VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Nghiên cứu một số phương pháp xác định chiều dày kết cấu nền đường sắt và khả năng áp dụng cho dự án tại Việt Nam

Nguyễn Quốc Tới[1*], Nguyễn Phương Nhung[1]

[1]Khoa Công trình, Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải

TỪ KHOÁ

Đường sắt
Kết cấu nền đường Chiều dày kết cấu
Đá ba lát
Nền đất
Tải trọng lặp

TÓM TẮT

Chiều dày kết cấu nền đường sắt là yếu tố quan trọng trong phân bố tải trọng và kiểm soát ứng suất truyền xuống nền đất. Nghiên cứu tổng hợp và phân tích bốn phương pháp xác định chiều dày kết cấu nền đường, gồm Li–Selig, UIC 719R, British Rail và Network Rail, dựa trên các thông số đầu vào và tiêu chí thiết kế đặc trưng. Các phương pháp được áp dụng cho một trường hợp nghiên cứu đại diện cho đường sắt tốc độ cao Bắc–Nam nhằm so sánh chiều dày yêu cầu trong cùng điều kiện nền đất và tải trọng khai thác. Kết quả cho thấy chiều dày tính toán thay đổi đáng kể giữa các phương pháp, trong khoảng 0,65 m ÷ 1,20 m. Sự khác biệt chủ yếu liên quan đến giả thiết tính toán, đặc trưng nền đất và tiêu chí kiểm soát biến dạng của từng phương pháp. Kết quả là cơ sở tham khảo để lựa chọn và kiểm tra chiều dày kết cấu nền đường trong điều kiện xây dựng và khai thác đường sắt tại Việt Nam.

KEYWORDS

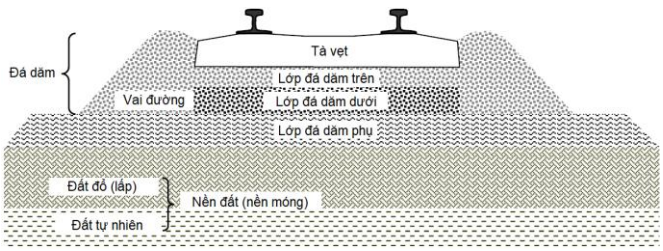
Railways
Railway foundation
Foundation layer thickness
Ballast
Subgrade
Repeated loading

ABSTRACT

The thickness of railway foundation layers is an important factor in load distribution and stress control within the subgrade under repeated train loading. This study reviews and compares four approaches for determining railway foundation layer thickness, namely the Li–Selig, UIC 719R, British Rail, and Network Rail methods, with emphasis on their input parameters and design criteria. The methods are applied to a representative high-speed railway project in Vietnam to compare the required thickness under the same subgrade and loading conditions. The calculated thicknesses vary considerably, ranging from 0.65 m to 1.20 m, reflecting differences in modelling assumptions, subgrade properties, loading conditions, and deformation criteria. The results highlight the importance of selecting an appropriate design approach based on the characteristics of the subgrade and railway loading conditions. The findings provide a reference for assessing railway foundation layer thickness design approaches for railway projects in Vietnam.

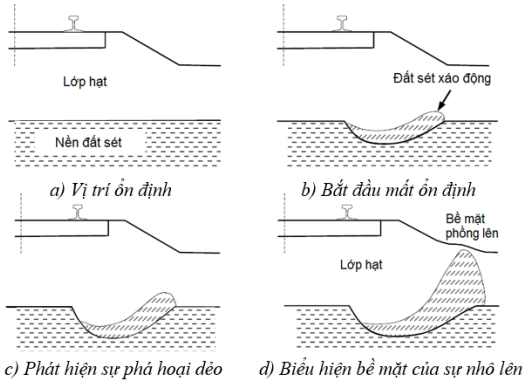
1. Giới thiệu

Trong kết cấu đường sắt sử dụng đá ba lát, nền đường có vai trò quan trọng đối với độ ổn định và chất lượng khai thác của hệ thống đường ray. Dưới tác dụng lặp lại của tải trọng đoàn tàu và các yếu tố môi trường, nền đường có thể suy giảm theo thời gian. Khác với lớp đá ba lát có thể dễ dàng bảo trì, bổ sung hoặc thay thế, nền đất bên dưới khó tiếp cận và xử lý hơn. Vì vậy, đánh giá ứng xử lâu dài của nền đường dưới tải trọng lặp lại là vấn đề quan trọng trong thiết kế và khai thác đường sắt [1]. Cấu trúc cơ bản của hệ thống đường ray được minh họa trên Hình 1.



Hình 1. Cấu trúc đường ray tàu hỏa [1].

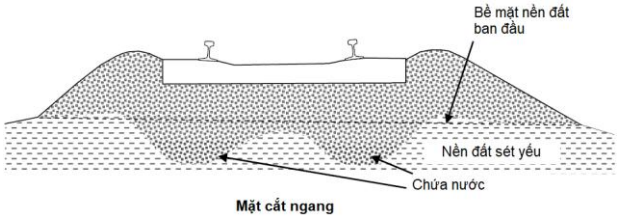
Đối với nền đất hạt mịn, tải trọng lặp lại có thể gây xói mòn, biến dạng và phá hoại cắt tích lũy, cũng như lún dư do tích tụ biến dạng dẻo [1]. Khi ứng suất cắt đạt mức đủ lớn, phá hoại cắt có thể phát triển qua nhiều chu kỳ tải; ngay cả khi tải trọng thấp hơn, biến dạng dư vẫn có thể tích lũy và gây lún không đều, làm suy giảm chất lượng hình học đường ray (Hình 2).



Hình 2. Phá hủy cắt tiến triển của nền đất [1].

*Liên hệ tác giả: toinq@utt.edu.vn
Nhận ngày 19/09/2026, sửa xong ngày 22/10/2026, chấp nhận đăng ngày 23/10/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1537

Sự xâm nhập của đá ba lát vào nền đất có thể hình thành các vùng lõm giữ nước, làm tăng độ ẩm và giảm sức kháng của đất (Hình 3). Trong điều kiện thoát nước không thuận lợi, tải trọng lặp lại kết hợp với đất yếu còn có thể gây bơm bùn và thúc đẩy suy giảm nền đường [1]. Do đó, các vấn đề cần kiểm soát chủ yếu là phá hoại cắt tích lũy và biến dạng, lún dư quá mức. Có thể hạn chế các dạng hư hỏng này bằng cách thay đổi dạng kết cấu đường ray, tăng độ cứng của các lớp vật liệu, hoặc cải thiện đất nền [2]. Tuy nhiên, đối với kết cấu đường sắt thông thường, lựa chọn chiều dày hợp lý của lớp đá ba lát và các lớp vật liệu nền vẫn là giải pháp cơ bản để kiểm soát ứng suất truyền xuống nền đất.



Hình 3. Biến dạng dẻo nền đường quá mức [4].

Chiều dày kết cấu nền đường sắt được xác định theo nhiều phương pháp dựa trên các giả thiết khác nhau về tải trọng, đặc tính nền đất, điều kiện khai thác và tiêu chí giới hạn biến dạng hoặc phá hoại. Burrow và cộng sự [3] cho thấy các phương pháp hiện hành có thể cho kết quả khác nhau ngay cả với cùng điều kiện đầu vào. Trên cơ sở kế thừa các phương pháp thiết kế nền đường sắt, nghiên cứu này phân tích và so sánh các phương pháp xác định chiều dày kết cấu nền đường, đồng thời áp dụng cho một trường hợp nghiên cứu tại Việt Nam nhằm đánh giá ảnh hưởng của điều kiện nền đất và tải trọng khai thác đến chiều dày yêu cầu. Kết quả là cơ sở tham khảo cho việc lựa chọn và kiểm tra phương pháp xác định chiều dày kết cấu nền đường sắt trong điều kiện Việt Nam.

2. Quy trình thiết kế

Nghiên cứu đánh giá bốn quy trình thiết kế nền đường sắt phổ biến từ Hoa Kỳ, Châu Âu và Vương quốc Anh: Li–Selig, UIC 719R, British Rail (BR) và Network Rail (NR). Các quy trình này bao quát từ phân tích cơ học trạng thái ứng suất – biến dạng đến các hướng dẫn thực nghiệm và quy phạm thực hành.

Mỗi phương pháp sử dụng thông số đầu vào và tiêu chí kiểm tra riêng: kiểm soát ứng suất gây phá hoại cắt và biến dạng dẻo tích lũy, hoặc tra bảng/quan hệ thực nghiệm dựa trên đặc trưng nền đất và điều kiện khai thác. Các yếu tố chi phối chính của từng quy trình được tổng hợp trong Bảng 1 và phân tích cụ thể dưới đây.

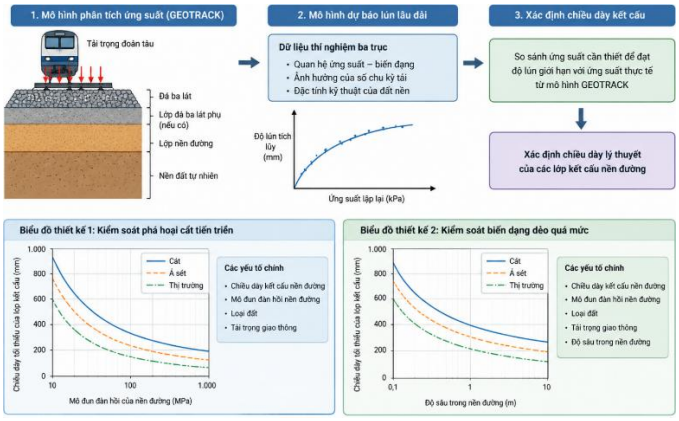
Bảng 1. Các yếu tố được xem xét trong bốn quy trình thiết kế [3].

Yếu tố	Li cùng cộng sự	UIC 719R	Phương pháp BR	NR Code 039
Phương pháp	Phân tích/Biểu đồ	Kinh nghiệm	Phân tích/Biểu đồ	Biểu đồ
Tải trọng trục tĩnh	Mô hình GEOTRACK được sử dụng để xây dựng biểu đồ thiết kế	Có	Từ mô hình đàn hồi – biểu đồ chỉ lên đến tải trọng trục là 24 tấn	Không – nhưng giới hạn tải trọng trục 25,4 tấn trên mạng lưới Vương quốc Anh
Loại tà vẹt, chiều dài và khoảng cách	Được mô hình hóa bởi GEOTRACK	Có	Không có sự khác biệt về ứng suất được tìm thấy đối với khoảng cách giữa các thanh tà vẹt 630–790 mm	Không
Tiết diện đường ray	Được mô hình hóa bởi GEOTRACK	Không	Không	Không
Tốc độ	Được xem xét gián tiếp trong việc xác định tải trọng trục động	Có	Không – nhưng có thể được kết hợp bằng cách sử dụng tải trọng trục động	Được xem xét gián tiếp bằng các yêu cầu tối thiểu về độ cứng chống đỡ của thanh tà vẹt động. Ngoài ra, 200 km/h là tốc độ nhanh nhất trên mạng lưới của Vương quốc Anh
Trọng tải hàng năm	Có	Có	Không	Không
Tổng trọng tải	Từ trọng tải hàng năm nhân với tuổi thọ thiết kế	Không	Không	Không
Tình trạng nền đất	Được thể hiện bằng mô đun đàn hồi và cường độ cắt của đất	Chất lượng đất được xác định chủ yếu từ số lượng hạt mịn trong đất	Ngưỡng ứng suất cho vật liệu đang xét	Mô đun nền đất không thoát nước hoặc cường độ cắt không thoát nước
Tiêu chí thiết kế	• phá hoại cắt tiến triển • biến dạng dẻo	N/A	• biến dạng dẻo	• mô đun nền đất

Bốn quy trình được lựa chọn sẽ được trình bày khái quát trong các mục dưới đây, tập trung vào cơ sở xây dựng phương pháp, các thông số đầu vào và tiêu chí được sử dụng để xác định chiều dày kết cấu nền đường.

2.1. Phương pháp của Li cùng cộng sự (Li–Selig)

Phương pháp Li–Selig [2] dựa trên lý thuyết cơ học nhằm kiểm soát đồng thời hai cơ chế hư hỏng chính: phá hoại cắt tiến triển và biến dạng dẻo tích lũy quá mức. Trạng thái ứng suất trong nền đường do đoàn tàu gây ra được xác định từ mô hình GEOTRACK, kết hợp với mô hình dự báo lún lâu dài thiết lập từ thí nghiệm nén ba trục lặp (Hình 4).



Hình 4. Sơ đồ khái quát quy trình thiết kế theo phương pháp của Li cùng cộng sự, xây dựng dựa trên [2].

Chiều dày kết cấu được xác định thông qua hai nhóm biểu đồ thiết kế:

• Nhóm kiểm soát phá hoại cắt: Chiều dày phụ thuộc vào mô đun đàn hồi hồi phục của nền (E_r, tỷ số giữa ứng suất lệch tuần hoàn và biến dạng dọc trục hồi phục), loại đất và tải trọng tích lũy.

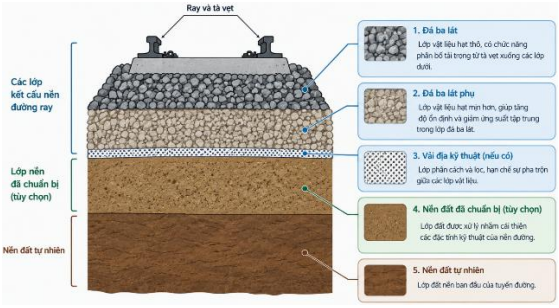
• Nhóm kiểm soát biến dạng dẻo: Chiều dày phụ thuộc vào các yếu tố trên và xét thêm sự giảm dần ứng suất theo chiều sâu nền đường.

Phương pháp cho phép đánh giá độc lập hai cơ chế hư hỏng để chọn chiều dày thiết kế tối ưu cho từng điều kiện khai thác [2].

2.2. UIC 719R

UIC 719R là quy trình thiết kế mang tính kinh nghiệm dựa trên thực tiễn đường sắt Pháp. Kết cấu nền đường gồm các lớp: đá ba lát, đá ba lát phụ, vải địa kỹ thuật và nền đất chuẩn bị (Hình 5).

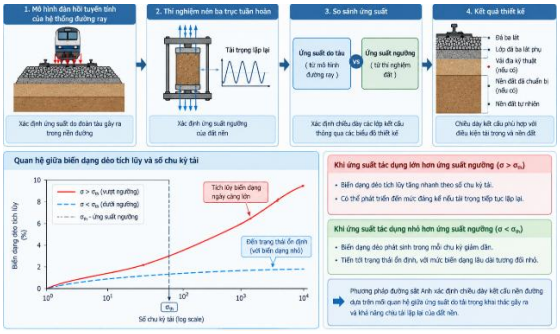
Chiều dày kết cấu được tính bằng tổng chiều dày các lớp phía trên nền đất tự nhiên, dựa trên loại đất nền, tải trọng/mật độ giao thông, tốc độ chạy tàu và cấu hình đường ray. Quy trình không đưa ra công thức xác định chiều dày riêng biệt cho từng lớp đá. Lớp nền đất chuẩn bị được bố trí tùy chọn dưới lớp đá ba lát phụ nhằm cải thiện đặc tính cơ học của nền theo yêu cầu dự án.



Hình 5. Sơ đồ cấu tạo các lớp nền đường theo tiêu chuẩn UIC 719R [6].

2.3. Phương pháp đường sắt Anh (British Rail - BR)

Phương pháp British Rail [7] tập trung kiểm soát biến dạng dẻo tích lũy của nền đường dưới tải trọng lặp thông qua chỉ tiêu suất ngưỡng (σ_{th}). Ứng suất do đoàn tàu gây ra (xác định từ mô hình đàn hồi tuyến tính) được so sánh với ứng suất ngưỡng thu được từ thí nghiệm nén ba trục tuần hoàn (Hình 6) [7].



Hình 6. Minh họa khái niệm ứng suất ngưỡng và sự khác biệt về xu hướng tích lũy biến dạng dẻo của nền đất theo phương pháp đường sắt Anh [7].

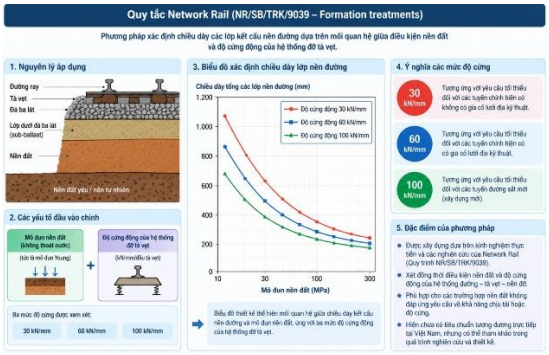
Khi ứng suất tác dụng $\sigma > \sigma_{th}$, biến dạng dư gia tăng nhanh theo chu kỳ tải gây mất ổn định nền. Ngược lại, khi $\sigma \leq \sigma_{th}$, biến dạng dẻo trong từng chu kỳ giảm dần và tiến tới trạng thái ổn định lâu dài [7]. Nhờ đó, phương pháp xác định chiều dày kết cấu tối ưu dựa trên khả năng chịu tải lặp lâu dài của nền đất thay vì chỉ xem xét trạng thái ứng suất tức thời [7].

2.4. Quy tắc Network Rail (NR Code 039)

Quy trình NR/SB/TRK/9039 của Network Rail xác định chiều dày kết cấu nền đường dựa trên sự tương tác giữa điều kiện nền đất và đặc tính động của hệ thống ray – tà vẹt – nền đỡ.

Thông số đầu vào chính là mô đun Young của nền đất không thoát nước (E) kết hợp với ba mức độ cứng động của hệ thống đỡ tà vẹt: 30 kN/mm (tuyến hiện hữu không lưới địa kỹ thuật), 60 kN/mm (tuyến hiện hữu có lưới địa kỹ thuật) và 100 kN/mm (tuyến xây mới) (Hình 7). Chiều dày các lớp nền đường được tra trực tiếp từ biểu đồ thiết kế tương ứng với mô đun đất và cấp độ cứng yêu cầu. Phương

pháp này phù hợp để tham khảo đánh giá các đoạn tuyến có nền đất yếu hoặc biến đổi phức tạp tại Việt Nam.



Hình 7. Sơ đồ minh họa phương pháp xác định chiều dày kết cấu nền đường theo Network Rail [8].

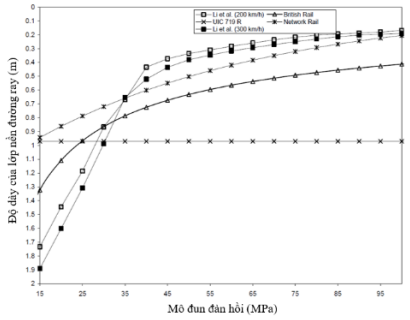
2.5. So sánh chiều dày lớp nền đường theo điều kiện nền

Để so sánh 4 quy trình, hai kịch bản tải trọng được khảo sát với cơ cấu đoàn tàu 50 % hàng hóa (Class 66, tốc độ 125 km/h, tải trục 250 kN) và 50 % hành khách (tải trục 170 kN, vận tốc 200 km/h và 300 km/h).

Kết quả tính toán (Hình 8) cho thấy có sự khác biệt rõ rệt về chiều dày thiết kế giữa các phương pháp khi chất lượng nền đường thay đổi:

- Li–Selig: Là phương pháp duy nhất phản ánh sự thay đổi chiều dày theo vận tốc khai thác (200 km/h so với 300 km/h).
- UIC 719R: Cho chiều dày không đổi theo cường độ nền đất trong phạm vi khảo sát.
- BR và Network Rail: Kết quả chiều dày giảm dần theo sự gia tăng mô đun nền.

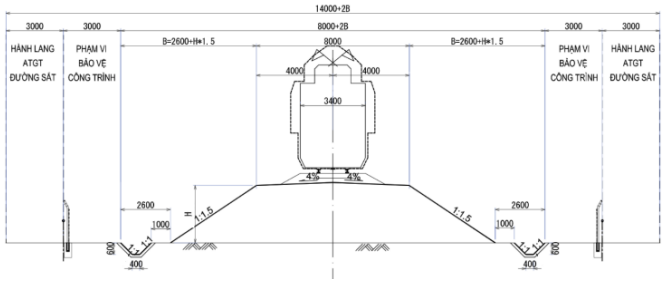
Sự sai khác này xuất phát từ các giả thiết mô hình hóa, cách quy đổi tải trọng giao thông và tiêu chí giới hạn biến dạng riêng của từng quy trình.



Hình 8. Quan hệ giữa chiều dày thiết kế lớp nền đường ray và điều kiện nền đường [3].

3. Trường hợp nghiên cứu

Nghiên cứu áp dụng thử nghiệm bốn phương pháp thiết kế cho một đoạn tuyến thuộc dự án Đường sắt tốc độ cao Bắc–Nam (Hình 9). Với cùng một tập hợp điều kiện đầu vào (địa chất nền đất yếu, tải trọng đoàn tàu và tốc độ khai thác), chiều dày lớp nền đường sắt được xác định nhằm phân tích mức độ chênh lệch giữa các phương pháp.



Hình 9. Mặt cắt ngang điển hình nền đường đắp.

Nghiên cứu tập trung đánh giá ảnh hưởng đồng thời của đặc tính nền đất và tải trọng khai thác đến chiều dày thiết kế. Qua đó, xác định phạm vi biến thiên kết quả và xem xét khả năng áp dụng của từng phương pháp trong điều kiện thực tế tại Việt Nam.

3.1. Điều kiện và dữ liệu đầu vào

Bài báo nghiên cứu một đoạn tuyến thuộc dự án Đường sắt tốc độ cao Bắc–Nam sử dụng kết cấu đường ray có đá ba lát. Hệ thống nền đường gồm: lớp đá ba lát, lớp vật liệu đệm phía dưới (sub-ballast) và nền đất tự nhiên.

Điều kiện địa chất nền được đặc trưng bởi mô đun biến dạng E_s và cường độ cắt không thoát nước c_u, đại diện cho lớp đất sét yếu đặc trưng tại Việt Nam. Tải trọng đoàn tàu và tốc độ khai thác được quy định thống nhất để bảo đảm sự chênh lệch kết quả chiều dày giữa các phương pháp chủ yếu xuất phát từ cơ sở lý thuyết và tiêu chí thiết kế. Các thông số đầu vào chính được tổng hợp trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số đầu vào.

Thông số	Giá trị sử dụng trong nghiên cứu
Tuyến nghiên cứu	Đường sắt tốc độ cao Bắc–Nam
Loại kết cấu	Đường sắt có đá ba lát
Khổ đường	1.435 mm
Tốc độ thiết kế	350 km/h
Tốc độ khai thác giả định	320 km/h
Tải trọng trục thiết kế	225 kN
Loại tàu	Tàu khách tốc độ cao
Loại nền đất	Đất sét yếu đến trung bình
Cường độ chống cắt không thoát nước, c_u	50 kPa
Mô đun biến dạng nền, E_s	25 MPa
Loại tà vẹt	Tà vẹt bê tông
Khoảng cách tà vẹt	0,60 m
Chiều dày đá ba lát giả định	0,30 m
Tuổi thọ thiết kế	60 năm

3.2. Kết quả tính toán

Chiều dày lớp kết cấu nền đường (bao gồm lớp đá ba lát và các lớp vật liệu hạt phía dưới) được tính toán riêng biệt theo từng quy trình với cùng bộ thông số đầu vào. Bảng 3 tổng hợp kết quả tính toán và tỷ lệ chênh lệch chiều dày so với giá trị lớn nhất.

Bảng 3. Chiều dày lớp kết cấu nền đường ray theo các phương pháp thiết kế.

Phương pháp thiết kế	Chiều dày lớp kết cấu nền đường ray, (h) (m)	Chênh lệch so với giá trị lớn nhất (%)
Li–Selig	1,20	0
UIC 719 R	0,85	29,2
British Rail	0,90	25,0
Network Rai	0,65	45,8

3.3. Thảo luận

Kết quả tính toán (Bảng 3) cho thấy sự sai khác đáng kể về chiều dày kết cấu nền đường (0,65 m ÷ 1,20 m) dù áp dụng cùng điều kiện đầu vào.

• Phương pháp Li–Selig cho chiều dày lớn nhất (1,20 m), cao hơn 41,2 % so với UIC 719R (0,85 m). Nguyên nhân do Li–Selig xét đến ảnh hưởng tích lũy của tải trọng giao thông động lặp lại theo thời gian, giúp phân bố lại ứng suất và hạn chế biến dạng dẻo trên nền đất sét yếu.

• UIC 719R (0,85 m) và British Rail (0,90 m) cho chiều dày tương đồng (chênh lệch chỉ 0,05 m). Mặc dù sử dụng hai hệ thống phân loại nền đất và tiêu chí thiết kế riêng, cả hai quy trình đều dẫn đến quy mô kết cấu tiệm cận nhau đối với cấp tải trọng và cường độ nền khảo sát.

• Phương pháp Network Rail cho chiều dày nhỏ nhất (0,65 m), thấp hơn 23,5 % so với UIC 719R. Sự chênh lệch này cho thấy việc áp dụng đơn lẻ một tiêu chuẩn kinh nghiệm có thể dẫn đến quy mô thiết kế biến động lớn. Đối với tuyến đường sắt tốc độ cao có tần suất tải lặp cao và yêu cầu khắt khe về độ lún dư, chiều dày thiết kế không nên chỉ dựa trên một phương pháp kinh nghiệm duy nhất mà cần kiểm chứng bằng mô hình số (FEM) kết hợp đánh giá độ lún tích lũy và ứng xử lâu dài của nền đất yếu.

4. Kết luận

Từ kết quả phân tích, so sánh bốn phương pháp thiết kế (Li–Selig, UIC 719R, British Rail và Network Rail) cho dự án Đường sắt tốc độ cao Bắc–Nam, một số kết luận chính được rút ra:

(1) Sự sai khác về quy mô kết cấu: Chiều dày lớp kết cấu nền đường tính toán biến thiên từ 0,65 m đến 1,20 m cho cùng bộ thông số đầu vào. Phương pháp Li–Selig cho kết quả an toàn nhất, Network Rail cho giá trị nhỏ nhất, còn UIC 719R và British Rail tiệm cận nhau.

(2) Cần phối hợp phân tích cơ học và tải trọng động: Việc xác định chiều dày không thể chỉ áp dụng đơn lẻ các công thức kinh nghiệm mà phải đánh giá đồng thời ứng suất, biến dạng dẻo tích lũy và khả năng chịu tải lặp dài hạn của nền đất dưới tác động của tàu tốc độ cao.

(3) Ứng dụng mô hình số kiểm chứng: Với điều kiện địa chất đất sét yếu phổ biến tại Việt Nam, kết quả tính toán chiều dày cần được kiểm tra, hiệu chỉnh bằng phương pháp phân tích số (mô hình tương tác Ray – Tà vẹt – Đá ba lát – Nền đường) kết hợp dữ liệu thí nghiệm nén ba trục lặp và quan trắc hiện trường.

(4) Hướng tới thiết kế theo vòng đời công trình (LCCA): Cần đánh giá độ ổn định nền đường theo toàn bộ chu kỳ khai thác, kiểm soát lún dư tích lũy, sự suy giảm độ cứng vật liệu và tích hợp hệ thống thoát nước phù hợp với điều kiện khí hậu nhiệt đới.

(5) Định hướng nghiên cứu tiếp theo: Cần xây dựng cơ sở dữ liệu thực nghiệm về vật liệu đá ba lát và đặc tính động của đất nền Việt Nam; từ đó từng bước hoàn thiện quy chuẩn kỹ thuật thiết kế nền đường sắt tốc độ cao phù hợp với điều kiện thực tế trong nước.

Tài liệu tham khảo

[1]. Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). *Track geotechnology and subgrade engineering*. Thomas Telford.

[2]. Li, D., & Selig, E. T. (1998). Method for railroad track foundation design. I: Development. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(4), 316-322.

[3]. Burrow, M. P. N., Chan, A. H. C., & Shein, A. (2007). Deflection-based railway trackbed design methods. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 160(1), 39-48.

[4]. Li, D., & Selig, E. T. (1998). Method for railroad track foundation design. II: Applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(4), 323-329.

[5]. Li, D., Thompson, R. W., & Kalay, S. (2002). *Subgrade design methods for railway track structures*. R&T Report, Association of American Railroads.

[6]. International Union of Railways (UIC). (1994). *UIC Code 719R: Earthworks and track-bed layers for railway lines*. UIC, Paris.

[7]. Heath, D. L., Shenton, M. J., Sparrow, R. W., & Waters, J. M. (1972). Design of conventional rail track foundations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 51(2), 251-267.

[8]. Network Rail. (2005). *NR/SB/TRK/9039: Formation treatments code of practice*. Network Rail Specification.

[9]. International Union of Railways (UIC). (2008). *UIC Code 719R: Earthworks and track-bed layers for railway lines* (3rd ed.). UIC, Paris.

[10]. Indraratna, B., Ngo, N. T., & Rujikiatkamjorn, C. (2020). Deformation and degradation mechanism of ballast under high-speed train loading. *Transportation Geotechnics*, 23, 100350.

[11]. Nguyen, Q. T., & Nguyen, P. N. (2022). Dynamic response of railway subgrade under high-speed cyclic train loads: A numerical study for North-South High-Speed Railway in Vietnam. *Journal of Construction and Materials*, 14(2), 45-52.

[12]. Powrie, W., & Le Pen, L. (2021). Subgrade stress distribution and settlement control in ballasted high-speed railways. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5), 1120-1132.

[13]. Bộ Giao thông vận tải. (2021). *Báo cáo nghiên cứu tiền khả thi Dự án Đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc - Nam*. Hà Nội.

[14]. Qian, J., Wang, Y., & Zhang, X. (2023). Long-term settlement prediction of soft subgrade under high-speed railway loading. *Computers and Geotechnics*, 155, 105210.

[15]. Zhai, W., Wang, K., & Cai, C. (2024). Fundamentals of vehicle-track-subgrade coupled dynamics for high-speed railways. *International Journal of Rail Transportation*, 12(1), 1-35.