấn đề đặt ra là chọn được một giá trị M_r phù hợp từ mối quan hệ này để dùng cho tính toán kết cấu áo đường cụ thể. Elliod (1992) [13] đã đề xuất sử dụng áp lực hông bằng không và ứng suất lệch 41.6 kPa khi lựa chọn giá trị M_r từ thí nghiệm trong phòng. Tuy nhiên, trên thực tế, lớp đất nền ngoài chịu tác dụng của tải trọng xe còn phải chịu tác dụng của tải trọng bản thân kết cấu áo đường, do đó không thể loại bỏ ảnh hưởng của áp lực hông trong tính toán giá trị M_r . Huang (1993) [14] sử dụng phần mềm KENLAYER để phân tích ứng suất trên mặt đường bao gồm lớp mặt bê tông nhựa dày 50 mm (2 in), lớp móng trên bê tông nhựa dày 100 mm (4 in) và lớp móng dưới gia cố dày 150 mm (6 in) trên lớp đất nền. Khi sử dụng tải trọng trục tiêu chuẩn 80 kN (18 kips) thì thu được trạng thái ứng suất bao gồm ứng suất lệch $\sigma_d = 37$ kPa (5.4 psi) và áp lực hông $\sigma_3 = 14$ kPa (2 psi).

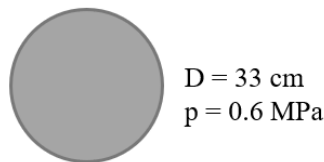
Trong phạm vi nghiên cứu của bài báo, tác giả sẽ tính toán để lựa chọn giá trị M_r phù hợp từ các kết quả M_r đo được trong phòng thí nghiệm để áp dụng cho công tác tính toán 2 kết cấu áo đường mềm của 2 dự án tương ứng với 2 mẫu đất nền được thu thập. Chiều dày và các thông số vật liệu cần thiết của các loại kết cấu áo đường được thể hiện trên Hình 8. Mô đun đàn hồi động của các lớp vật liệu được tham khảo từ nghiên cứu [15], tiêu chuẩn 22 TCN 274-01 [16] và TCCS XX : 2018/TCĐBVN [17].



a) Kết cấu 1 - Cao tốc Vân Đồn Móng Cái

b) Kết cấu 2 - đường Thanh Niên

Hình 8. Kết cấu áo đường và vật liệu của kết cấu dùng để tính toán.



Hình 9. Mô hình tải trọng sử dụng trong tính toán.

Tải trọng được sử dụng là tải trọng được áp dụng trong tính toán thiết kế kết cấu áo đường mềm 22 TCN - 21106. Tải trọng được phân bố trên diện tích hình tròn đường kính $D = 33$ cm với áp lực $p = 0.6$ MPa (Hình 9). Để xác định cấp áp lực hông và ứng suất lệch ở trên lớp đất đắp dưới tác dụng của tải trọng xe chạy và tải trọng bản thân lớp kết cấu, nghiên cứu đã sử dụng phần mềm Viscoroute 2.0 để mô phỏng và tính toán. Phần mềm Viscoroute 2.0 [18] mô phỏng kết cấu áo đường mềm là hệ bán không gian nhiều lớp, trong đó lực bánh xe được mô phỏng chuyển động với vận tốc không đổi.

Mô đun nền đất ban đầu được lấy giá trị là 42 MPa. Vận tốc xe chạy dùng cho tính toán được xác định là 60 km/h đối với kết cấu 1 và 20 km/h đối với kết cấu 2. Như đã phân tích ở

trên, giá trị mô đun đất nền phụ thuộc vào cấp áp lực gia tải và áp lực hông. Ứng với mỗi giá trị mô đun đất nền sẽ tính toán được một cấp áp lực gia tải và áp lực hông tương ứng. Do đó, việc tính toán ra giá trị mô đun đất nền tương ứng với loại kết cấu và tải trọng phải là một quá trình lặp và thử dần. Kết quả tính toán từ phần mềm Viscoroute cho phép xác định trạng thái ứng suất của đất nền. Trong khi các kết quả trên Hình 6 và Hình 7 cho phép nội và ngoại suy các giá trị M_r tại các cấp áp lực gia tải và áp lực hông khác nhau. Việc thực hiện tính toán vòng lặp thử dần giúp cho kết quả tính toán trạng thái ứng suất của đất nền khớp với trạng thái ứng suất (được xác định từ thực nghiệm) của giá trị mô đun M_r sử dụng trong tính toán. Kết quả tính toán cho phép xác định được $\sigma_3 = 15.9$ kPa, $\sigma_d = 14.7$ kPa cho đất đắp loại 1 và $\sigma_3 = 10.7$ kPa, $\sigma_d = 27.4$ kPa cho đất đắp loại 2. Giá trị M_r được xác định tương ứng bằng 75.30 MPa cho đất loại 1 và 29.50 MPa cho đất loại 2. Có thể nhận thấy kết cấu áo đường với chiều dày lớn hơn, sử dụng vật liệu có độ cứng cao sẽ tăng giá trị áp lực hông σ_3 và giảm cấp tải trọng xe σ_d tác dụng lên lớp đất nền. Điều kiện trạng thái ứng suất tác dụng như vậy giúp đất nền đạt giá trị M_r cao hơn. Hay nói cách khác, cùng một nền đất, kết cấu áo đường tốt và dày hơn sẽ đưa đất nền vào làm việc trong vùng ứng suất thuận lợi và tăng được giá trị M_r đất nền cao hơn.

4. KẾT LUẬN

Từ phân tích kết quả thực nghiệm xác định mô đun đàn hồi động của đất nền đường bằng máy nén 3 trục, một số kết luận được rút ra như sau:

- Có sự tương quan về độ lớn giữa giá trị CBR và giá trị mô đun M_r của 2 loại đất nền.
- Giá trị M_r chịu ảnh hưởng đáng kể của trạng thái ứng suất. Giá trị M_r tăng khi tăng cấp áp lực hông nhưng giảm khi tăng giá trị ứng suất lệch.
- Mối quan hệ giữa M_r và trạng thái ứng suất là phi tuyến và có dạng khác nhau đối với 2 loại đất khác nhau (đất hạt mịn và đất hạt thô).
- Từ các kết quả M_r xác định trong phòng thí nghiệm, bài báo đã sử dụng phần mềm Viscoroute tính toán và xác định được giá trị M_r phù hợp dùng cho tính toán kết cấu 2 loại áo đường mềm tương ứng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải, trong đề tài mã số T2020 - CB - 007.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. 22 TCN 211 - 06, Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế.
- [2]. F. Lekarp, U. Isacsson, A. Dawson, State of the art. I: resilient response of unbound aggregates, *Journal of Transportation Engineering*, 126 (2000) 66-75. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2000\)126:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2000)126:1(66))
- [3]. M. Kim, Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
- [4]. Z. Han, S. K. Vanapalli, State-of-the-Art: Prediction of Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soils, *International Journal of Geomechanics*, 16 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000631](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000631)

- [5]. Nguyễn Quang Tuấn, Nguyễn Ngọc Lâm, Đào Văn Đông, Lương Hùng Mạnh, Phạm Thanh Tùng, Thực nghiệm đánh giá mô-đun đàn hồi động của vật liệu đất đắp nền đường trên cao tốc Nội Bài - Lào Cai, Tạp chí Giao thông vận tải, 12 (2017) 98-101.
- [6]. AASHTO Designation: M 145-91 (2008), Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.
- [7]. AASHTO Designation: T 307 - 99, Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Material, 2007.
- [8]. A. Dione, M. Fall, Y. Berthaud, F. Benboudjema, A. Michou, Implementation of Resilient Modulus-CBR relationship in Mechanistic Empirical (M. -E) Pavement Design, Sciences Appliquées de l'Ingénieur, 1 (2014) 65–71. <http://publication.lecames.org/index.php/ing/article/view/358>
- [9]. A. Maher, T. Bennert, Resilient Modulus Properties of New Jersey Subgrade Soils, FHWA NJ 2000-01, 2000.
- [10]. R. Mausa, A. Gabr, M. Arab, A. Azam, S. El-Badawy, Resilient modulus for unbound granular materials and subgrade soils in Egypt, In MATEC Web of Conferences, 120 (2017) 06009. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712006009>
- [11]. A. M. RAHIM, Subgrade soil index properties to estimate resilient modulus for pavement design, International Journal of Pavement Engineering, 6 (2005) 163-169. <https://doi.org/10.1080/10298430500140891>
- [12]. H. L. Von Quintus, A. Yau, Study of LTPP laboratory resilient modulus test data and response characteristics-final report, FHWA-RD-02-051, 2002.
- [13]. R. Elliot, Selection of subgrade modulus for AASHTO flexible pavement design, Transportation Research Record, 1354 (1992) 39-44.
- [14]. Y. Huang, Pavement Analysis and Design, Prentice-Hill, Inc, New Jersey, 1993.
- [15]. Trần Danh Hội, Nghiên cứu hỗn hợp đá nhựa nóng cường độ cao dùng trong kết cấu mặt đường ô tô cấp cao ở Việt Nam, Trường Đại học Giao thông vận tải, 2019.
- [16]. 22 TCN 274 – 01, Chỉ dẫn kỹ thuật thiết kế mặt đường mềm.
- [17]. TCCS XX : 2018/TCĐBVN, Áo đường mềm – Yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế theo chỉ số kết cấu (SN).
- [18]. A. Chabot, O. Chupin, L. Deloffre, D. Duhamel, ViscoRoute 2.0 A Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement, Road Materials and Pavement Design, 11 (2010) 227-250. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690274>