

Ứng dụng mô hình số Plaxis 3D trong phân tích tải trọng động và xử lý nền đất cho đường sắt tốc độ cao tại Việt Nam

Nguyễn Văn Dũng, Hồ Quốc Bảo Quân
Nguyễn Ngọc Thanh

Application of Plaxis 3D
for dynamic response
analysis and soft ground
improvement of high-speed
railways in Vietnam

Tóm tắt

Đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC) là hệ thống vận tải hiện đại có tốc độ khai thác lớn, trong đó tải trọng động do đoàn tàu truyền xuống nền đường đóng vai trò quyết định đến độ ổn định và tuổi thọ công trình. Đối với Việt Nam, điều kiện địa chất dọc các tuyến dự kiến xây dựng ĐSTĐC rất phức tạp, với sự phân bố rộng rãi của các lớp đất yếu, có khả năng chịu tải hạn chế và dễ phát sinh biến dạng lớn dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và đặc biệt là tải trọng động lặp lại từ quá trình vận hành tàu tốc độ cao.

Nghiên cứu này tập trung khảo sát mô hình số bằng phần mềm Plaxis 3D trong phân tích ứng xử nền đất và đánh giá hiệu quả các giải pháp xử lý nền cho ĐSTĐC. Khác với các phương pháp tính toán truyền thống, mô hình số 3D cho phép mô phỏng đồng thời cấu trúc địa tầng, các giải pháp xử lý nền tập trung vào như cọc xi măng đất, trụ vật liệu hạt rời, quá trình truyền ứng suất, tương tác đất-kết cấu và tác động của tải trọng động theo thời gian do đoàn tàu gây ra. Thông qua đó, các chỉ tiêu quan trọng như chuyển vị, độ lún tích lũy của nền được xác định có độ tin cậy cao.

Từ khóa: Đường sắt tốc độ cao, Gia cố nền đất, Mô hình số, Tải trọng động, HS-Small

Abstract

High-speed railways (HSRs) are modern transportation systems operating at very high speeds, in which dynamic loads induced by passing trains play a critical role in determining the stability, serviceability, and long-term performance of the track substructure. In Vietnam, the geological conditions along the proposed HSR corridors are highly complex, with extensive deposits of soft soils characterized by low bearing capacity and high compressibility. These soils are particularly susceptible to excessive deformation under static loads and, more importantly, under repetitive dynamic loads generated by high-speed train operations.

This study investigates the application of three-dimensional numerical modeling using Plaxis 3D to analyze the dynamic behavior of subgrade soils and evaluate the effectiveness of ground improvement solutions for high-speed railway projects. Compared with conventional design approaches, the 3D numerical model enables the integrated simulation of geological stratification, ground improvement systems such as deep soil mixing columns and granular columns, stress transfer mechanisms, soil-structure interaction, and time-dependent dynamic loading induced by train traffic. Through the proposed model, key performance indicators, including displacement, cumulative settlement of the improved ground, can be evaluated with a higher level of reliability and accuracy.

Key words: High-speed railway; Ground improvement; Numerical modeling; Dynamic loading; HS-Small model

Nguyễn Văn Dũng, sinh viên chuyên ngành Xây dựng công trình ngầm đô thị, Khoa Xây Dựng, Trường Đại học Kiến Trúc Hà Nội
Email: vandunght0204@gmail.com; ĐT: 0394464971

Hồ Quốc Bảo Quân, sinh viên chuyên ngành Xây dựng công trình ngầm đô thị, Khoa Xây Dựng, Trường Đại học Kiến Trúc Hà Nội
Email: hoquan23434@gmail.com; ĐT: 0397690604

TS. Nguyễn Ngọc Thanh, Bộ môn Địa kỹ thuật & Công trình ngầm, Khoa Xây Dựng, Trường Đại học Kiến Trúc Hà Nội
Email: nnthanhxd@gmail.com; ĐT: 0943298808

Ngày hoàn thiện bài:
Ngày duyệt đăng: 09/03/2026

1. Đặt vấn đề

Đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC) là một trong những loại hình giao thông hiện đại có yêu cầu rất cao về chất lượng nền đường, đặc biệt đối với khả năng kiểm soát lún, dao động và ổn định lâu dài dưới tác động của tải trọng động do đoàn tàu gây ra. Theo kinh nghiệm phát triển ĐSTĐC của Nhật Bản, Pháp, Đức và đặc biệt là Trung Quốc, các sự cố liên quan đến biến dạng nền đường và dao động nền đất có thể ảnh hưởng trực tiếp đến độ an toàn, độ êm thuận chạy tàu và chi phí duy tu bảo dưỡng trong suốt vòng đời công trình [1], [2].

Các nghiên cứu quốc tế cho thấy tải trọng động từ tàu tốc độ cao tạo ra sự lan truyền sóng ứng suất trong nền đất, làm xuất hiện hiện tượng tích lũy biến dạng, suy giảm độ cứng và gia tăng độ lún theo thời gian [3]. Li và Selig [4] đã chỉ ra rằng độ cứng của nền đất là một trong những yếu tố quyết định đến độ lún dư của nền đường sắt. Trong khi đó, Krylov [5] chứng minh rằng khi tốc độ đoàn tàu tiến gần vận tốc lan truyền sóng Rayleigh trong đất nền, dao động có thể tăng đáng kể do hiện tượng vận tốc tới hạn, đặc biệt đối với nền đất yếu.

Sự phát triển của các phương pháp mô hình số đã mở ra khả năng nghiên cứu toàn diện hơn đối với bài toán địa kỹ thuật đường sắt tốc độ cao. Yang và cộng sự [6] đã xây dựng mô hình phần tử hữu hạn ba chiều để đánh giá tương tác động giữa đoàn tàu, kết cấu đường và nền đất. Zhang và cộng sự [7], Wang và cộng sự [8] đã ứng dụng Plaxis 3D để phân tích hiệu quả của các giải pháp xử lý nền đất yếu như cọc xi măng đất và các hệ cọc gia cố đối với nền đường ĐSTĐC. Gần đây, Sun và cộng sự [9] tiếp tục khẳng định hiệu quả của mô hình số 3D trong việc dự báo dao động và biến dạng của nền đất dưới tải trọng tàu cao tốc.

Đối với mô phỏng ứng xử động của nền đất, mô hình HS-Small do Benz phát triển [10] được đánh giá là một trong những mô hình vật liệu tiên tiến nhất hiện nay vì có khả năng xét đến độ cứng của đất trong miền biến dạng nhỏ, phù hợp với điều kiện làm việc thực tế của nền đường sắt tốc độ cao.

Tại Việt Nam, dự án ĐSTĐC Bắc - Nam đang được triển khai nghiên cứu và chuẩn bị đầu tư. Theo Phạm Kiến Quốc và Vương Đông Nguyên [2], kinh nghiệm xây dựng hơn 45.000 km đường sắt cao tốc tại Trung Quốc cho thấy công tác khảo sát địa chất, mô phỏng số và xử lý nền đất là những yếu tố quyết định đến sự thành công của dự án. Tuy nhiên, các nghiên cứu trong nước về ứng xử động của nền đất dưới tải trọng tàu tốc độ cao và ứng dụng mô hình số 3D trong thiết kế xử lý nền vẫn còn hạn chế. Do đó, việc nghiên cứu ứng dụng Plaxis 3D kết hợp mô hình HS-Small để phân tích ứng xử động và đánh giá hiệu quả các giải pháp gia cố nền đất cho ĐSTĐC trong điều kiện địa chất Việt Nam là cần thiết, góp phần bổ sung cơ sở khoa học phục vụ công tác thiết kế và xây dựng các tuyến ĐSTĐC trong tương lai.

Nghiên cứu này tập trung xây dựng mô hình số ba chiều bằng phần mềm Plaxis 3D để phân tích ứng xử động của nền đường sắt tốc độ cao trên nền đất yếu trong điều kiện địa chất

Việt Nam. Điểm mới của nghiên cứu là đánh giá đồng thời ảnh hưởng của tải trọng động đoàn tàu tốc độ cao đến chuyển vị nền đất, chuyển vị ray đối với các phương án xử lý nền bằng cọc xi măng đất (CDM) và trụ đá đầm chặt (TĐĐC). Kết quả nghiên cứu cho phép so sánh định lượng hiệu quả của từng giải pháp gia cố theo các chỉ tiêu động lực học và biến dạng, làm cơ sở cho việc lựa chọn giải pháp xử lý nền phù hợp cho đường sắt tốc độ cao tại Việt Nam.

2. Các giải pháp gia cố nền đất thường dùng cho đường sắt tốc độ cao

Nền đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC) chịu tác động liên tục của tải trọng động lặp lại từ đoàn tàu, do đó yêu cầu rất cao về khả năng chịu tải, kiểm soát lún dư, lún lệch và dao động nền đường. Theo kinh nghiệm xây dựng ĐSTĐC tại Nhật Bản, châu Âu và Trung Quốc, độ lún sau xây dựng thường được khống chế ở mức vài centimet trong suốt thời gian khai thác nhằm đảm bảo độ bằng phẳng tuyến và an toàn vận hành [1], [2].

Đối với các khu vực đất yếu, trụ đá đầm chặt và cọc xi măng đất là hai giải pháp được áp dụng phổ biến nhất hiện nay.

Trụ đá đầm chặt hoạt động theo cơ chế thay thế một phần đất yếu bằng vật liệu hạt có độ cứng cao, đồng thời tạo các đường thoát nước thẳng đứng giúp tăng tốc độ cố kết. Các nghiên cứu cho thấy giải pháp này có thể làm tăng mô đun biến dạng nền từ 2–5 lần và giảm độ lún khoảng 40–60% so với nền tự nhiên [3], [4]. Ngoài ra, trụ đá còn góp phần tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng và giảm dao động nền đất dưới tác động của tải trọng động [5]. Tuy nhiên, hiệu quả của giải pháp giảm đáng kể khi áp dụng cho các lớp bùn sét rất mềm do nguy cơ phá hoại phình ngang của trụ [6].

Cọc xi măng đất là giải pháp gia cố bằng công nghệ trộn sâu, tạo thành các phần tử bán cứng có khả năng tiếp nhận phần lớn tải trọng từ nền đắp và đoàn tàu. Nhiều nghiên cứu trên các tuyến ĐSTĐC của Trung Quốc cho thấy cọc xi măng đất có thể làm giảm độ lún từ 60–80%, tăng đáng kể độ cứng động của nền và giảm 35–50% biên độ dao động dưới tải trọng tàu tốc độ cao [7], [8]. Bên cạnh đó, giải pháp này đặc biệt hiệu quả đối với các lớp đất yếu dày và yêu cầu kiểm soát biến dạng nghiêm ngặt.

Nhìn chung, trụ đá đầm chặt phù hợp với các khu vực đất yếu có chiều dày và mức độ yếu trung bình, trong khi cọc xi măng đất là giải pháp ưu tiên đối với nền đất rất yếu hoặc các đoạn tuyến ĐSTĐC có yêu cầu cao về kiểm soát lún và ứng xử động. Việc lựa chọn giải pháp cần được đánh giá thông qua mô hình số 3D có xét đến tải trọng động và điều kiện địa chất cụ

thể của từng khu vực.

3. Mô hình số sử dụng Plaxis 3D trong khảo sát bài toán đường sắt tốc độ cao

Phương pháp phần tử hữu hạn ba chiều được sử dụng rộng rãi trong phân tích nền đường sắt tốc độ cao do cho phép mô phỏng đồng thời tương tác đất-kết cấu, hiệu ứng không gian của hệ gia cố và sự lan truyền ứng suất dưới tải trọng động. Trong nghiên cứu này, nền đất được mô hình hóa bằng các phần tử khối ba chiều, trong khi cọc xi măng đất và trụ đá được mô phỏng bằng các phần tử thể tích (Volume Pile) nhằm phản ánh chính xác cơ chế phân bố tải trọng trong hệ nền composite.

3.1. Mô hình đất nền gia cố

Mô hình nền đường sắt tốc độ cao được xây dựng theo mặt cắt điển hình gồm ray, tà vẹt, lớp đá ballast, lớp sub-ballast, nền đắp và nền đất tự nhiên. Lớp ballast được bố trí với chiều dày 0,35 m, bên dưới là lớp sub-ballast dày 0,30 m. Chiều rộng đỉnh nền đường được lựa chọn là 9,4 m, phù hợp với mặt cắt nền đường đôi của đường sắt tốc độ cao. Mô hình khối đất tính toán có chiều rộng 38 m, chiều dài 38 m, hai mặt bên và đáy mô hình được gán điều kiện biên hấp thụ dao động (Viscous Boundaries) nhằm mô phỏng môi trường bán vô hạn và hạn chế phản xạ sóng động trở lại miền tính toán.

Mô hình HS-Small được lựa chọn để mô phỏng nền đất dưới tải trọng động do có khả năng xét sự thay đổi độ cứng theo ứng suất và biến dạng. Với các tham số G₀ và $\gamma_{0.7}$, mô hình cho phép mô tả hiệu quả ứng xử biến dạng nhỏ và sự lan truyền dao động trong nền đất. Theo Benz (2007), HS-Small đặc biệt phù hợp cho các bài toán đường sắt tốc độ cao, nơi nền đất chủ yếu làm việc trong miền biến dạng nhỏ [10]. So sánh cho thấy mô hình HS-Small là mô hình phù hợp nhất để mô tả đất nền dưới tác dụng của tải trọng động và tải trọng lặp của đường sắt tốc độ cao để xem xét biến dạng và cường độ của hệ nền đã được gia cố. Giả thiết địa nền đất trong phạm vi khảo sát gồm các lớp như sau: (i) Lớp 1: Đất sét dẻo chảy, có sức chịu tải yếu; (ii) Lớp 2: Đất sét dẻo cứng, có sức chịu tải trung bình yếu; (iii) Lớp 3: Đất cát chặt, có sức chịu tải tốt.

Các lớp đất này được khai báo bằng mô hình HS-Small với chi tiết thông số tại Bảng 1. Cọc xi măng đất được mô hình bằng vật liệu đàn hồi tuyến tính do phần lớn làm việc trong miền biến dạng nhỏ dưới tải trọng khai thác với thông số đề cập tại Bảng 2. Trụ đá đầm chặt được mô hình bằng Mohr-Coulomb với điều kiện thoát nước hoàn toàn nhằm phản ánh đúng cơ chế ma sát và biến dạng của vật liệu hạt với thông số theo Bảng 3.

Bảng 1. Tính chất cơ lý của các lớp đất

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Lớp đất		
			Đất sét dẻo chảy	Đất sét dẻo cứng	Đất cát chặt
Mô hình vật liệu	-	-	HS-Small	HS-Small	HS-Small
Điều kiện thoát nước	-	-	Undrained A	Undrained A	Drained
Trọng lượng riêng tự nhiên	γ_{sat}	kN/m ³	16.6	20.1	19
Trọng lượng riêng bão hòa	γ_{unsat}	kN/m ³	17.7	20.1	20
Mô-đun biến dạng cát tuyến tham chiếu	E_{50}^{ref}	kN/m ²	4000	9000	29900
Mô-đun oedometer tham chiếu	E_{oed}^{ref}	kN/m ²	4000	9000	29900
Mô-đun Young tham chiếu	E_{ur}^{ref}	kN/m ²	12000	27000	89700
Lực dính hữu hiệu	c'	kN/m ²	15	10	5
Góc ma sát trong	φ'	°	26	25	40
Góc giãn nở	ψ	°	0	0	10

3.2. Mô phỏng tải trọng đoàn tàu tốc độ cao

3.2.1. Ảnh hưởng của tải trọng động lên nền đường gia cố

Theo EN 1991-2 mục 6.3, tải trọng của đoàn tàu có thể được quy đổi thành tải trọng tĩnh tương đương theo mô hình tải 71 thông qua hệ số động lực học [11]:

$$P_d = \phi P_0 \quad (1)$$

trong đó: P_d là tải trọng động tương đương; ϕ là hệ số động lực học; P_0 là tải trọng trục tĩnh.

Tuy nhiên, theo mục 6.4 tiêu chuẩn EN 1991-2, khi vận tốc đoàn tàu lớn hơn 200km/h, tải trọng động được mô hình hóa bằng HSLM.

Tải trọng động thường được biểu diễn dưới dạng tải trọng điều hòa theo thời gian:

$$P(t) = P_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \sin \omega t) \quad (2)$$

trong đó: $P(t)$ là tải trọng động tại thời điểm t ; P_0 là tải trọng trục tĩnh của đoàn tàu; α là hệ số tải trọng động; ω là tần số góc dao động; t là thời gian.

Tần số góc dao động phụ thuộc vào tốc độ đoàn tàu và khoảng cách giữa các trục bánh xe, được xác định theo công thức:

$$\omega = 2\pi \frac{v}{L} \quad (3)$$

trong đó: v là vận tốc đoàn tàu; L là khoảng cách đặc trưng giữa các trục bánh xe hoặc bước tải trọng.

Khi vận tốc tàu tăng, tần số tải trọng động tăng theo, làm gia tăng dao động và chuyển vị trong nền đất yếu. Đặc biệt, nếu tần số kích động của tải trọng gần với tần số dao động riêng của nền đất, hiện tượng cộng hưởng có thể xảy ra và làm biên độ chuyển vị tăng mạnh.

Tổng tải trọng tác dụng lên nền đường sắt tốc độ cao được xác định bằng tổng tải trọng tĩnh và tải trọng động:

$$q = q_s + q_d \quad (4)$$

trong đó: q là tải trọng tổng cộng tác dụng lên nền; q_s là tải trọng tĩnh nền đắp; q_d là tải trọng động do đoàn tàu gây ra.

Tải trọng tổng cộng này sẽ truyền xuống hệ nền gia cố và được phân phối giữa cọc và đất nền theo tỷ lệ độ cứng tương đối của từng thành phần. Trong nền gia cố bằng cọc, phần lớn tải trọng động sẽ tập trung vào cọc do cọc có mô đun biến dạng lớn hơn đất yếu. Tuy nhiên, đất nền giữa các cọc vẫn chịu dao động ứng suất và xuất hiện biến dạng động tích lũy theo thời gian khai thác.

a) Xác định tỷ lệ phân bố tải trọng giữa cọc và đất

Trong nền gia cố bằng cọc, tải trọng từ công trình được phân chia giữa cọc và đất nền theo độ cứng và khả năng biến dạng của hệ composite [12]. Do cọc có độ cứng lớn hơn đất yếu nên tiếp nhận phần lớn tải trọng, trong khi đất giữa các cọc chịu phần tải còn lại và tham gia duy trì ổn định nền. Vì vậy, việc xác định tỷ lệ phân bố tải trọng giữa cọc và đất có ý nghĩa quan trọng trong thiết kế nền đường sắt tốc độ cao. Tỷ lệ phân bố tải trọng thường được biểu diễn thông qua hệ số tập trung ứng suất hay tỷ số chia tải giữa cọc và đất:

$$a_c = \frac{A_p}{A} \quad (5)$$

trong đó: n là hệ số tập trung ứng suất; σ_p là ứng suất trung bình tác dụng lên đầu cọc; σ_s là ứng suất tác dụng lên đất giữa các cọc.

Giá trị n phản ánh mức độ tập trung tải trọng vào cọc. Nếu n càng lớn thì tải trọng truyền vào cọc càng nhiều và đất nền chịu tải càng ít. Trong thực tế nền gia cố, giá trị này thường dao động từ 2 đến 10 tùy thuộc vào loại cọc, khoảng cách cọc, độ cứng cọc và đặc trưng cơ lý của đất nền.

Để xác định tải trọng phân bố giữa cọc và đất, trước hết cần xác định tỷ lệ diện tích thay thế cọc trong nền gia cố. Tỷ lệ diện tích thay thế được xác định theo công thức:

$$a_c = \frac{A_p}{A} \quad (6)$$

trong đó: a_c là tỷ lệ diện tích thay thế; A_p là tổng diện tích tiết diện cọc trong phạm vi xét; A là tổng diện tích nền composite.

Đối với sơ đồ bố trí cọc hình vuông với khoảng cách cọc s và đường kính cọc d , tỷ lệ thay thế được tính:

$$a_c = \frac{\pi d^2}{4s^2} \quad (7)$$

Trong trường hợp bố trí tam giác đều:

$$a_c = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}s^2} \quad (8)$$

Dưới tác dụng của tải trọng động lặp, mô đun biến dạng của đất nền có xu hướng suy giảm, làm tăng mức độ tập trung ứng suất vào cọc và thay đổi cơ chế làm việc của hệ nền composite theo thời gian khai thác.

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{a_c + (1 - a_c) \frac{M_d}{M_c}} \quad (9)$$

Bảng 2. Bảng thông số cọc CDM

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Cọc CDM
Đường kính	d	m	0.8
Mô hình vật liệu	-	-	Linear Elastic
Điều kiện thoát nước	-	-	Undrained A
Trọng lượng riêng tự nhiên	γ_{sat}	kN/m ³	16
Trọng lượng riêng bão hòa	γ_{unsat}	kN/m ³	16
Mô-đun đàn hồi	E'_{ref}	kN/m ²	35000

Bảng 3. Bảng thông số trụ đá đầm chặt

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Trụ đá đầm chặt
Đường kính	d	m	0.8
Mô hình vật liệu	-	-	Mohr Coulomb
Điều kiện thoát nước	-	-	Drained
Trọng lượng riêng tự nhiên	γ_{sat}	kN/m ³	19
Trọng lượng riêng bão hòa	γ_{unsat}	kN/m ³	19
Mô-đun đàn hồi	E'_{ref}	kN/m ²	50000
Lực dính hữu hiệu	c'	kN/m ²	1
Góc ma sát trong	φ'	°	40
Góc giãn nở	ψ	°	10

trong đó: M_c là môđun nén của cọc; M_d là môđun nén của đất nền; σ là ứng suất trung bình dưới đáy móng.

Biểu thức này cho thấy khi môđun đất nền giảm dưới tác động tải trọng động, tỷ số M_d/M_c giảm và ứng suất trong cọc tăng lên. Điều đó chứng minh rằng tải trọng động làm gia tăng mức độ tập trung ứng suất vào cọc và làm thay đổi cơ chế phân bố tải trọng trong hệ nền gia cố theo thời gian khai thác công trình.

b). Xác định độ lún của nền gia cố

Theo lý thuyết đàn hồi tuyến tính, biến dạng dọc trục của vật liệu chịu nén được xác định dựa trên quan hệ ứng suất–biến dạng:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{M_d} \quad (10)$$

trong đó: ε là biến dạng dọc trục; σ là ứng suất tác dụng; E là môđun đàn hồi hoặc môđun biến dạng của vật liệu.

Đối với đất nền giữa các cọc, biến dạng chịu ảnh hưởng mạnh bởi tính nén lún và khả năng cố kết của đất yếu. Nếu coi đất làm việc trong miền biến dạng tuyến tính, biến dạng của đất nền được xác định theo:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{M_d} \quad (11)$$

trong đó: ε_s là biến dạng của đất nền; σ_s là ứng suất tác dụng lên đất giữa các cọc; M_d là môđun nén biến dạng của đất.

Từ biến dạng dọc trục, độ lún của lớp đất có chiều dày H được xác định:

$$S_s = \varepsilon_s H = \frac{\sigma_s H}{M_d} \quad (12)$$

Trong thực tế nền đường sắt cao tốc, tải trọng động lặp của đoàn tàu có thể làm giảm dần môđun biến dạng của đất yếu do tích lũy biến dạng dẻo và gia tăng áp lực nước lỗ rỗng, từ đó làm tăng biến dạng và chuyển vị nền theo thời gian khai thác. Đối với cọc gia cố, do vật liệu cọc có độ cứng lớn hơn nhiều so với đất nền nên biến dạng của cọc thường nhỏ hơn đáng kể, biến dạng dọc trục của cọc được xác định:

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} \quad (13)$$

3.2.2. Mô hình tải trọng động

Trong thiết kế gia cố nền đường sắt cao tốc (ĐSCT), tải trọng trục và tốc độ vận hành là hai tham số cốt lõi quyết định mức độ khuếch đại động lực học của tải trọng. Theo tiêu chuẩn Eurocode EN 1991-2, tải trọng động do tàu cao tốc được mô hình hóa bằng High Speed Load Model (HSLM) thay vì chỉ sử dụng Load Model 71 (LM71) thông thường, đặc biệt khi tốc độ khai thác vượt quá 200 km/h [11].

a) Tần số cưỡng bức

Theo EN 1991-2, tần số cưỡng bức f do tàu di chuyển được xác định bởi công thức cơ bản:

$$f = \frac{v}{L} \quad (14)$$

trong đó: v là tốc độ tàu (m/s); L là khoảng cách đặc trưng giữa các trục bánh xe (2–3 m), giá chuyển hướng (5–7 m) hoặc toa tàu (10–27 m).

Hiện tượng cộng hưởng xảy ra khi f tiệm cận với tần số tự nhiên n_0 (hoặc n_T – tần số xoắn) của cầu. Tốc độ cộng hưởng v_r

được tính toán qua bước sóng λ :

$$v_r = n \cdot \lambda \quad (15)$$

b) Phổ tần số của tải trọng động:

Thay vì sử dụng trực tiếp hàm Power Spectral Density (PSD) phức tạp, EN 1991-2 [11] tiếp cận dải phổ kích động thông qua phương pháp mô phỏng bao hình. Tiêu chuẩn bắt buộc thực hiện phân tích động lực học theo thời gian bằng mô hình HSLM-A/B cho các dải vận tốc thiết kế $v > 200$ km/h, quét đến giới hạn $1,2 \times v_{\text{design}}$. Phương pháp này đảm bảo nhận diện chính xác mọi dải tần số có khả năng gây cộng hưởng, với tần số ngưỡng tích được giới hạn ở mức lớn nhất giữa 30 Hz, $1,5f_0$, hoặc tần số dao động mode thứ 3.

c) Chu kỳ tải trọng động

Chu kỳ tải trọng động được xác định dựa trên lưu lượng khai thác thiết kế 25×10^6 tấn/năm/tuyến và vòng đời công trình 100 năm. Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng tích lũy của tải trọng lặp được xem xét thông qua nguyên lý Palmgren–Miner. Để mô phỏng tải trọng đoàn tàu, một đoàn tàu điển hình gồm 8–16 toa xe với tổng số 32–64 trục được giả thiết. Khoảng cách giữa các trục trong giá chuyển hướng $d = 2,5 \div 3,5$ m. Khoảng cách giữa các giá chuyển hướng $D = 11 \div 27$ m. Phân bố tải trọng lực điểm tại mỗi trục được phân tán dọc theo ray trên ba điểm tà vẹt và lan truyền ngang qua ballast trước khi đến nền đất.

Tải trọng trục 220 kN được lựa chọn dựa trên các đoàn tàu cao tốc hiện đại đang khai thác trên thế giới như Shinkansen (Nhật Bản), TGV (Pháp), ICE (Đức) và CR400AF (Trung Quốc), trong đó tải trọng trục thường dao động trong khoảng 170–220 kN. Giá trị 220 kN được lựa chọn nhằm xét đến trường hợp bất lợi và đảm bảo an toàn trong thiết kế.

Vận tốc khai thác 350 km/h được lựa chọn theo định hướng phát triển tuyến đường sắt tốc độ cao Bắc – Nam và phù hợp với vận tốc thiết kế của nhiều tuyến đường sắt cao tốc hiện đại trên thế giới.

Bảng 4. Thông số mô tả tải trọng động đoàn tàu

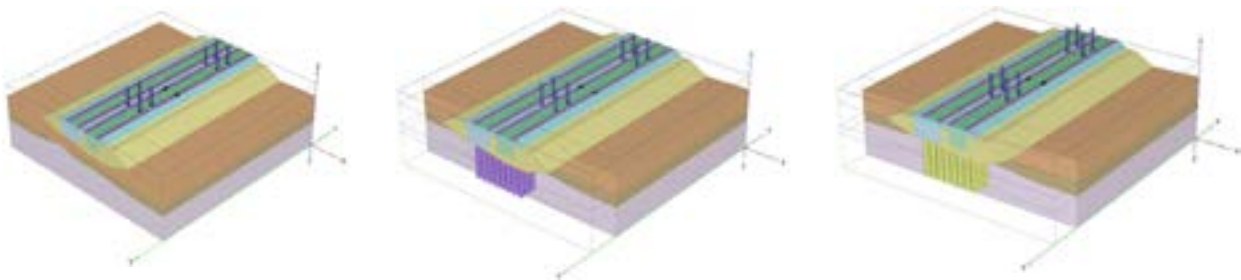
Hạng mục	Giá trị
Tải trên mỗi bánh	110kN/bánh
Tốc độ tàu chạy	97m/s $\approx$ 350km/h
Kiểu phase động	Dynamic
Hàm chuyển động	Linear
Thời gian tính	1.4s
Bước thời gian tính	0.0028s

Các mô hình xử lý nền được xây dựng trên cùng một điều kiện địa tầng, kích thước miền tính toán, chiều cao nền đắp và điều kiện biên. Tải trọng động đoàn tàu được giữ nguyên cho tất cả các trường hợp nhằm đảm bảo việc so sánh chỉ phản ánh ảnh hưởng của giải pháp gia cố nền. Các thông số thay đổi giữa các mô hình chỉ bao gồm loại cọc gia cố và khoảng cách bố trí cọc.

3.3. Các trường hợp nghiên cứu

Trên cơ sở mô hình nền không gia cố đã được thiết lập ở mục 3.2, các phương án xử lý nền bằng cọc CDM và TĐĐC được xây dựng với cùng điều kiện tải trọng và hình học mô hình để đánh giá mức độ cải thiện về chuyển vị và đáp ứng động của hệ nền.

Nghiên cứu xem xét hai giải pháp xử lý nền gồm cọc xi măng đất (CDM) và trụ đá đầm chặt (TĐĐC). Các phần tử gia cố đều có đường kính 0,8 m và chiều dài 7 m. Mục tiêu là đánh giá ảnh hưởng của khoảng cách bố trí cọc đến khả năng kiểm

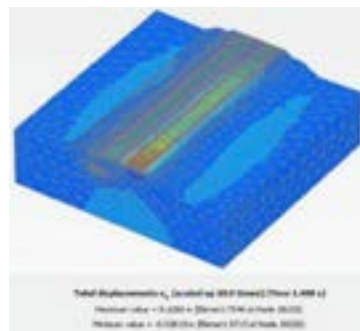


a) Nền chưa được gia cố

b) Nền gia cố bằng CDM

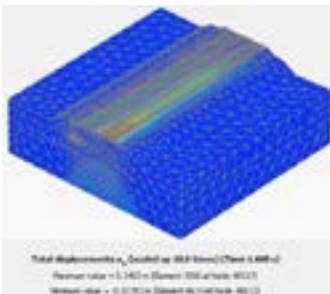
c) Nền gia cố bằng TDDC

Hình 1. Khảo sát các mô hình nghiên cứu

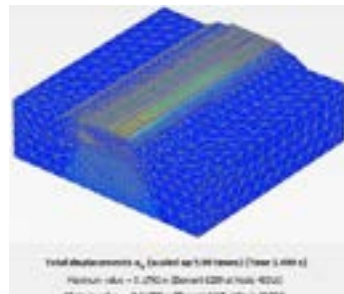


Hình 2. Chuyển vị dọc trục của mô hình nền chưa được gia cố

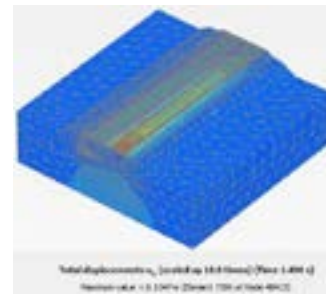
Nền không được gia cố có chuyển vị lớn nhất, đạt 26.15 mm, trong khi tất cả các phương án gia cố đều làm giảm chuyển vị xuống dưới giá trị này. Điều đó cho thấy việc bổ sung các phần tử gia cố đã làm tăng độ cứng của hệ nền composite, cải thiện khả năng phân bố tải trọng và hạn chế biến dạng của nền đất yếu.



a) Khoảng cách các cọc là 1.2m



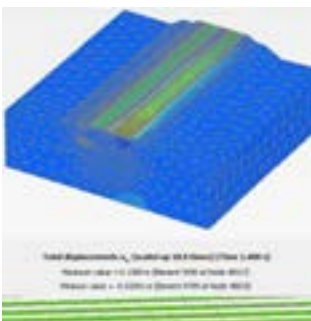
b) Khoảng cách các cọc là 1.4m



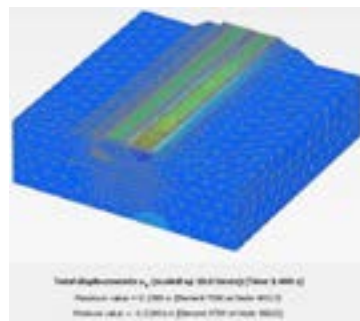
c) Khoảng cách các cọc là 2m

Hình 3. Chuyển vị dọc trục của mô hình nền được gia cố bằng cọc CDM

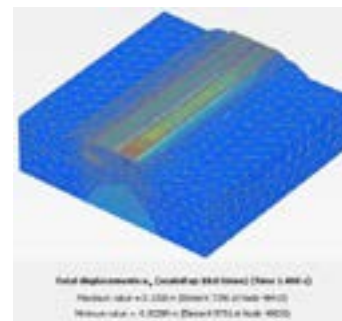
Đối với giải pháp cọc CDM, chuyển vị dọc trục giảm từ 26.15 mm xuống còn 17.92 mm khi khoảng cách cọc là 1.2 m và 17.95 mm khi khoảng cách cọc là 1.4 m. Sự chênh lệch giữa hai trường hợp này chỉ khoảng 0.03 mm, tương đương chưa đến 0.2%, cho thấy hiệu quả gia cố của hai phương án gần như tương đương. Tuy nhiên, khi khoảng cách cọc tăng lên 2.0 m, chuyển vị tăng lên 21.38 mm, tức tăng khoảng 19% so với trường hợp khoảng cách 1.2 m. Kết quả này phản ánh rõ ảnh hưởng của mật độ cọc đến khả năng làm việc của nền. Khi khoảng cách cọc tăng, tỷ lệ thay thế diện tích giảm, tải trọng truyền xuống đất yếu giữa các cọc nhiều hơn, làm giảm hiệu quả của cơ chế vòm ứng suất và dẫn đến biến dạng lớn hơn.



a) Khoảng cách các cọc là 1.2m



b) Khoảng cách các cọc là 1.4m



c) Khoảng cách các cọc là 2m

Hình 4. Chuyển vị dọc trục của mô hình nền được gia cố bằng TDDC

Đối với giải pháp trụ đá đầm chặt, xu hướng tương tự cũng được ghi nhận. Chuyển vị của nền lần lượt là 20.38 mm, 20.91 mm và 22.89 mm tương ứng với khoảng cách cọc 1.2 m, 1.4 m và 2.0 m. Khi khoảng cách giữa các trụ tăng lên, hiệu quả gia cố giảm dần do diện tích gia cố giảm và khả năng phân phối tải trọng của hệ nền composite suy giảm. Tuy nhiên, mức độ giảm hiệu quả của trụ đá đầm chặt diễn ra tương đối từ từ, phản ánh cơ chế làm việc chủ yếu dựa vào việc gia tăng độ chặt và cải thiện sức kháng cắt của đất nền xung quanh.

Bảng 5. Khả năng giảm lún của các giải pháp so với nền chưa gia cố

Trường hợp	Chuyển vị dọc trục (mm)	Giảm biến dạng so với nền chưa gia cố (%)
Không gia cố	26.15	0
CDM có khoảng cách là 1.2 m	17.92	31.5
CDM có khoảng cách là 1.4 m	17.95	31.4
CDM có khoảng cách là 2 m	21.38	18.2
Trụ đá đầm chặt có khoảng cách là 1.2 m	20.38	22.1
Trụ đá đầm chặt có khoảng cách là 1.4 m	20.91	20.0
Trụ đá đầm chặt có khoảng cách là 2 m	22.89	12.5

soát biến dạng của nền đường sắt tốc độ cao. Nghiên cứu xem xét bảy trường hợp gồm một mô hình nền không gia cố, ba mô hình gia cố bằng cọc CDM với khoảng cách 1,2 m; 1,4 m và 2,0 m, cùng ba mô hình gia cố bằng TĐĐC với các khoảng cách tương ứng.

4. Kết quả và thảo luận

Kết quả mô phỏng bằng PLAXIS 3D cho thấy việc gia cố nền đất yếu bằng cọc CDM và trụ đá đầm đầm chặt đều có tác dụng làm giảm đáng kể chuyển vị dọc trục của nền dưới tác dụng tải trọng.

So sánh giữa hai giải pháp gia cố cho thấy cọc CDM cho thấy cọc CDM luôn cho hiệu quả giảm chuyển vị tốt hơn trụ đá đầm đầm chặt tại cùng khoảng cách bố trí. Cụ thể, tại khoảng cách 1,2 m, chuyển vị của nền gia cố bằng CDM đạt 17.92 mm, thấp hơn so với 20.38 mm của trụ đá đầm đầm chặt. Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận tại các khoảng cách 1,4 m và 2,0 m. Điều này xuất phát từ độ cứng và cường độ của cọc CDM lớn hơn, giúp tiếp nhận phần lớn tải trọng và giảm ứng suất truyền xuống đất yếu.

Xét về mặt kinh tế – kỹ thuật, khoảng cách 1,4 m được đánh giá là phương án hợp lý cho cả hai giải pháp do vẫn đảm bảo hiệu quả gia cố trong khi giảm khối lượng thi công. Ngược

lại, khoảng cách 2,0 m cho hiệu quả xử lý nền giảm rõ rệt và khó đáp ứng yêu cầu kiểm soát biến dạng của đường sắt tốc độ cao.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã ứng dụng mô hình phần tử hữu hạn ba chiều trong phần mềm Plaxis 3D kết hợp mô hình đất nền HS-Small để phân tích ứng xử động của nền đường sắt tốc độ cao trên nền đất yếu và đánh giá hiệu quả của các giải pháp gia cố nền. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình HS-Small mô tả hợp lý ứng xử của nền đất dưới tải trọng động tàu cao tốc, đặc biệt đối với các bài toán có biến dạng nhỏ và dao động lặp lại. Phương pháp mô hình số 3D cho phép đánh giá đồng thời chuyển vị, ứng suất và gia tốc dao động trong hệ nền–cọc với độ tin cậy cao hơn so với các phương pháp tính toán truyền thống.

Kết quả nghiên cứu cho thấy cả hai giải pháp gia cố nền bằng CDM hay bằng trụ vật liệu hạt rời đều cải thiện đáng kể khả năng làm việc của nền đất yếu, nhưng cọc CDM mang lại hiệu quả giảm chuyển vị cao hơn so với trụ đá đầm đầm chặt. Đồng thời, khoảng cách bố trí cọc có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả gia cố, trong đó khoảng cách 1.4 m ($D = 0,8m$) là phương án tối ưu xét trên cả khía cạnh kỹ thuật và kinh tế đối với các trường hợp khảo sát./.

Tài liệu tham khảo

1. China State Railway Group, China High-Speed Railway Development Report. Beijing, China Railway Publishing House, 2023.
2. Phạm Kiến Quốc, Vương Đông Nguyên, Công nghệ xây dựng đường sắt cao tốc Trung Quốc. Hà Nội: Nhà xuất bản Xây dựng, 2025.
3. L. Yang, W. Powrie, and J. A. Priest, Dynamic stress analysis of a ballasted railway track bed during train passage, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 5, 2009.
4. D. Li and E. T. Selig, "Method for railroad track foundation design. I: Development," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 124, no. 4, pp. 316–322, 1998.
5. V. V. Krylov, *Noise and Vibration from High-Speed Trains*. London: Thomas Telford Publishing, 2001.
6. P. Galvín, A. Romero, and J. Domínguez, Fully three-dimensional analysis of high-speed train–track–soil–structure dynamic interaction. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, No. 24, 2010.
7. S. Zhou, Y. Shan, Z. Wu, W. Zhao, L. Yang, and Y. Lin, Lateral deformation of high-speed railway foundation induced by adjacent embankment construction in soft soils: Numerical and field study, *Transportation Geotechnics*, 2023.
8. Q. Fu, H.-L. Liu, X.-M. Ding, and C.-J. Zheng, Numerical investigation of piled raft foundation in mitigating embankment vibrations induced by high-speed trains, *Journal of Central South University*, 2015.
9. G. Gao, J. Bi, Q. Chen, and R. Chen, "Analysis of ground vibrations induced by high-speed train moving on pile-supported subgrade using three-dimensional FEM," *Journal of Central South University*, Vol. 27, No. 8, 2020.
10. T. Benz, Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences. PhD Thesis, University of Stuttgart, Germany, 2007.
11. EN 1991-2: Eurocode 1 – Traffic Loads on Bridges.
12. Han, J., and Ye, S.L. Simplified method for consolidation rate of stone column reinforced foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001.
13. PLAXIS 3D Reference Manual.