TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

So sánh số liệu khảo sát cường độ kết cấu áo đường trên một số tuyến cao tốc ở Việt Nam theo các phương pháp đo tĩnh và đo động

Comparative analysis of pavement structural strength data obtained from static and dynamic testing methods on selected expressways in Vietnam

THS Silong KINGKEOOUDOM[1], TS Ngô Việt Đức[2,*], PGS.TS Bùi Phú Doanh[2]
[1]Cục Đường bộ, Bộ Công chính và Vận tải, Nước CHDCND Lào
[2]Khoa Cầu đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
[*]Email: ducnv@huce.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO
Chuyên mục: Khoa học công nghệ
Ngày nhận bài: 12/6/2026
Ngày sửa bài: 22/6/2026
Ngày chấp nhận đăng: 10/7/2026
Ngày xuất bản Online: 22/7/2026
Tác giả liên hệ:
Email: ducnv@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Hiện nay, các thí nghiệm không phá hủy (Nondestructive deflection test - NDT) đang được sử dụng rộng rãi để đánh giá kết cấu áo đường. Các thí nghiệm không phá hủy khắc phục những nhược điểm của các thí nghiệm phá hoại kết cấu làm ảnh hưởng đến khả năng làm việc của mặt đường, thời gian thực hiện lâu, không thể làm thường xuyên… Thiết bị gia tải động thuộc nhóm các thiết bị thí nghiệm NDT, mô phỏng tải trọng động tác dụng lên nền mặt đường, đo độ võng tại các vị trí, từ đó có thể tính ra các giá trị cường độ của nền mặt đường. Nội dung bài báo gồm: Giới thiệu số liệu đo của thiết bị gia tải động thực hiện trên mặt đường của một số tuyến đường cao tốc ở Việt Nam; so sánh kết quả đo từ thiết bị gia tải động với kết quả một số thí nghiệm khác như thí nghiệm CBR, tấm ép cứng, cần Benkelman.

Từ khóa: Đường cao tốc, mặt đường, thiết bị gia tải động, thí nghiệm CBR, tấm ép cứng, cần Benkelman.

ABSTRACT

Currently, nondestructive deflection tests (NDT) are widely used for evaluating pavement structures. Compared with destructive testing methods that may impair the in-service performance of pavements, require long testing durations and cannot be conducted

frequently, NDT methods offer significant advantages. Dynamic loading equipment, classified within the NDT group, simulates dynamic loads acting on the pavement foundation and measures surface deflections at multiple locations, from which the structural capacity parameters of the pavement foundation can be determined. This paper presents measurement data obtained from dynamic loading devices applied to pavement structures on several expressways in Vietnam. It also compares the results from dynamic loading tests with those obtained from other conventional testing methods, including the California Bearing Ratio (CBR) test, the plate load test, and the Benkelman Beam deflection test.

Keywords: Expressway; pavement; dynamic loading device; California Bearing Ratio (CBR) test; plate load test; Benkelman beam.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quá trình sử dụng, nền mặt đường cũng như các hệ thống công trình khác phục vụ tuyến đường đều cần quá trình duy tu, bảo dưỡng thường xuyên và phù hợp. Để có thể xác định được thời điểm duy tu, bảo trì hợp lý và có thể ước tính được tuổi thọ công trình thì công tác thu thập dữ liệu là vô cùng cần thiết. Tuy nhiên, với các lớp vật liệu khác nhau trong kết cấu áo đường, hiện nay các cách thu thập dữ liệu (các thí nghiệm) đang khác nhau cả về phương pháp và thời điểm thực hiện, nhiều khi bị hạn chế về khả năng thực hiện với các tuyến đường đang khai thác.

Thí nghiệm gia tải động, với các đặc điểm: Thời gian thực hiện nhanh, cơ động, có thể thực hiện thường xuyên, không phá hoại kết cấu, không gây ảnh hưởng nhiều đến quá trình khai thác của tuyến đường như việc lấy mẫu, khoan, cắt, đào… không làm ảnh hưởng đến khả năng làm việc của mặt đường. Kết quả thu được từ thí nghiệm gia tải động kết hợp với các phương pháp tính ngược (Back calculation) có thể khảo sát cường độ hiện hữu của mặt đường, nền đất và các lớp vật liệu trong kết cấu áo đường [6, 7, 8].

Trên thế giới cũng đã có một số tác giả thực hiện việc đo đạc trên các tuyến đường đang khai thác theo hai phương pháp đo độ võng bằng cần Benkelman và bằng thiết bị gia tải động [9, 10]. Tuy nhiên, các kết quả chỉ tập trung vào việc đánh giá chung cả kết cấu. Nghiên cứu này, ngoài việc so sánh việc xác định mô-đun đàn hồi chung của kết cấu áo đường còn so sánh kết quả tính cường độ nền đất với các thí nghiệm đang được sử dụng rộng rãi ở Việt Nam hiện nay.

2. THIẾT BỊ GIA TẢI ĐỘNG VÀ CÁC KẾT QUẢ TÍNH ĐƯỢC

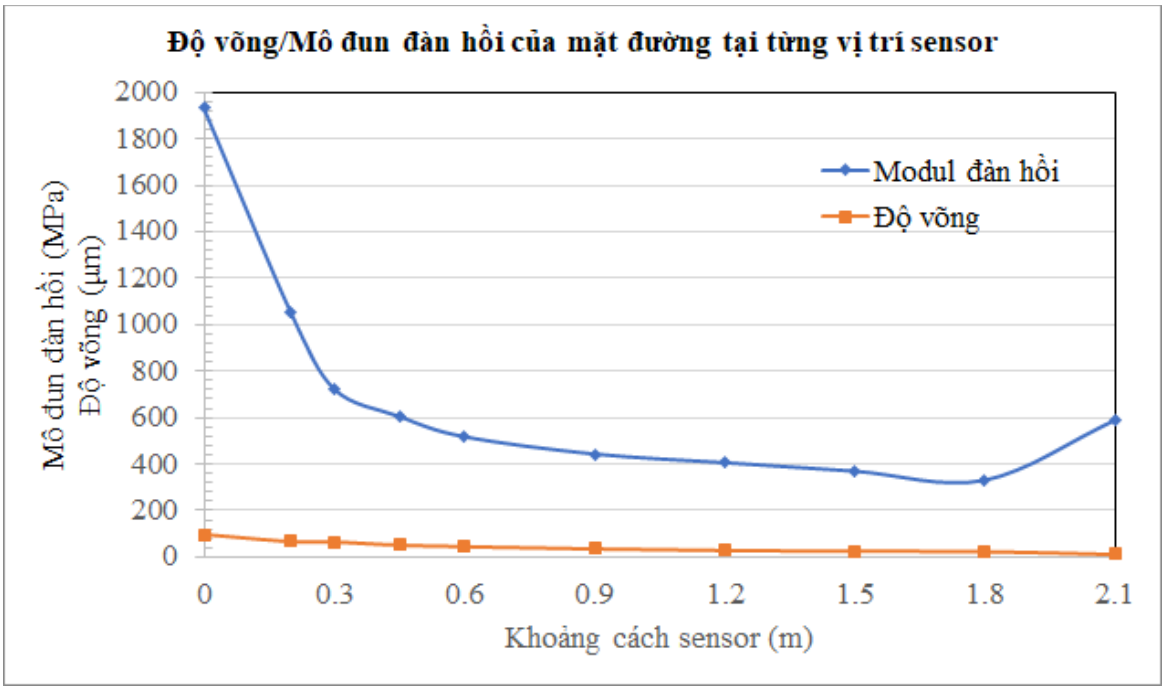
2.1. Nguyên tắc hoạt động chung của thiết bị gia tải động

Phần chính của thiết bị là bộ phận gia tải, các đầu đo độ võng và phần mềm tính toán. Tải trọng va đập tác dụng lên mặt đường do vật nặng có khối lượng nhất định rơi từ độ cao định trước xuống hệ thống đệm cao su và truyền tải trọng xuống mặt đường. Đầu đo tải trọng gắn tại tâm truyền tải, xác định giá trị tải trọng P. Chuyển vị đứng tại tâm truyền tải và tại các điểm cách tâm truyền tải các khoảng cách nhất định được ghi lại bằng các đầu đo chuyển vị (sensor). Áp lực tác dụng lên mặt đường được điều chỉnh theo khối lượng và chiều cao rơi của vật nặng. Độ võng trên bề mặt và giá trị mô-đun đàn hồi động được tính toán từ số liệu đầu ra của các đầu đo.

2.2. Kết quả từ thiết bị gia tải động kết hợp với phương pháp tính ngược

Chậu võng của mặt đường tại từng điểm được xây dựng từ kết quả tại các đầu đo chuyển vị bố trí dọc thân máy. Thiết bị sử dụng trong nghiên cứu là HWD Primax 2500,

có 10 đầu đo với khoảng cách đến tâm đĩa lần lượt là: 0, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 và 210 cm. Trị số độ võng tại các đầu đo mô tả một nửa hình dáng của chậu võng; phần mềm tính toán đi kèm tính ra mô-đun đàn hồi động tương ứng tại từng vị trí đo. **Error! Reference source not found.** minh họa giá trị đo độ võng và mô-đun đàn hồi động thu được tại 1 vị trí đo.



Hình 1. Giá trị đo độ võng và mô-đun đàn hồi động thu được tại 1 vị trí trên mặt đường

Từ kết quả quả đo, có thể xác định được các thông số sau:

2.2.1. Mô-đun đàn hồi động tổng thể của kết cấu nền mặt đường: Giá trị mô-đun đàn hồi tính toán tại vị trí đầu đo tại tâm gia tải (tại vị trí sensor 0)

2.2.2. Mô-đun đàn hồi tại nền đất, theo TCCS 37 - Phụ lục D [1]

** Xác định mô-đun đàn hồi động hữu hiệu của nền đường:*

Trị số mô-đun đàn hồi Mr của đất nền tính ngược từ các số liệu đo bằng thiết bị gia tải động được xác định theo công thức sau:

$$Mr = \frac{2.4\ P}{d_r . r} \quad (1)$$

Trong đó:

Mr: Mô-đun đàn hồi của lớp đất nền đường, Mpa;

P: Tải trọng xung của thiết bị gia tải động, kN;

r: Khoảng cách từ điểm đo độ võng đến tâm tấm ép, cm;

d: Độ võng phục hồi của mặt đường tại điểm cách tâm tấm ép r (cm), µm.

** Kiểm tra giá trị mô-đun đàn hồi động hữu hiệu của nền đường:*

Việc kiểm tra được thực hiện trên cơ sở so sánh giữa độ võng của mặt đường được xác định từ giá trị mô-đun đàn hồi động hữu hiệu của nền đường vừa tính với độ võng đo được từ thiết bị gia tải động.

- Tính toán độ võng ở tâm tấm ép:

$$d_o = 1.5 \times p \times a \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{E_P}{M_R}} \right)^2}} + \left[\frac{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}}}{E_P} \right] \right\} \quad (2)$$

Trong đó:

d_0: Độ võng đo được ở tâm của tấm ép truyền tải trọng, cm;

p: Áp suất truyền qua tấm ép, MPa;

a: Bán kính tấm ép của thiết bị, cm;

D: Tổng chiều dày toàn bộ kết cấu áo đường nằm phía trên nền đường, cm;

Ep: Mô-đun đàn hồi hữu hiệu của kết cấu áo đường nằm phía trên nền đường, MPa;

Mr: Mô-đun đàn hồi lớp đất trên cùng của nền đường, Mpa.

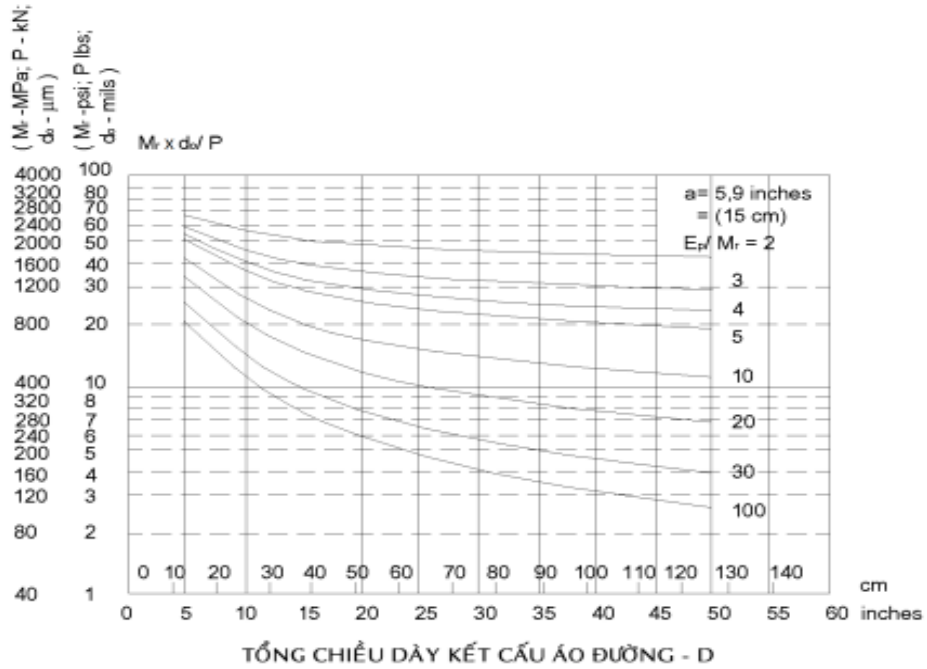
- So sánh độ võng của mặt đường vừa được xác định từ giá trị mô-đun đàn hồi động hữu hiệu của nền đường với độ võng đo được từ thiết bị gia tải động.

Nếu sai số lớn, tiến hành điều chỉnh lại việc lựa chọn vị trí sensor tính toán (giá trị r trong công thức tính Mr) theo nguyên tắc sau:

$$r \geq 0{,}7\ a_e \quad (3)$$

Trong đó: a_e là bán kính của bầu ứng suất nằm ở mặt phân cách (cm) giữa mặt nền đất với kết cấu áo đường, được tính theo công thức sau:

$$a_e = \sqrt{\left[a^2 + \left(D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2 \right]} \quad (4)$$



Hình 1. Xác định mô-đun đàn hồi hữu hiệu của kết cấu áo đường nằm phía trên nền đường (Ep)

** Xác định mô-đun đàn hồi tĩnh hữu hiệu của nền đường:*

Trị số Mr tính từ các số liệu đo bằng thiết bị gia tải động bao giờ cũng lớn hơn so với trị số mô-đun đàn hồi hữu hiệu thu được trong phòng thí nghiệm. Vì thế, phải đưa vào một hệ số điều chỉnh theo thực nghiệm là 0,33 (theo AASHTO T292).

$$M_{r\ thiết\ kế} = 0{,}33\ M_r = 0{,}33\ \frac{2.4P}{d_r.r} \quad (5)$$

2.2.3. Mô-đun đàn hồi hữu hiệu của các lớp vật liệu trên nền đất, theo TCCS 37-Phụ lục D [1]

Mô-đun đàn hồi hữu hiệu của các lớp vật liệu trên nền đất (Ep), được xác định theo phương pháp tính ngược phụ thuộc vào tổng chiều dày áo đường, trị số đo võng tại tâm tấm ép và giá trị mô-đun đàn hồi tính toán của nền đất theo công thức (2) và toán đồ Hình 2.

3. SO SÁNH MỘT SỐ KẾT QUẢ ĐO TỪ THIẾT BỊ GIA TẢI ĐỘNG VỚI CÁC PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM KHÁC

3.1. Quy hoạch thực nghiệm

Trong nghiên cứu này sử dụng thiết bị gia tải động tại hiện trường (HWD) [1] và thí nghiệm xác định chỉ số CBR trong phòng thí nghiệm [2], thí nghiệm tấm ép cứng [3] để đánh giá cường độ nền đất; thí nghiệm cần đo võng Benkelman [4] để so sánh mô-đun đàn hồi tổng thể của mặt đường với kết cấu mặt đường cao tốc. Các thí nghiệm được thực hiện trên cùng 1 đoạn tuyến thuộc cao tốc ở Việt Nam trước khi đưa vào khai thác, với tổng bề dày các lớp mặt BTN là 22 cm, lớp đỉnh nền K98 dày 30 cm. Thí nghiệm thiết bị gia tải động tại hiện trường và thí nghiệm cần đo võng Benkelman được thực hiện tại cùng vị trí trên mặt đường và trong cùng một thời điểm để bảo đảm sự tương đồng về điều kiện thí nghiệm. Thí nghiệm CBR, thí nghiệm tấm ép cứng được thực hiện trong khoảng thời gian trước (khi nghiệm thu nền đường). Do thời điểm thí nghiệm khác nhau nên không thể bảo đảm các điều kiện tương đồng về môi trường, khí hậu…Tuy vậy, đây cũng là việc tất yếu khi thực hiện thí nghiệm với nền đất. Mặt khác, kết cấu mặt đường luôn được coi là kín và tuyến đường cao tốc chưa đưa vào khai thác nên có thể bỏ qua các sai khác này.

Hình 3. Hình ảnh thí nghiệm hiện trường
bằng thiết bị gia tải động và thí nghiệm cần Benkelman

3.2. So sánh các kết quả

3.2.1. Giá trị CBR của nền đất: So sánh giá trị thí nghiệm CBR trong phòng và kết quả tính CBR từ mô-đun đàn hồi của nền đất đo của thiết bị gia tải động

Kết quả tính $M_{r\ thiết\ kế}$ từ số liệu đo của thiết bị HWD trên đoạn tuyến thí nghiệm trên cao tốc Cam Lâm - Vĩnh Hảo cho các giá trị $M_{r\ thiết\ kế}$ = [98,151] Mpa. Theo một số quan hệ giữa CBR và M_r được trích dẫn trong TCCS-37 - Phụ lục M [1], sử dụng các mối quan hệ được xây dựng với thí nghiệm CBR trong phòng thí nghiệm, tính được giá trị CBR tương ứng với từng công thức, tổng hợp trong Bảng 1 [5].

Bảng 1. Tổng hợp kết quả tính CBR của nền đất từ giá trị M_r (MPa)

STT	Mối quan hệ	Mr (Mpa)	CBR (%)
1	Heukelom và Klomp: Mr =10,34 × CBR	[98, 151]	[9,5 , 14,7]
2	Powell: Mr = 17,6 × $(CBR)^{0,64}$	[98, 151]	[14,7, 28,9]
3	Carlbros Inter: Mr = 4(CBR) + 10	[98, 151]	[22,1, 35,4]
4	JTJ 014 - 97, đất sét đỏ Quảng Tây: Mr = 5,651 × $(CBR)^{0,891}$	[98, 151]	[24,6, 40,1]
5	JTJ 014 - 97, đất trương nở Quảng Tây: Mr = 9,18 × $(CBR)^{0,741}$	[98, 151]	[24,5, 43,9]
6	JTJ 014 - 97, đất hoàng thổ Thiểm Tây: Mr = 1,6 × $(CBR)^{1,12}$	[98, 151]	[39,5, 58,1]
7	JTJ 014 - 97, đất sét Thượng Hải: Mr = 7,9 × $(CBR)^{0,91}$	[98, 151]	[16,0, 25,7]
8	Đất sét Nội mông: Mr = 7,03 × $(CBR)^{0,872}$	[98, 151]	[20,6, 33,8]
9	Đất sét của một bang của Mỹ: Mr = 13,4 × $(CBR)^{0,688}$	[98, 151]	[18,1, 34,0]
10	Đất sét Monaco: Mr = 8,90 × $(CBR)^{0,85}$	[98, 151]	[16,9, 28,1]

Kết quả thí nghiệm CBR của nền đất trong cùng đoạn tuyến đạt giá trị trong khoảng [16,22] (%), có thể thấy sự thống nhất tương đối tốt giữa kết quả tính từ thí nghiệm gia tải động và thí nghiệm CBR.

3.2.2. Mô-đun đàn hồi của nền đất: So sánh giữa kết quả thí nghiệm bằng tấm ép cứng và kết quả đo từ thiết bị gia tải động

Kết quả tính với các giá trị mô-đun đàn hồi từ thí nghiệm dùng tấm ép cứng và từ thiết bị HWD được thực hiện trên đoạn tuyến từ Km292+500 đến Km292+880 trên cao tốc Vân Phong - Nha Trang được tổng hợp trong Bảng 3-2.

Bảng 2. Tổng hợp kết quả tính mô-đun đàn hồi của nền đất (MPa) từ thí nghiệm dùng tấm ép cứng và từ thiết bị HWD

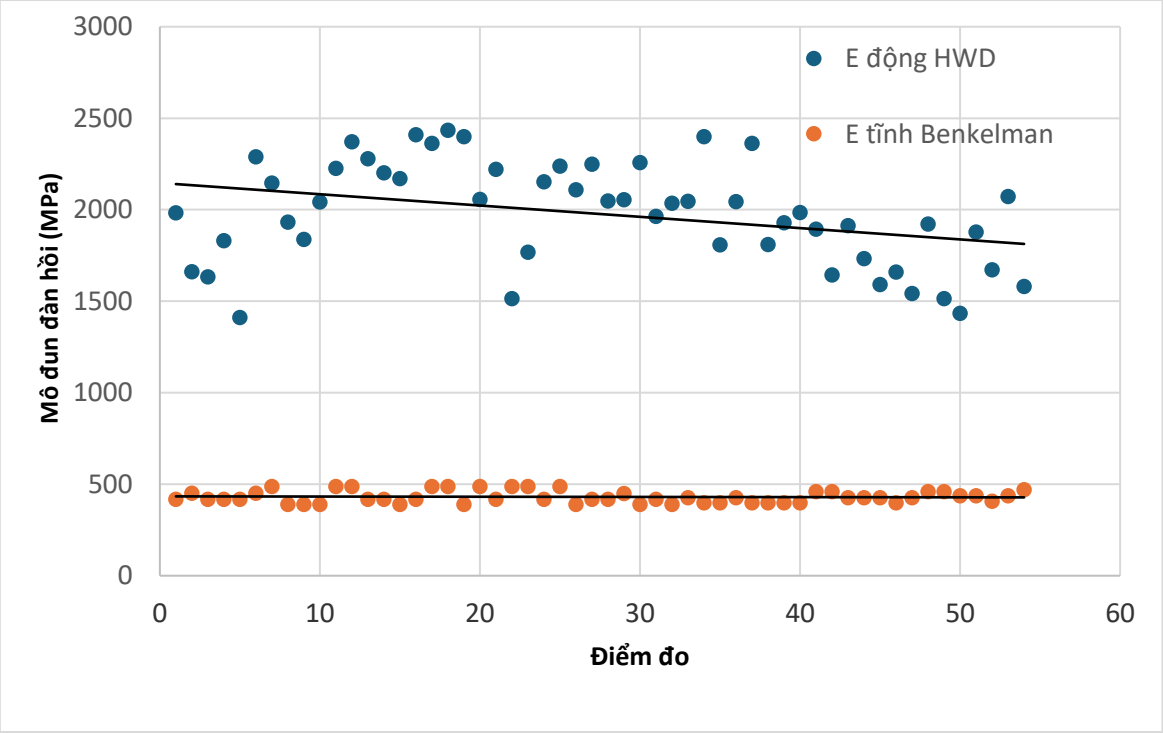
STT	E0 (Mpa) từ TN tấm ép cứng	Mr (Mpa) từ HWD
1	129,9	[135,147]
2	134,1	[152,170]

Kết quả tính mô-đun đàn hồi theo hai phương pháp thí nghiệm khác nhau nhưng kết quả cũng không sai khác quá nhiều (khoảng 15%), điều đó cũng phần nào thể hiện tính khả thi trong việc sử dụng phương pháp gia tải động.

3.2.3. Mô-đun đàn hồi chung của nền mặt đường: So sánh giữa kết quả thí nghiệm bằng cần đo võng Benkelman và kết quả đo từ thiết bị gia tải động

Kết quả đo trên tuyến cao tốc Mai Sơn - Quốc lộ 45 với 54 điểm đo được tổng hợp trong Hình 4.

Trong cùng điều kiện thí nghiệm, mô-đun đàn hồi đo trên tuyến cao tốc Mai Sơn - Quốc lộ 45 với bề dày kết cấu 86 cm có: $E_{tĩnh}$ = [0,20 - 0,25]×$E_{động}$.



Hình 4. Kết quả đo mô-đun đàn hồi trên tuyến cao tốc Mai Sơn - Quốc lộ 45

4. NHẬN XÉT VÀ THẢO LUẬN

4.1. So sánh các thông số của nền đất

Mô-đun đàn hồi của nền đất xác định từ thí nghiệm gia tải tĩnh (tấm ép tĩnh) và thí nghiệm gia tải động (HWD) khi thực hiện với áo đường mềm đường cao tốc có chiều dày từ 74 cm đến 86 cm có sự chênh lệch khoảng 15%. Sự khác nhau này có thể do sự khác biệt về vị trí thực hiện thí nghiệm, do ứng xử của vật liệu có tính chất đàn hồi nhớt dưới tải trọng tác dụng tĩnh và động.

Trị số CBR của nền đất tính từ số liệu đo của thiết bị HWD cũng cho kết quả tương đối thống nhất với các thí nghiệm CBR trong phòng.

4.2. So sánh mô-đun đàn hồi chung của kết cấu

Trong cùng điều kiện thí nghiệm, mô-đun đàn hồi chung của kết cấu chiều dày từ 74 cm đến 86 cm có giá trị tương đối đồng đều: $E_{tĩnh} = [0,20 - 0,25] \times E_{động}$.

4.3. Đánh giá khả năng sử dụng thiết bị gia tải động để khảo sát chất lượng nền mặt đường

Có thể thấy, việc sử dụng thiết bị gia tải động để xác định một số thông số của mặt đường mềm là có hiệu quả:

- Có thể xác định trực tiếp mô-đun đàn hồi của nền đất từ kết quả đo;

- Từ giá trị mô-đun đàn hồi của nền đất có thể tính ra các thông số khác như trị số CBR;

- Có thể xác định mô-đun đàn hồi chung của kết cấu (sau khi chuẩn hóa nhiệt độ thí nghiệm);

- Có thể xác định được mô-đun đàn hồi của kết cấu áo đường nằm phía trên nền đường, từ đó tính được mô-đun đàn hồi của từng lớp theo bài toán thiết kế áo đường mềm sử dụng chỉ số SN.

4.4. Đánh giá tính hiệu quả khi sử dụng thiết bị gia tải động để khảo sát chất lượng nền mặt đường

Sử dụng thiết bị gia tải động trong khảo sát nền mặt đường không chỉ thu thập được nhiều thông số của mặt đường mềm, mà việc thực hiện theo định kỳ, cùng với hệ thống đo đạc và lưu trữ dự liệu tự động sẽ là nguồn thông tin quan trọng phục vụ công tác dự báo tuổi thọ, đánh giá khả năng làm việc của kết cấu mặt đường nói riêng và tuyến đường nói chung.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] TCVN 8861:2011. Áo đường mềm - Xác định mô-đun đàn hồi của nền đất và các lớp kết cấu áo đường bằng phương pháp sử dụng tấm ép cứng. TCCS 37: 2022/TCĐBVN, Áo đường mềm - yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế theo chỉ số kết cấu.

[2] TCVN 12792:2020. Vật liệu nền, móng mặt đường - phương pháp xác định tỷ số CBR trong phòng thí nghiệm.

[3] TCVN 8861:2011. Áo đường mềm - Xác định mô-đun đàn hồi của nền đất và các lớp kết cấu áo đường bằng phương pháp sử dụng tấm ép cứng.

[4] TCVN 8867:2011. Áo đường mềm - Xác định mô-đun đàn hồi chung của kết cấu bằng cần đo võng Benkelman.

[5] Silong K, L.H.Lưu, N.H.Mạnh, N.V.Đức, B.P.Doanh. Xác định mô-đun đàn hồi của nền đường K98 dưới mặt đường bê tông nhựa trên đường cao tốc bằng thiết bị gia tải động. Tạp chí Xây dựng, 10/2025.

[6] D.F.E. Stolle. Modelling of dynamic response of pavements to impact loading. Comput, Geotechnol, 1991.

[7] S. Wu et al. Effects of interlayer bonding conditions between semi-rigid base layer and asphalt layer on mechanical responses of asphalt pavement structure. Int. J. Pavement Res., Technol., 2017.

[8] X. Wang. Discussion of asphalt pavement defection indicator. Gonglu Jiaotong Keji. 32(1), 2015.

[9] L. Zhou et al. Comparison of FWD and Benkelman Beam in evaluation of pavement structure capacity. Geotech. Spec. Publ., 2010.

[10] Murillo Foe, Bearing Urrego L.E. Correlation between deflections measurements on flexible pavements obtained under static and dynamic load techniques. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013.