Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (5V): 158–172

NGHIÊN CỨU THÍ NGHIỆM BÀN NÉN TIÊU CHUẨN PHÁP TRONG ĐÁNH GIÁ NỀN ĐẮP CHO ĐƯỜNG SẮT TỐC ĐỘ CAO: TRƯỜNG HỢP NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH

Phạm Việt Anh[a], Vũ Công Viên[a,*]

[a]*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 06/8/2026, Sửa xong 28/10/2026, Chấp nhận đăng 30/10/2026

Tóm tắt

Nghiệm thu nền đắp ở Việt Nam chủ yếu dựa vào hệ số đầm chặt K, trong khi nền đường sắt tốc độ cao còn yêu cầu kiểm soát độ cứng và độ đồng đều; với vật liệu hạt thô, K khó xác định đại diện. Bài báo phân tích 31 lượt thí nghiệm bàn nén 600 mm theo NF P 94-117-1 trên nền đắp đất rời $D < 80$ mm ở Lâm Đồng, gồm 27 điểm ban đầu tại ba vị trí và 4 lượt thử lại sau đầm nén bổ sung tại các điểm không đạt yêu cầu $r < 2$; mọi điểm đạt yêu cầu $EV_2 \geq 50$ MPa. EV_2 dao động 75,9–211,8 MPa; $r = EV_2/EV_1$ dao động 1,07–2,39. Xếp hạng theo r và theo EV_2 ngược chiều nhau: tại Móng 1, lớp thí nghiệm có r trung bình nhỏ nhất (1,15) có EV_2 trung bình thấp nhất (96,2 MPa). Sau đầm nén bổ sung, r của ba điểm tại Móng 3 giảm xuống 1,98; 1,72 và 1,32, tức chuyển sang mức phân loại tham khảo thấp hơn theo r, trong khi EV_2 giảm 14%, 10% và 41%. Ngược lại, tại TN8 Móng 2 ($EV_2 < 80$ MPa, $r > 2{,}0$), EV_2 tăng 52% và r giảm còn 1,51. Như vậy, tiêu chí chỉ theo r có thể chấp nhận mặt nền mềm hơn. Bài báo đề xuất ma trận sàng lọc sơ bộ, với EV_2 là chỉ tiêu độ cứng và r là chỉ báo bổ sung. Các mức 80 và 120 MPa chỉ dùng để sàng lọc, không phải ngưỡng nghiệm thu.

Từ khoá: mô đun EV_2; tỷ số EV_2/EV_1; bàn nén tĩnh 600 mm; NF P 94-117-1; vật liệu hạt thô; nền đường sắt tốc độ cao.

STATIC PLATE LOAD TESTING TO THE FRENCH STANDARD FOR ASSESSING EMBANKMENT FILLS FOR HIGH-SPEED RAILWAYS: A CASE STUDY

Abstract

In Vietnam, embankment acceptance relies mainly on the degree of compaction K, whereas high-speed railway (HSR) subgrades also require control of stiffness and uniformity; for coarse-grained fills, K is difficult to measure representatively. This paper analyses 31 static plate load tests with a 600-mm plate according to NF P 94-117-1 on a granular fill (D < 80 mm) at a project in Lam Dong Province, comprising 27 initial tests at three sites and four retests after additional compaction at points that failed the project requirement r < 2; all points met the requirement $EV_2 \geq 50$ MPa. EV_2 ranged from 75.9 to 211.8 MPa and $r = EV_2/EV_1$ from 1.07 to 2.39. Rankings by r and by EV_2 were opposite: at Site M1, the test level with the lowest mean r (1.15) had the lowest mean EV_2 (96.2 MPa). After additional compaction at Site M3, r at the three points with $r > 2.0$ decreased to 1.98, 1.72 and 1.32, i.e., into a lower reference class of the ratio r, while EV_2 decreased by 14%, 10% and 41%. Conversely, at the only point with $EV_2 < 80$ MPa and $r > 2.0$ (Site M2), EV_2 increased by 52% and r fell to 1.51. A ratio-only criterion may therefore accept a softer platform. A preliminary two-parameter screening matrix is proposed, with EV_2 as the stiffness criterion and r as a supplementary indicator. The 80 and 120 MPa levels from international railway documents are used for screening only, not as acceptance limits.

Keywords: EV_2 modulus; EV_2/EV_1 ratio; 600-mm static plate load test; NF P 94-117-1; coarse-grained fill; high-speed railway subgrade.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(5V)-12 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Nền đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC) có yêu cầu về độ cứng, tính đồng đều và biến dạng dư cao hơn nền đường ô tô. Các tài liệu đường sắt quốc tế quy định đồng thời độ chặt và mô đun biến dạng EV_2, xác định bằng thí nghiệm bàn nén tĩnh, cho từng lớp của kết cấu nền [1–3]. Mức EV_2 yêu cầu thay

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* vienvc@huce.edu.vn (Viên, V. C.)

đổi theo vị trí lớp, ví dụ 80 MPa cho nền chuẩn bị chưa xử lý và 120 MPa cho nền đã xử lý hoặc lớp dưới đá ba lát [3]. Trong các đoạn thử quy mô lớn của dự án HS2 (Anh), EV_2 được dùng cùng các chỉ tiêu động để xác nhận tính năng của vật liệu nền đắp [1]. Với đường không đá ba lát, khả năng điều chỉnh hình học đường ray sau thi công hạn chế, nên yêu cầu kiểm soát biến dạng nền chặt hơn [1]. Các nghiên cứu gần đây đề nghị đánh giá chất lượng nền đường sắt theo đoạn, có xét biến thiên không gian của mô đun, thay vì quyết định từ từng điểm thử riêng lẻ [2]. Dự án ĐSTĐC trên trục Bắc–Nam đã được thông qua chủ trương đầu tư [4], do đó kiểm soát nền đắp theo độ cứng trở thành yêu cầu thực tế đối với thi công nền đường ở Việt Nam.

Ở Việt Nam, nghiệm thu nền đắp dựa chủ yếu vào hệ số đầm chặt K, là tỷ số giữa khối lượng thể tích khô của đất tại hiện trường và khối lượng thể tích khô lớn nhất xác định trong phòng thí nghiệm [5–7]. Khối lượng thể tích khô hiện trường được đo bằng phương pháp hố đo hoặc phương pháp phóng xạ [5, 7, 8]. Với vật liệu hạt thô, kết quả đầm nén trong phòng phải hiệu chỉnh theo hàm lượng hạt quá cỡ, và thể tích hố đo nhỏ so với kích thước hạt làm giảm tính đại diện của phép đo [6, 7]. Ngoài ra, K phản ánh trạng thái chặt của vật liệu, không đo trực tiếp độ cứng của hệ lớp nền dưới tải trọng. Do đó, nghiệm thu theo K và nghiệm thu theo độ cứng là hai nguồn thông tin bổ sung cho nhau, không thay thế cho nhau [1, 7].

Thí nghiệm bàn nén tĩnh theo NF P 94-117-1 dùng tấm cứng đường kính 600 mm và hai chu kỳ gia tải, áp dụng cho vật liệu có $D_{\max}$ đến 200 mm, không yêu cầu hiệu chỉnh hạt quá cỡ. Kết quả gồm mô đun chu kỳ một EV_1, mô đun chu kỳ hai EV_2 và tỷ số EV_2/EV_1 [9–12]. Trong thực hành của Đức và Pháp, EV_2 là chỉ tiêu độ cứng của mặt nền; tỷ số EV_2/EV_1 là chỉ tiêu phụ về chất lượng đầm chặt và được quy định kèm theo yêu cầu EV_2 [9, 10]. Ở Việt Nam, TCVN 9354:2012 quy định thí nghiệm tấm nén phẳng để xác định mô đun biến dạng [13], nhưng chưa có hướng dẫn diễn giải kết hợp EV_2 và EV_2/EV_1 trong nghiệm thu nền đắp. Một số tài liệu hướng dẫn phân loại chất lượng đầm chặt chỉ theo khoảng giá trị của tỷ số EV_2/EV_1. Theo tìm hiểu của nhóm tác giả, chưa có số liệu hiện trường trong nước cho thấy hệ quả của cách phân loại này đối với vật liệu hạt thô.

Bài báo phân tích 31 lượt thí nghiệm bàn nén tĩnh theo NF P 94-117-1 tại một dự án nền đắp ở tỉnh Lâm Đồng. Mục tiêu gồm: (i) trình bày quy trình thí nghiệm và cơ sở xác định EV_1, EV_2; (ii) so sánh xếp hạng chất lượng nền theo EV_2 và theo EV_2/EV_1 trên cùng bộ số liệu, gồm cả kết quả thử lại sau đầm nén bổ sung; (iii) đề xuất ma trận sàng lọc hai chỉ tiêu EV_2–EV_2/EV_1; (iv) thảo luận điều kiện áp dụng ma trận trong nghiệm thu nền ĐSTĐC. Nghiên cứu không có phép đo K ghép cặp tại cùng điểm thử, do đó bài báo không xây dựng tương quan giữa K và các chỉ tiêu bàn nén.

2. Thí nghiệm bàn nén tĩnh theo tiêu chuẩn NF P 94-117-1

2.1. Phạm vi áp dụng

Thí nghiệm áp dụng cho nền đào, nền đắp và lớp san lấp phục vụ xây dựng đường ô tô, đường sắt, sân bay và công trình dân dụng, với vật liệu phân loại theo NF P 11-300, trừ vật liệu có $D_{\max}$ lớn hơn 200 mm [9, 12].

2.2. Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị thí nghiệm gồm hệ đối tải, bàn nén và thiết bị đo lún, có nguyên lý tương tự thí nghiệm nén tĩnh cọc tại hiện trường [14], với các yêu cầu sau [9, 12].

- Đối tải: hệ đối tải phải tạo được lực tác dụng lên bàn nén tối thiểu 8000 daN. Khác với thí nghiệm bàn nén thông thường, trong đó cấp tải phụ thuộc loại đất, thí nghiệm theo NF P 94-117-1 dùng một sơ đồ tải cố định cho mọi loại vật liệu. Các gối kê của hệ đối tải đặt cách tâm bàn nén tối thiểu 1,20 m. Hình 1 thể hiện hệ đối tải dùng trong nghiên cứu.



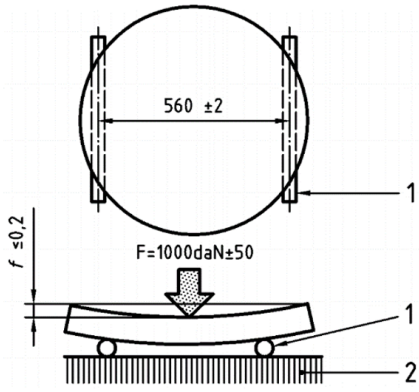

Hình 1. Hệ đối tải dùng trong thí nghiệm

- Bàn nén: tấm thép cứng đường kính 600 ± 2 mm. Dưới lực F = 1000 ± 50 daN tác dụng tại tâm, độ võng f giữa tâm và mép tấm, đo theo sơ đồ Hình 2, không vượt quá 0,2 mm.

- Thiết bị đo lún: độ chính xác tối thiểu 0,02 mm, hành trình đo tối thiểu 10 mm.

Tại dự án, độ lún được đo bằng hai đồng hồ đặt đối xứng qua tâm, trên mép bàn nén; độ chính xác của đồng hồ là 0,01 mm. Dầm chuẩn làm bằng thép hộp; gối dầm chuẩn đặt cách tâm bàn nén 1,5 m, tức ngoài phạm vi 1,5 m quanh tâm bàn nén. Dầm chuẩn được che nắng và được kiểm tra không dịch chuyển trong lúc thí nghiệm.

Dụng cụ phụ trợ gồm thước thẳng dài tối thiểu 0,8 m và tối thiểu 20 lít cát sạch cỡ hạt 0/2 mm (cát dùng cho bê tông).



Hình 2. Sơ đồ kiểm tra độ võng của bàn nén: (1) gối kê thép bán cứng, đường kính 20 ± 1 mm, dài 600 ± 5 mm; (2) khối thử có độ cứng tương đương khối bê tông, kích thước gần đúng $L = l = 1$ m, cao $h = 0{,}5$ m, dung sai mặt trên ±1 mm




Hình 3. Hệ thiết bị thí nghiệm gồm kích thủy lực, bàn nén, hệ dầm và thiết bị đo lún

2.3. Quy trình thí nghiệm

Quy trình thí nghiệm gồm bước chuẩn bị điểm thử và bước thí nghiệm với hai chu kỳ gia tải, dỡ tải liên tiếp trên bàn nén cứng.

Bước 1. Chuẩn bị thí nghiệm:

- Xác định tọa độ điểm thử. Đánh dấu và làm phẳng mặt thử trên diện tích khoảng 0,7 m × 0,7 m; độ lồi lõm không quá 15 mm.

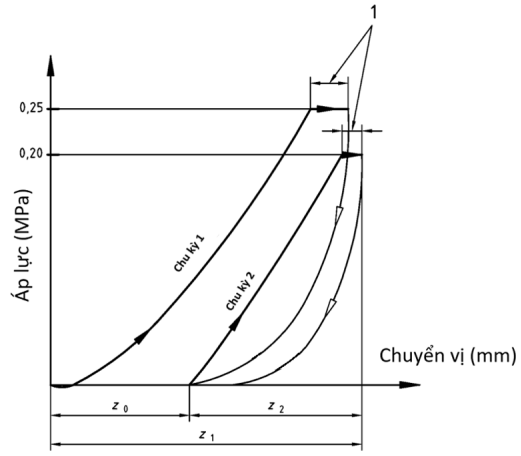
- Rải một lớp cát sạch càng mỏng càng tốt, làm phẳng bằng bay. Đặt bàn nén, xoay bàn nén 30°–45° từ hai đến ba lần để cải thiện tiếp xúc.
- Lắp hệ đối tải, hệ truyền tải và thiết bị đo lún; khởi động thiết bị đo tải trọng và đo lún.
- Tác dụng tải trọng 500 ± 50 daN lên bàn nén, duy trì 10–15 s rồi dỡ tải.

Bước 2. Thí nghiệm:

- Chu kỳ 1: gia tải đến lực 7068 ± 140 daN trong thời gian tối thiểu 30 s, tương ứng áp lực trung bình 0,25 MPa dưới bàn nén. Ghi độ lún sau mỗi 15 s.

Duy trì tải trọng khi chênh lệch độ lún trong 15 s lớn hơn 0,02 mm. Khi chênh lệch này nhỏ hơn 0,02 mm, nền được coi là ổn định; ghi độ lún ổn định e_1. Dỡ tải trong thời gian dưới 5 s sau khi nền ổn định; ghi độ lún dư z_0. Đặt lại thiết bị đo lún nếu cần.

- Chu kỳ 2: gia tải với cùng tốc độ như chu kỳ 1 đến lực 5654 ± 110 daN, tương ứng áp lực trung bình 0,20 MPa. Ghi độ lún sau mỗi 15 s và duy trì tải đến khi đạt điều kiện ổn định như chu kỳ 1.



Hình 4. Sơ đồ hai chu kỳ gia tải, dỡ tải; (1) độ lún trong thời gian chờ ổn định

Khi độ lún ổn định, ghi độ lún tổng z_1 tính từ trạng thái ban đầu. Nếu thiết bị đo đã được đặt lại sau chu kỳ 1, giá trị đọc là độ lún chu kỳ 2, z_2. Dỡ tải như chu kỳ 1.

2.4. Xử lý kết quả

NF P 94-117-1 quy định đo lún tại tâm bàn nén, hoặc tại ba điểm trên mép bàn nén và lấy trung bình [12]. Trong nghiên cứu này, độ lún được đo bằng hai đồng hồ đặt đối xứng qua tâm, trên mép bàn nén (Mục 2.2). Độ lún tại mỗi thời điểm là trung bình độ lún của hai đồng hồ, tính từ số đọc ban đầu. Với bàn nén cứng, trung bình độ lún của hai điểm đối xứng qua tâm bằng độ lún tại tâm, nên phép lấy trung bình không bị ảnh hưởng bởi góc nghiêng của bàn nén. Từ chuỗi số đọc trung bình xác định $\Delta S_1 = e_1$ là độ lún ổn định cuối chu kỳ 1 và $\Delta S_2 = z_2 = z_1 - z_0$. Chênh lệch giữa hai đồng hồ thể hiện mức nghiêng của bàn nén: trên sổ ghi số đọc của từng đồng hồ, chênh lệch độ lún cuối chu kỳ 1 có trung vị 0,23 mm (lớn nhất 0,95 mm), chênh lệch z_2 có trung vị 0,14 mm. Hồ sơ thí nghiệm của dự án không quy định giới hạn chênh lệch giữa hai đồng hồ, nên bài báo đánh giá chênh lệch theo hai mặt. Về hình học, chênh lệch lớn nhất 0,95 mm trên khoảng cách 600 mm giữa hai đồng hồ tương ứng góc nghiêng khoảng 0,09°; với bàn nén cứng, phép lấy trung bình hai điểm đối xứng loại bỏ ảnh hưởng của góc nghiêng này. Về mức độ, chênh lệch tương đối so với độ lún trung bình không nhỏ (với e_1 là trung vị 18%, lớn nhất 75%), phản ánh độ cứng không đồng đều của vật liệu ngay dưới bàn nén. Tám lượt có chênh lệch cuối chu kỳ 1 từ 0,5 mm trở lên; các lượt này có xu hướng EV_2 thấp hơn (hệ số tương quan hạng Spearman giữa chênh lệch và EV_2 là −0,40; $p = 0{,}03$), nhưng gồm cả điểm có $r < 2$ và $r > 2$ (r = 1,16–2,11), nên không làm thay đổi các so sánh giữa EV_2 và r trong bài. Do đó, không lượt thử nào bị loại do nghiêng bàn nén, và chênh lệch giữa hai đồng hồ được xem là một phần của biến thiên tại điểm thử. Khi áp dụng cho nghiệm thu, nên đo lún theo đúng NF P 94-117-1 và quy định trước ngưỡng chênh lệch giữa các đồng hồ để kiểm tra lại cách đặt bàn nén. Việc dùng hai thay vì ba đồng hồ là một sai khác so với tiêu chuẩn và được nêu trong phần giới hạn của nghiên cứu (Mục 3.5).

Mô đun biến dạng EV_2 ở chu kỳ 2 xác định theo lời giải Boussinesq cho bàn nén cứng trên bán không gian đàn hồi [12]:

$$EV_2 = \frac{\pi}{4}\left(1-\nu^2\right)\frac{p\cdot d}{z_2} \tag{1}$$

trong đó $z_2 = z_1 - z_0$ là độ lún trong chu kỳ 2 (mm); z_0 là độ lún dư sau chu kỳ 1 (mm); z_1 là độ lún tổng khi kết thúc gia tải chu kỳ 2 (mm); ν là hệ số Poisson của đất nền; p là áp lực trung bình dưới bàn nén ở chu kỳ 2 (p = 0,20 MPa); d là đường kính bàn nén (d = 600 mm).

Với p, d nêu trên và hệ số $(\pi/4)(1-\nu^2)$ lấy xấp xỉ 0,75, biểu thức (1) có dạng [12]:

$$EV_2 = \frac{90}{z_2} \tag{2}$$

Mô đun EV_1 ở chu kỳ 1 xác định tương tự, với p = 0,25 MPa và e_1 là độ lún ổn định của chu kỳ 1 (mm) [12]:

$$EV_1 = \frac{112{,}5}{e_1} \tag{3}$$

Từ (2) và (3), tỷ số giữa hai mô đun là:

$$r = \frac{EV_2}{EV_1} = 0{,}8\frac{e_1}{z_2} \tag{4}$$

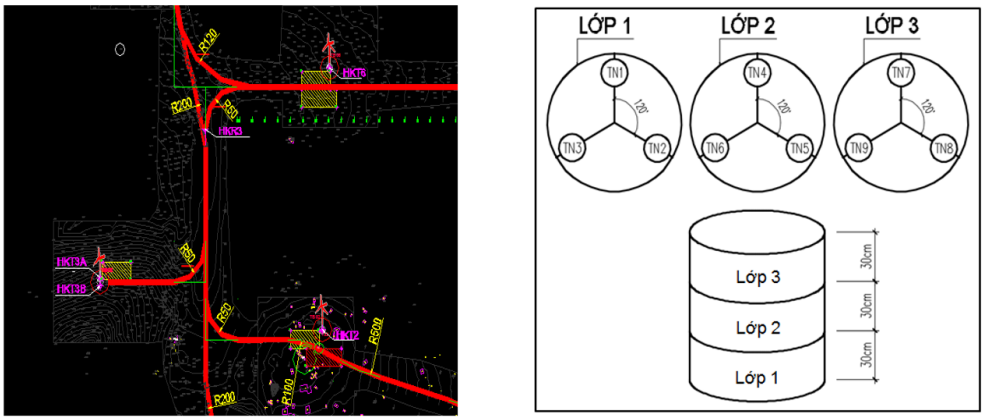
Biểu thức (4) cho thấy r là tỷ số giữa độ lún khi gia tải lần đầu e_1 và độ lún khi tái gia tải z_2, đã quy đổi theo áp lực. Do e_1 gồm cả phần biến dạng hồi phục và không hồi phục ở chu kỳ đầu, r không đo trực tiếp độ lún dư; r chỉ là chỉ báo tương quan giữa đáp ứng biến dạng ở chu kỳ gia tải đầu và độ lún tái gia tải. Trong khi đó, EV_2 chỉ phụ thuộc z_2 và phản ánh độ cứng của mặt nền khi tái gia tải. Vì vậy, hai đại lượng mang thông tin khác nhau: r nhỏ có thể đi kèm EV_2 nhỏ khi cả e_1 và z_2 đều lớn.

Tài liệu [12] phân loại chất lượng đầm chặt theo r như sau: $r < 1{,}2$ là rất tốt; $1{,}2 \le r \le 2{,}0$ là tốt; $r > 2{,}0$ là chưa đạt, cần đầm nén thêm. Trong bài báo này, các khoảng trên được dùng làm chỉ báo bổ sung, không thay cho yêu cầu về EV_2.

3. Kết quả thí nghiệm và phân tích

Đây là một nghiên cứu trường hợp về khả năng triển khai thí nghiệm và cách diễn giải kết quả; nghiên cứu không nhằm hiệu chuẩn tiêu chí nghiệm thu. Kết quả được trình bày theo từng vị trí, sau đó so sánh xếp hạng theo EV_2 và theo r.

Vật liệu đắp là đất rời có kích thước hạt $D < 80$ mm, đầm theo lớp dày tối đa 30 cm. Tại công trường đã tiến hành đầm nén bằng máy lu 30 tấn, khoảng thời gian từ khi đầm đến khi thí nghiệm là từ 12 giờ đến 24 giờ. Thí nghiệm thực hiện tại ba vị trí (Móng 1, Móng 2, Móng 3) thuộc một dự án nền đắp ở tỉnh Lâm Đồng (Hình 5). Theo phương án xử lý nền, cứ sau ba lớp đắp (khoảng 0,9 m chiều cao đắp) thì thí nghiệm bàn nén tại ba điểm; trong bài báo, mỗi đợt thí nghiệm này được gọi là một lớp thí nghiệm. Hồ sơ thiết kế quy định yêu cầu tại mỗi điểm thử là $EV_2 \ge 50$ MPa và $r = EV_2/EV_1 < 2$; điểm không đạt phải đầm nén bổ sung và thử lại. Tại mỗi vị trí, phân tích sử dụng ba lớp thí nghiệm liên tiếp, mỗi lớp ba điểm, mỗi điểm thí nghiệm cách nhau 10–15 m và giữa các lớp được bố trí so le không trùng nhau theo phương đứng; Lớp 1 là lớp thí nghiệm dưới cùng, Lớp 3 là lớp thí nghiệm trên cùng. Tổng số điểm thử ban đầu là 27. Tại Móng 3, điểm TN4 (Lớp 2) và hai điểm TN8, TN9 (Lớp 3) không đạt yêu cầu $r < 2$ nên được đầm nén bổ sung và thử lại; điểm TN8 tại Móng 2 cũng vì lý do này được đầm nén bổ sung và thử lại, nâng tổng số lượt thử lên 31. Tại Móng 3 còn có một lớp thí nghiệm thứ tư (TN10–TN12); lớp này không đưa vào phân tích để giữ cùng thiết kế ba lớp, mỗi lớp ba điểm tại cả ba vị trí.



Hình 5. Vị trí và sơ đồ bố trí thí nghiệm

Mỗi điểm thử cho độ lún ΔS_1, ΔS_2 (tương ứng e_1, z_2 trong Mục 2.4) và mô đun EV_1, EV_2 của hai chu kỳ. Kết quả của ba vị trí trình bày trong Bảng 1–4 và Hình 6–15. Phân tích định lượng dưới đây dùng 27 điểm thử ban đầu tại Móng 1, Móng 2, Móng 3 và 4 lượt thử lại.

3.1. Kết quả tại Móng 1

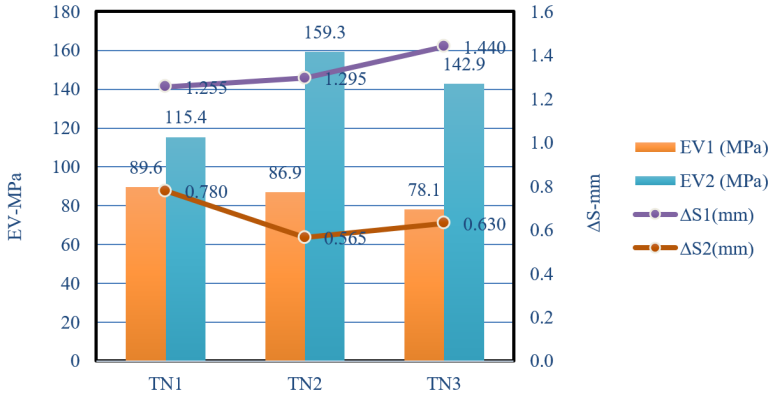
Bảng 1 tổng hợp kết quả chín điểm thử tại Móng 1; Hình 6–8 thể hiện EV_1, EV_2 và độ lún hai chu kỳ của từng lớp.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm tại Móng 1

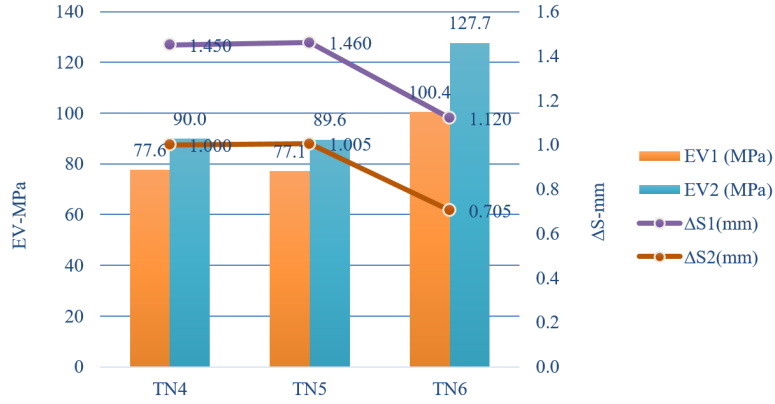
Móng 1	Chu kỳ 1			Chu kỳ 2			EV_2/EV_1
	ΔP (MPa)	ΔS_1 (mm)	EV_1 (MPa)	ΔP (MPa)	ΔS_2 (mm)	EV_2 (MPa)	
TN1	0,25	1,255	89,6	0,20	0,780	115,4	1,29
TN2	0,25	1,295	86,9	0,20	0,565	159,3	1,83
TN3	0,25	1,440	78,1	0,20	0,630	142,9	1,83
TN4	0,25	1,450	77,6	0,20	1,000	90,0	1,16
TN5	0,25	1,460	77,1	0,20	1,005	89,6	1,16
TN6	0,25	1,120	100,4	0,20	0,705	127,7	1,27
TN7	0,25	1,445	77,9	0,20	0,940	95,7	1,23
TN8	0,25	1,380	81,5	0,20	1,035	87,0	1,07
TN9	0,25	1,220	92,2	0,20	0,850	105,9	1,15

Xếp hạng theo r và theo EV_2 tại Móng 1 ngược chiều nhau. Lớp 1 (TN1–TN3) có EV_2 trung bình 139,2 MPa và r trung bình 1,65. Lớp 2 (TN4–TN6) có EV_2 trung bình 102,4 MPa và r trung bình 1,20. Lớp 3 (TN7–TN9) có EV_2 trung bình 96,2 MPa và r trung bình 1,15. Từ Lớp 1 lên Lớp 3, r giảm nhưng EV_2 cũng giảm. Theo phân loại chỉ dựa vào r [12], Lớp 3 được xếp tốt nhất; theo EV_2, Lớp 3 có độ cứng thấp nhất.

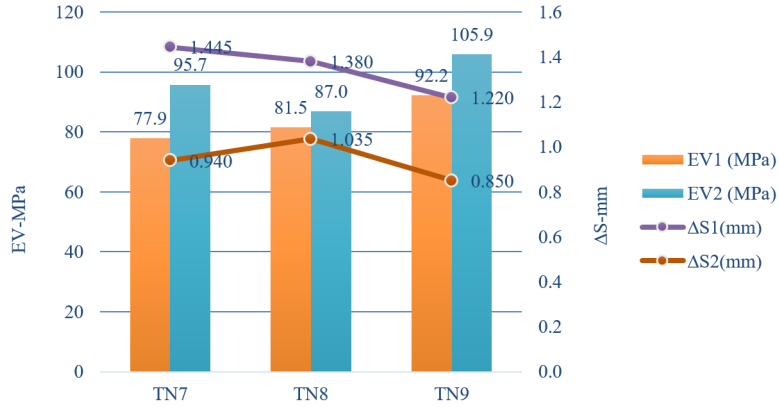
Bốn điểm TN4, TN5, TN8 và TN9 có $r < 1{,}2$, tức thuộc mức "rất tốt" theo [12]. Ba trong bốn điểm này (TN4, TN5, TN8) có EV_2 từ 87,0 đến 90,0 MPa, thuộc năm giá trị thấp nhất trong 27 điểm thử ban đầu. Theo (4), r nhỏ tại các điểm này do độ lún tái gia tải z_2 lớn (1,000–1,035 mm), xấp xỉ độ lún gia tải lần đầu e_1 sau khi quy đổi áp lực, chứ không do e_1 nhỏ.



Hình 6. EV_1, EV_2 và độ lún ΔS_1, ΔS_2 tại Lớp 1, Móng 1



Hình 7. EV_1, EV_2 và độ lún ΔS_1, ΔS_2 tại Lớp 2, Móng 1



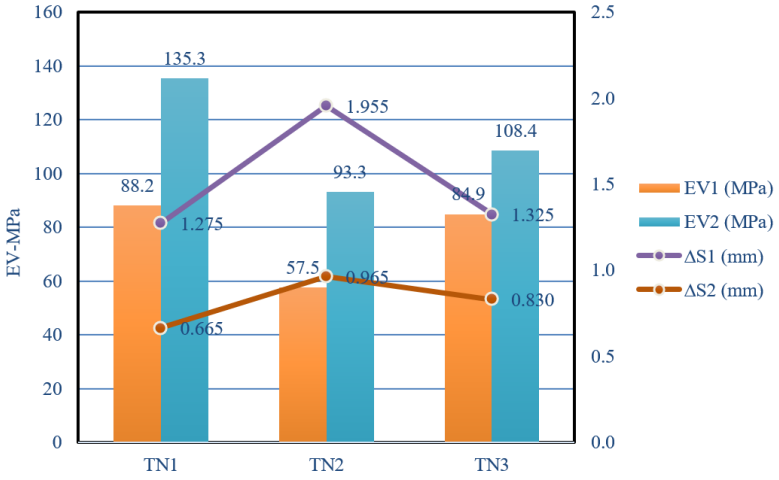
Hình 8. EV_1, EV_2 và độ lún ΔS_1, ΔS_2 tại Lớp 3, Móng 1

3.2. Kết quả tại Móng 2

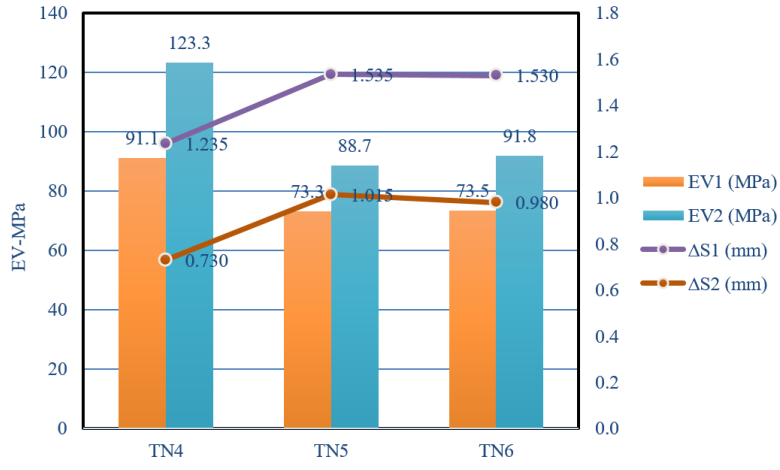
Bảng 2 tổng hợp kết quả chín điểm thử tại Móng 2; Hình 9–11 thể hiện EV_1, EV_2 và độ lún hai chu kỳ của từng lớp. Theo Bảng 2, tại Móng 2, xếp hạng theo r và theo EV_2 không trùng nhau. Lớp 1 (TN1–TN3) có EV_2 trung bình 112,3 MPa và r trung bình 1,48. Lớp 2 (TN4–TN6) có EV_2 trung bình 101,3 MPa và r trung bình 1,27. Lớp 3 (TN7–TN9) có EV_2 trung bình 92,0 MPa và r trung bình 1,61. Theo phân loại chỉ dựa vào r [12], Lớp 2 được xếp tốt nhất. Theo EV_2, Lớp 1 có độ cứng cao nhất. Khác với Móng 1, Lớp 3 tại Móng 2 xếp cuối theo cả hai chỉ tiêu.

Bảng 2. Kết quả thí nghiệm tại Móng 2

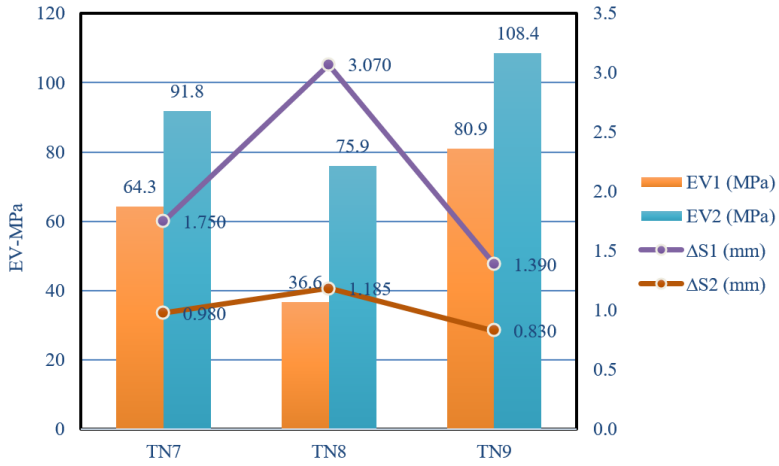
Móng 2	Chu kỳ 1			Chu kỳ 2			EV_2/EV_1
	ΔP (MPa)	ΔS_1 (mm)	EV_1 (MPa)	ΔP (MPa)	ΔS_2 (mm)	EV_2 (MPa)	
TN1	0,25	1,275	88,2	0,20	0,665	135,3	1,53
TN2	0,25	1,955	57,5	0,20	0,965	93,3	1,62
TN3	0,25	1,325	84,9	0,20	0,830	108,4	1,28
TN4	0,25	1,235	91,1	0,20	0,730	123,3	1,35
TN5	0,25	1,535	73,3	0,20	1,015	88,7	1,21
TN6	0,25	1,530	73,5	0,20	0,980	91,8	1,25
TN7	0,25	1,750	64,3	0,20	0,980	91,8	1,43
TN8	0,25	3,070	36,6	0,20	1,185	75,9	2,07
TN9	0,25	1,390	80,9	0,20	0,830	108,4	1,34



Hình 9. EV_1, EV_2 và độ lún ΔS_1, ΔS_2 tại Lớp 1, Móng 2



Hình 10. EV_1, EV_2 và độ lún ΔS_1, ΔS_2 tại Lớp 2, Móng 2



Hình 11. EV_1, EV_2 và độ lún ΔS_1, ΔS_2 tại Lớp 3, Móng 2

Không điểm nào tại Móng 2 đạt $r < 1{,}2$. Lớp 2 có r tập trung nhất (1,21–1,35), nhưng EV_2 của lớp này phân tán từ 88,7 đến 123,3 MPa. TN5 và TN6 có r thấp nhất Móng 2 (1,21 và 1,25), đồng thời có EV_2 thuộc nhóm thấp (88,7 và 91,8 MPa). Theo (4), r nhỏ tại hai điểm này do độ lún tái gia tải z_2 lớn (1,015 và 0,980 mm), chứ không do e_1 nhỏ (1,535 và 1,530 mm). Cơ chế này giống ba điểm TN4, TN5, TN8 tại Móng 1.

TN8 là điểm bất lợi nhất của Móng 2. Độ lún gia tải lần đầu $e_1 = 3{,}070$ mm là lớn nhất, kéo EV_1 xuống 36,6 MPa. $EV_2 = 75{,}9$ MPa là thấp nhất trong 27 điểm thử ban đầu và là giá trị duy nhất dưới 80 MPa; $r = 2{,}07$ là cao nhất của Móng 2 và không đạt yêu cầu $r < 2$ của dự án. Tại điểm này, r lớn và EV_2 nhỏ cùng xếp điểm này vào mức chưa đạt; hai chỉ tiêu cho cùng kết luận. Riêng TN8 đã kéo r trung bình của Lớp 3 lên 1,61, còn hai điểm còn lại của lớp này là TN7 (1,43) và TN9 (1,34). Điểm TN8′ được đầm nén bổ sung bằng máy lu 30 tấn và thử lại; kết quả trình bày trong Bảng 4. Sau đầm nén bổ sung, EV_2 tăng từ 75,9 lên 115,4 MPa (tăng 52%) và r giảm từ 2,07 xuống 1,51. EV_1 tăng từ 36,6 lên 76,5 MPa. Theo (4), cả hai độ lún đều giảm: e_1 giảm từ 3,070 xuống 1,470 mm và z_2 giảm từ 1,185 xuống 0,780 mm. Như vậy, số liệu quan sát được là cả e_1 và z_2 cùng giảm, trong đó e_1 giảm nhiều hơn nên r giảm; mặt nền cứng hơn ở cả hai chu kỳ tải. Diễn biến này ngược với TN4, TN8 và TN9 tại Móng 3 (Mục 3.3), nơi sau đầm nén bổ sung z_2 tăng, EV_2 giảm và r giảm.

3.3. Kết quả tại Móng 3 và kết quả thử lại

Bảng 3 tổng hợp kết quả chín điểm thử ban đầu tại Móng 3. EV_2 dao động 111,8–211,8 MPa; r dao động 1,39–2,39. Ba điểm có $r > 2{,}0$ là TN4 thuộc Lớp 2 ($r = 2{,}06$) và TN8, TN9 thuộc Lớp 3 ($r = 2{,}11$ và 2,39); theo [12] các điểm này được đánh giá là chưa đạt; ba điểm này cũng không đạt yêu cầu $r < 2$ của dự án, dù EV_2 (160,7–191,5 MPa) vượt xa yêu cầu 50 MPa. Ba điểm này được đầm nén bổ sung bằng máy lu 30 tấn và thử lại: TN4′, TN8′ và TN9′ (Bảng 4). Điểm TN7 ($r = 1{,}82$) đạt cả hai yêu cầu của dự án nên không thử lại.

So sánh Bảng 3 và Bảng 4 cho thấy hai chỉ tiêu dẫn đến hai đánh giá khác nhau về kết quả sau đầm nén bổ sung. Tại TN4, TN8 và TN9, r giảm từ 2,06 xuống 1,98, từ 2,11 xuống 1,72 và từ 2,39 xuống 1,32; theo thang phân loại tham khảo của [12], ba điểm chuyển từ mức "chưa đạt" sang mức "tốt". Cùng lúc, EV_2 giảm từ 180,0 xuống 155,2 MPa (giảm 14%), từ 160,7 xuống 145,2 MPa (giảm 10%) và từ 191,5 xuống 112,5 MPa (giảm 41%). Theo (4), r giảm tại cả ba điểm chủ yếu do độ lún tái gia tải z_2 tăng (từ 0,50 lên 0,58 mm, từ 0,56 lên 0,62 mm và từ 0,47 lên 0,80 mm). Độ lún gia tải lần đầu e_1 tăng tại TN4 (từ 1,290 lên 1,435 mm; EV_1 giảm từ 87,2 xuống 78,4 MPa) nhưng giảm nhẹ tại

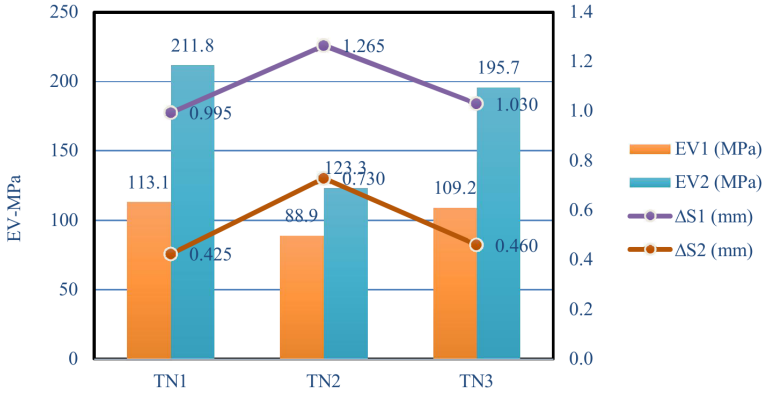
TN8 và TN9 (từ 1,475 xuống 1,330 mm và từ 1,405 xuống 1,320 mm; EV_1 tăng từ 76,3 lên 84,6 MPa và từ 80,1 lên 85,2 MPa). Như vậy, EV_2 đo được khi thử lại thấp hơn lần đầu tại cả ba điểm, trong khi tiêu chí chỉ theo r đánh giá mặt nền đã đạt. Mức thay đổi này chưa thể quy hoàn toàn cho tác dụng của đầm nén bổ sung: thí nghiệm được thử lại tại cùng vị trí nhưng lớp mặt đã bị xáo trộn và đầm lại; với hệ số biến thiên EV_2 giữa các điểm trong cùng vị trí 18–25% (Mục 3.5), chênh lệch giữa hai vị trí lân cận trong cùng lớp có thể cùng cỡ với mức thay đổi này.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm ban đầu tại Móng 3

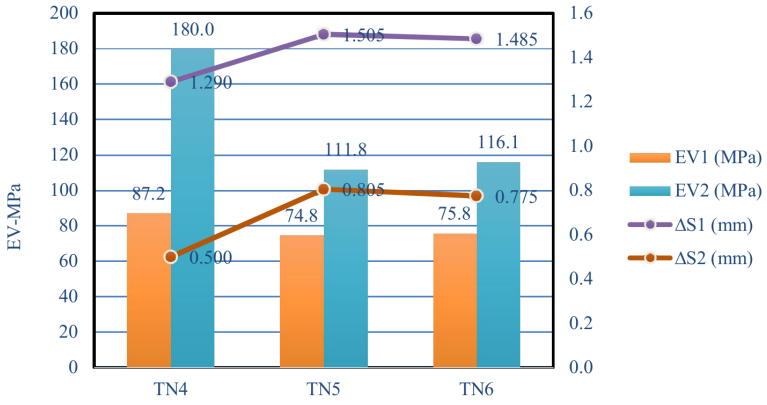
Móng 3	Chu kỳ 1			Chu kỳ 2			EV_2/EV_1
	ΔP (MPa)	ΔS_1 (mm)	EV_1 (MPa)	ΔP (MPa)	ΔS_2 (mm)	EV_2 (MPa)	
TN1	0,25	0,995	113,1	0,20	0,425	211,8	1,87
TN2	0,25	1,265	88,9	0,20	0,730	123,3	1,39
TN3	0,25	1,030	109,2	0,20	0,460	195,7	1,79
TN4	0,25	1,290	87,2	0,20	0,500	180,0	2,06
TN5	0,25	1,505	74,8	0,20	0,805	111,8	1,50
TN6	0,25	1,485	75,8	0,20	0,775	116,1	1,53
TN7	0,25	1,635	68,8	0,20	0,720	125,0	1,82
TN8	0,25	1,475	76,3	0,20	0,560	160,7	2,11
TN9	0,25	1,405	80,1	0,20	0,470	191,5	2,39

Bảng 4. Kết quả thử lại sau đầm nén bổ sung tại TN4, TN8, TN9, Móng 3 và điểm TN8, Móng 2

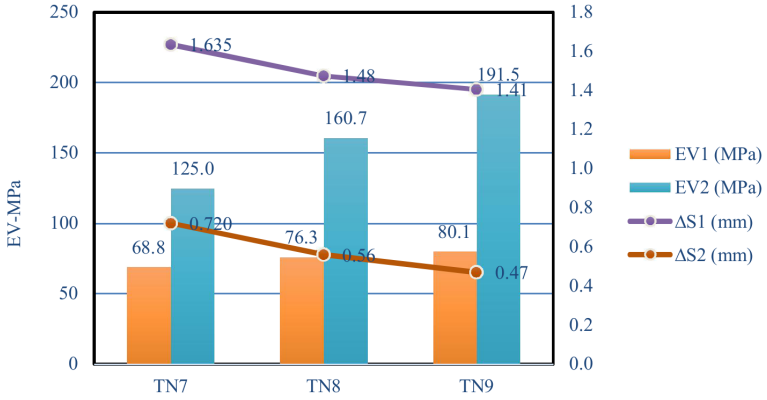
Điểm thử	Chu kỳ 1			Chu kỳ 2			EV_2/EV_1
	ΔP (MPa)	ΔS_1 (mm)	EV_1 (MPa)	ΔP (MPa)	ΔS_2 (mm)	EV_2 (MPa)	
M3–TN4′	0,25	1,435	78,4	0,20	0,580	155,2	1,98
M3–TN8′	0,25	1,330	84,6	0,20	0,620	145,2	1,72
M3–TN9′	0,25	1,320	85,2	0,20	0,800	112,5	1,32
M2–TN8′	0,25	1,470	76,5	0,20	0,780	115,4	1,51



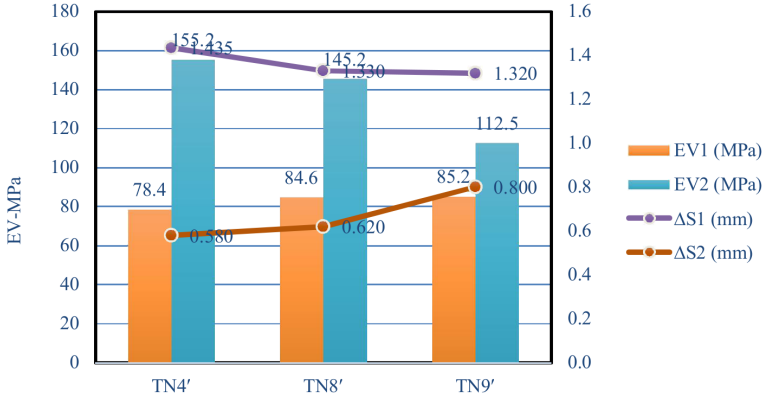
Hình 12. EV_1, EV_2 và độ lún ΔS_1, ΔS_2 tại Lớp 1, Móng 3



Hình 13. EV_1, EV_2 và độ lún ΔS_1, ΔS_2 tại Lớp 2, Móng 3



Hình 14. EV_1, EV_2 và độ lún ΔS_1, ΔS_2 tại Lớp 3, Móng 3, lần đầu



Hình 15. EV_1, EV_2 và độ lún ΔS_1, ΔS_2 khi thử lại tại TN4, TN8 và TN9, Móng 3

Số liệu hiện có chưa đủ để xác định nguyên nhân giảm độ cứng. Các nguyên nhân có thể gồm thay đổi độ ẩm, xáo trộn lớp mặt khi đầm lại, vị trí đặt bàn nén khác lần thử đầu và tính không đồng nhất của vật liệu. Tại lần thử đầu, TN4, TN8 và TN9 có EV_2 cao (180,0; 160,7 và 191,5 MPa) nhưng $r > 2{,}0$, tức e_1 lớn so với z_2: độ lún ở lần gia tải đầu lớn so với độ lún tái gia tải, trong khi mặt nền cứng khi tái gia tải. Một giả thuyết, chưa được kiểm chứng bằng số liệu của nghiên cứu, là trạng thái này do lớp mặt mỏng bị tơi xốp hoặc tiếp xúc giữa bàn nén và mặt thử chưa tốt. Trong trường hợp đó, kiểm tra và lu lèn lại lớp mặt có thể phù hợp hơn đầm nén lại toàn bộ lớp.

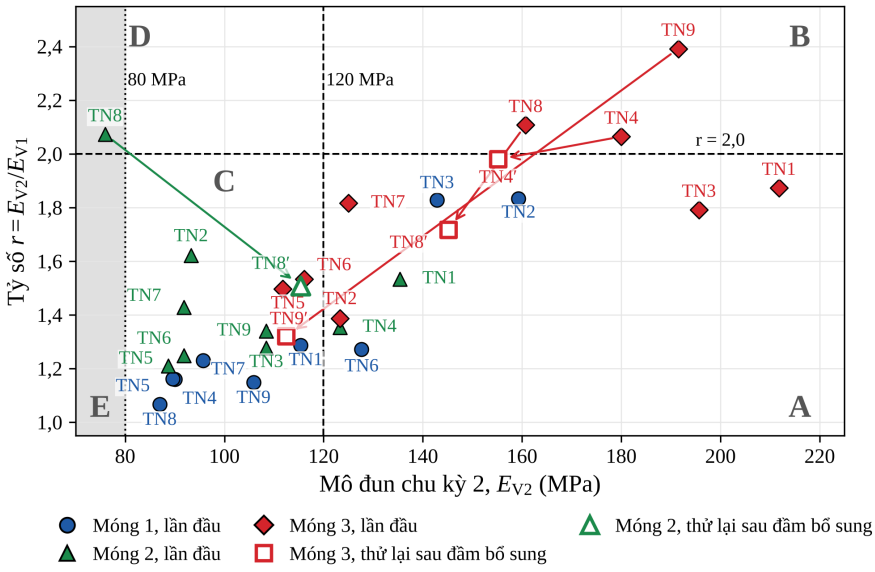
3.4. Ma trận sàng lọc EV_2–EV_2/EV_1

Các tài liệu đường sắt quốc tế quy định mức EV_2 theo vị trí lớp trong kết cấu nền. Rail Baltica nêu mức EV_2 = 80 MPa cho lớp nền chuẩn bị của đường tốc độ cao [3]; hướng dẫn thiết kế quy định 80 MPa cho nền chuẩn bị chưa xử lý và 120 MPa cho nền đã xử lý hoặc lớp dưới đá ba lát [1, 3]. Phương pháp thử, trạng thái ẩm và vị trí lớp trong các tài liệu này có thể khác điều kiện của nghiên cứu. Vì vậy, hai mức 80 MPa và 120 MPa chỉ được dùng làm mức tham chiếu để sàng lọc, không dùng để kết luận nghiệm thu.

Ma trận sàng lọc chia mặt phẳng EV_2–r thành năm nhóm theo hai mức EV_2 và giới hạn r = 2,0, trùng với yêu cầu $r < 2$ của dự án (Bảng 5, Hình 16). Trong 27 điểm thử ban đầu tại ba vị trí, 12 điểm có $EV_2 \geq 120$ MPa, trong đó 9 điểm thuộc nhóm A và 3 điểm (TN4, TN8, TN9 tại Móng 3) thuộc nhóm B. Tỷ lệ điểm đáp ứng mức tham chiếu 120 MPa khác nhau rõ giữa ba vị trí: 3/9 điểm tại Móng 1, 2/9 điểm tại Móng 2 và 7/9 điểm tại Móng 3. Mười bốn điểm thuộc nhóm C, gồm 6 điểm tại Móng 1, 6 điểm tại Móng 2 và 2 điểm tại Móng 3. Không có điểm nào thuộc nhóm D. Một điểm (TN8 tại Móng 2, EV_2 = 75,9 MPa, r = 2,07) thuộc nhóm E; đây là điểm duy nhất có $EV_2 < 80$ MPa. Sau đầm nén bổ sung tại Móng 3, TN4 chuyển từ nhóm B sang nhóm A (EV_2 = 155,2 MPa; r = 1,98); TN8 chuyển từ nhóm B sang nhóm A (EV_2 = 145,2 MPa; r = 1,72) và TN9 chuyển từ nhóm B sang nhóm C (EV_2 = 112,5 MPa; r = 1,32). Điểm TN8 tại Móng 2 chuyển từ nhóm E sang nhóm C (EV_2 = 115,4 MPa, r = 1,51).

Bảng 5. Ma trận sàng lọc EV_2–EV_2/EV_1 cho 27 điểm thử ban đầu tại Móng 1, Móng 2, Móng 3 và 4 lượt thử lại

Nhóm	Điều kiện	Số điểm ban đầu (n = 27)	Điểm thử	Diễn giải và hướng kiểm tra tiếp theo (tham khảo)
A	$EV_2 \geq$ 120 MPa; $r \leq$ 2,0	9	M1: TN2, TN3, TN6; M2: TN1, TN4; M3: TN1–TN3, TN7; thử lại: M3: TN4′, TN8′	Đáp ứng mức tham chiếu ở bước sàng lọc; chưa phải kết luận nghiệm thu
B	$EV_2 \geq$ 120 MPa; $r >$ 2,0	3	M3: TN4, TN8, TN9	Cứng khi tái gia tải, độ lún gia tải lần đầu lớn so với độ lún tái gia tải; kiểm tra lớp mặt, độ ẩm, điều kiện tiếp xúc trước khi quyết định đầm lại toàn lớp
C	80 $\leq EV_2 <$ 120 MPa; $r \leq$ 2,0	14	M1: TN1, TN4, TN5, TN7–TN9; M2: TN2, TN3, TN5–TN7, TN9; M3: TN5, TN6; thử lại: M3: TN9′; M2: TN8′	Đáp ứng mức tham chiếu 80 MPa, chưa đáp ứng mức tham chiếu 120 MPa ở bước sàng lọc
D	80 $\leq EV_2 <$ 120 MPa; $r >$ 2,0	0	–	Độ cứng trung bình, độ lún gia tải lần đầu lớn so với độ lún tái gia tải; kiểm tra bổ sung; xem xét đầm nén bổ sung và thử lại
E	$EV_2 <$ 80 MPa	1	M2: TN8	Chưa đáp ứng mức tham chiếu 80 MPa; kiểm tra bổ sung trước khi quyết định xử lý hoặc đầm nén bổ sung



Hình 16. Phân bố EV_2–EV_2/EV_1 của các điểm thử và các nhóm sàng lọc A–E; mũi tên nối kết quả lần đầu và kết quả thử lại tại TN4, TN8, TN9, Móng 3 và tại TN8, Móng 2

Ma trận tránh hai sai lệch của cách đánh giá chỉ theo r. Theo yêu cầu của dự án ($EV_2 \geq 50$ MPa và $r < 2$), cả 27 điểm ban đầu đều đạt yêu cầu EV_2; bốn điểm không đạt đều do $r \geq 2$ (TN4, TN8, TN9 tại Móng 3 và TN8 tại Móng 2), trong đó ba điểm tại Móng 3 có EV_2 từ 160,7 đến 191,5 MPa. Như vậy, mọi quyết định đầm nén bổ sung trong dự án đều do chỉ tiêu r. Sai lệch thứ nhất là chấp nhận mặt nền có r nhỏ nhưng EV_2 thấp, như các điểm TN4, TN5, TN8 tại Móng 1 và TN5, TN6 tại Móng 2 (r = 1,07–1,25; EV_2 = 87,0–91,8 MPa). Sai lệch thứ hai là yêu cầu đầm lại mặt nền có EV_2 cao chỉ vì r lớn, như TN4, TN8, TN9 tại Móng 3; kết quả thử lại tại các điểm này cho EV_2 thấp hơn lần đầu. Khi hai chỉ tiêu cùng chỉ ra nền chưa đạt, như TN8 tại Móng 2 ($r > 2,0$ và $EV_2 < 80$ MPa), ma trận cho cùng kết luận với cách đánh giá theo r và xếp điểm này vào nhóm cần xử lý. Kết quả thử lại tại bốn điểm, dù còn ít, không mâu thuẫn với hướng kiểm tra đề xuất cho từng nhóm: sau đầm nén bổ sung, EV_2 đo được tại điểm nhóm E tăng 52%, còn tại ba điểm nhóm B giảm 14%, 10% và 41%. Việc xét đồng thời EV_2 và EV_2/EV_1 đã có trong tiêu chuẩn của Pháp [9]. Đóng góp của bài báo là định lượng hệ quả của việc tách rời hai chỉ tiêu trên số liệu hiện trường của vật liệu hạt thô tại Việt Nam, gồm cả trường hợp thử lại sau đầm nén bổ sung, và đề xuất cách phân nhóm gắn với hướng kiểm tra tiếp theo. Ma trận chỉ là công cụ sàng lọc sơ bộ; các nhóm A–E không phải tiêu chí chấp nhận chất lượng đầm chặt và chưa được kiểm chứng như một quy trình nghiệm thu.

3.5. Ứng dụng đối với nghiệm thu nền đường sắt tốc độ cao và giới hạn của nghiên cứu

Đối với nền ĐSTĐC, ma trận EV_2–r có thể dùng làm công cụ sàng lọc trong giai đoạn thi công thử và kiểm soát chất lượng vật liệu hạt thô. Mức EV_2 mục tiêu cần quy định theo vị trí lớp trong kết cấu nền; r dùng làm ngưỡng cảnh báo để quyết định kiểm tra bổ sung. Tính đồng đều cũng cần được đánh giá. Hệ số biến thiên của EV_2 là 23,0% tại Móng 1 (độ lệch chuẩn 25,9 MPa), 18,3% tại Móng 2 (18,7 MPa) và 24,7% tại Móng 3 (38,9 MPa). EV_2 trung bình của ba vị trí lần lượt là 112,6; 101,9 và 157,3 MPa; giá trị lớn nhất cao hơn giá trị nhỏ nhất 54%, dù ba vị trí dùng cùng vật liệu và cùng thiết bị đầm. Tính chung 27 điểm thử ban đầu, EV_2 dao động 75,9–211,8 MPa, trung bình 123,9 MPa, độ lệch chuẩn 37,1 MPa, hệ số biến thiên 29,9%. Hệ số biến thiên này phản ánh độ phân tán tổng hợp

của nền và phép thử, không phải độ lặp lại của phép thử, vì nghiên cứu không có thiết kế thử lặp có kiểm soát. Với mức biến thiên này, kết quả tại một điểm thử khó đại diện cho cả đoạn nền; nghiệm thu theo đoạn đồng nhất với số điểm thử đủ lớn [1] phù hợp hơn với yêu cầu đồng đều của nền ĐSTĐC.

Mỗi lớp thí nghiệm gồm ba lớp đắp dày tối đa 30 cm, tức khoảng 0,9 m chiều cao đắp. Vùng ảnh hưởng của bàn nén 600 mm vào khoảng 1,0–1,5 lần đường kính (0,6–0,9 m), xấp xỉ chiều cao một lớp thí nghiệm, nên EV_2 đo trên mặt mỗi lớp thí nghiệm chủ yếu phản ánh độ cứng của ba lớp đắp vừa thi công, cùng một phần các lớp bên dưới. Tại cả ba vị trí, Lớp 1 có EV_2 trung bình lớn nhất (139,2 MPa tại Móng 1; 112,3 MPa tại Móng 2 và 176,9 MPa tại Móng 3); kết quả này có thể liên quan đến điều kiện nền bên dưới khối đắp. Tại Móng 1 và Móng 2, EV_2 trung bình giảm dần từ Lớp 1 lên Lớp 3 (139,2; 102,4; 96,2 MPa và 112,3; 101,3; 92,0 MPa), có thể liên quan đến ảnh hưởng giảm dần của nền bên dưới khi chiều cao đắp tăng, hoặc đến điều kiện thi công thay đổi theo thời gian vì các lớp trên được thi công sau; số liệu hiện có chưa đủ để tách hai yếu tố này. Tại Móng 3, quy luật này không rõ (176,9; 136,0 và 159,1 MPa). Khi áp dụng cho nền ĐSTĐC, mức EV_2 yêu cầu cần gắn với cao độ thí nghiệm và chiều dày các lớp bên dưới.

Nghiên cứu có các giới hạn sau. Thứ nhất, số liệu thu từ một dự án nền đắp ở Lâm Đồng, không phải nền đường sắt. Thứ hai, vật liệu là đất rời $D < 80$ mm; kết quả chưa đại diện cho đất dính, laterit hoặc vật liệu gia cố. Thứ ba, không có phép đo K và độ ẩm ghép cặp tại cùng điểm thử, nên chưa thể xây dựng tương quan giữa K và EV_2 hoặc r. Thứ tư, đầm nén bổ sung và thử lại chỉ thực hiện tại bốn điểm (TN4, TN8, TN9 tại Móng 3 và TN8 tại Móng 2), nên chưa đủ để khái quát hiệu quả của đầm nén bổ sung cho từng nhóm của ma trận. Thứ năm, nghiên cứu không có thí nghiệm tải trọng lặp, đo vận tốc sóng hoặc quan trắc lún dài hạn. Thứ sáu, độ lún được đo bằng hai đồng hồ đối xứng qua tâm thay vì tại tâm hoặc tại ba điểm như NF P 94-117-1 quy định. Kết quả do đó cho thấy khả năng sàng lọc độ cứng tại hiện trường, chưa chứng minh nền đủ điều kiện khai thác ĐSTĐC.

4. Kết luận

Từ 31 lượt thí nghiệm bàn nén tĩnh theo NF P 94-117-1 trên nền đắp vật liệu hạt thô ($D < 80$ mm) tại Lâm Đồng, rút ra các kết luận sau trong phạm vi vật liệu và số liệu của nghiên cứu.

(1) Quy trình NF P 94-117-1 thực hiện được tại hiện trường với vật liệu hạt thô mà không cần hiệu chỉnh hạt quá cỡ. Kết quả là chỉ tiêu độ cứng của mặt nền, không thay thế hệ số đầm chặt K.

(2) Tỷ số $r = EV_2/EV_1 = 0{,}8e_1/z_2$ là chỉ báo tương quan giữa đáp ứng biến dạng ở chu kỳ gia tải đầu và độ lún tái gia tải, không đo trực tiếp độ lún dư; EV_2 phản ánh độ cứng khi tái gia tải. Hai chỉ tiêu mang thông tin khác nhau và không thay thế cho nhau.

(3) Đánh giá chỉ theo r cho kết quả ngược với đánh giá theo EV_2. Tại Móng 1 và Móng 2, năm điểm có EV_2 từ 87,0 đến 91,8 MPa, thuộc nhóm thấp nhất trong 27 điểm, đều có $r \leq 1{,}25$, tức được xếp "tốt" hoặc "rất tốt" theo r. Tại Móng 3, sau đầm nén bổ sung, r của TN4, TN8 và TN9 giảm xuống dưới 2,0 trong khi EV_2 giảm 14%, 10% và 41%.

(4) Ma trận sàng lọc EV_2–r xếp 27 điểm ban đầu thành 9 điểm nhóm A, 3 điểm nhóm B, 14 điểm nhóm C và 1 điểm nhóm E theo các mức tham chiếu 80 MPa, 120 MPa và $r = 2{,}0$. Ma trận hỗ trợ sàng lọc và định hướng kiểm tra tiếp theo; phương án xử lý cụ thể cho từng nhóm cần được xem xét trên cơ sở dữ liệu hiện trường bổ sung. Với số điểm thử lại còn hạn chế (bốn điểm), kết quả mới cho thấy xu hướng không mâu thuẫn với phân nhóm: sau đầm nén bổ sung, EV_2 của điểm nhóm E (TN8, Móng 2) tăng 52%, còn EV_2 của ba điểm nhóm B (TN4, TN8, TN9, Móng 3) giảm 14%, 10% và 41%.

(5) Đối với nền ĐSTĐC, thí nghiệm bàn nén 600 mm có thể dùng làm phép thử bổ sung cho K với vật liệu hạt thô. Mức EV_2 mục tiêu, giới hạn cảnh báo của r và tần suất điểm thử cần được hiệu

chuẩn trên đoạn thi công thử và quy định theo vị trí lớp; số liệu hiện tại chưa đủ để đề xuất ngưỡng nghiệm thu.

Nghiên cứu tiếp theo cần bổ sung số liệu ghép cặp K, độ ẩm và EV_2 tại cùng điểm thử, thí nghiệm tải trọng lặp và số liệu trên đoạn nền đường sắt để chuyển ma trận sàng lọc thành tiêu chí nghiệm thu.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, các tác giả đã sử dụng Claude để cải thiện khả năng diễn đạt của bản thảo. Các tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

Tài liệu tham khảo

[1] Katsigiannis, G. (2024). High-speed rail earthworks design developments and innovative trials – building Britain's technical legacy. *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*, London, CRC Press, 127–136.

[2] Kozubal, J. V., Wyborski, P., Tankiewicz, M., Gisterek, I. (2022). Reliability assessment approach for the quality of railroad subgrade. *Materials*, 15(5):1864.

[3] RB Rail AS, RBDG-MAN-015-0107 (2026). *Design guidelines – Railway substructure, part 1: Embankments and earthworks*. Rail Baltica Design Guidelines, Riga.

[4] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam (2024). *Nghị quyết số 172/2024/QH15 ngày 30/11/2024 về chủ trương đầu tư Dự án đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc – Nam*. Hà Nội.

[5] TCVN 9350:2012. *Đất xây dựng – Phương pháp phóng xạ xác định độ ẩm và độ chặt của đất tại hiện trường*. Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội.

[6] TCVN 4201:2012. *Đất xây dựng – Phương pháp xác định độ chặt tiêu chuẩn trong phòng thí nghiệm*. Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội.

[7] 22 TCN 333-06. *Quy trình đầm nén đất, đá dăm trong phòng thí nghiệm*. Tiêu chuẩn ngành, Bộ Giao thông vận tải, Hà Nội.

[8] TCVN 9436:2012. *Nền đường ô tô – Thi công và nghiệm thu*. Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội.

[9] NF P94-117-1 (2000). *Sols: Reconnaissance et essais – Portance des plates-formes – Partie 1: Module sous chargement statique à la plaque (EV2)*. Paris: Association Française de Normalisation (AFNOR).

[10] Martins, J., Gomes Correia, A. (2008). *Contributions for standardisation of plate loading test*. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

[11] Gomes Correia, A., Martins, J. P., Caldeira, L., Maranha das Neves, E., Delgado, J. L. C. (2009). Comparison of in situ performance-based test methods to evaluate moduli of railway embankments. Tutumluer, E., Al-Qadi, I. L., editors, *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, London, Taylor & Francis, 1331–1340. Proceedings of the 8th International Conference BCRRA, Illinois, USA. ISBN 978-0-415-87199-0.

[12] ARVOR Géotechnique, Fiche technique MPEC-FT-01, Indice A, 24/01/2011. *Portance des plates-formes – Mesure du module sous chargement statique à la plaque (EV2) – (NF P94-117-1)*.

[13] TCVN 9354:2012. *Đất xây dựng – Phương pháp xác định mô đun biến dạng tại hiện trường bằng tấm nén phẳng*. Tiêu chuẩn Xây dựng Việt Nam, NXB Xây dựng, Hà Nội.

[14] Anh, P. V., Mạnh, N. Đ., Tuân, N., Viên, V. C., Thảo, N. T. T., Hà, L. T. N. (2024). Sức chịu tải của cọc khoan nhồi trong đá: Một nghiên cứu điển hình. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCNXD) - ĐHXDHN*, 18(3V):117–127.