



INVESTIGATION OF VEHICLE SPEED EFFECTS ON EMBANKMENT BEHAVIOR ON SOFT SOIL

Nguyen Van Du¹, Nguyen Van Hung², Pham Ngoc Bay¹

¹Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications, No. 450-451 Le Van Viet Street, Tang Nhon Phu Ward, Ho Chi Minh City, Vietnam

²University of Transport and Communications, No. 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 02/02/2026

Revised: 25/03/2026

Accepted: 13/04/2026

Published online: 15/04/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.3.4>

* *Corresponding author*

Email: dunv_ph@utc.edu.vn; Tel: +84903994008

Abstract: Road subgrade construction on soft ground presents a high potential for instability because of complicated geotechnical conditions and traffic-induced loads. This study investigates the effect of vehicle speed on the stability of road subgrades on soft soil using numerical simulations with Plaxis and GeoStudio. The study section was selected along National Highway 53 in Vinh Long Province, Vietnam. Analytical results show that as vehicle speed increases from 20 to 120 km/h under repeated traffic loading, the vibration velocity and acceleration of the subgrade increase significantly, leading to a reduction in the stability factor from 1.339 to 1.113 (a decrease of approximately 16.9%). Moreover, larger subgrade settlements are observed at low speeds, whereas the settlement gradually decreases with increasing vehicle speed. These findings confirm that vehicle speed is a critical factor affecting the stability performance of road subgrades on soft soil. The study recommends incorporating the effects of dynamic loading and vehicle speed into road subgrade design procedures in Vietnam to ensure structural safety and long-term durability under actual operating conditions.

Keywords: load, vehicle speed, soft soil, embankment stability.

@ 2026 University of Transport and Communications



NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA TỐC ĐỘ XE CHẠY ĐẾN ỨNG XỬ CỦA NỀN ĐƯỜNG TRÊN ĐẤT YẾU

Nguyễn Văn Du¹, Nguyễn Văn Hùng², Phạm Ngọc Bảy¹

¹Phân hiệu tại Tp. Hồ Chí Minh, Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 450-451 Lê Văn Việt, phường Tăng Nhơn Phú, Tp. Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 02/02/2026

Ngày nhận bài sửa: 25/03/2026

Ngày chấp nhận đăng: 13/04/2026

Ngày xuất bản Online: 15/04/2026

<https://doi.org/10.47869/tcsj.77.3.4>

* Tác giả liên hệ

Email: dunv_ph@utc.edu.vn; Tel: +84903994008

Tóm tắt: Nền đường xây dựng trên đất yếu thường đối mặt với nguy cơ mất ổn định do đặc điểm địa chất phức tạp và tác động của tải trọng từ phương tiện giao thông. Nghiên cứu này phân tích ảnh hưởng của tốc độ xe chạy đến đặc trưng dao động và trạng thái ổn định của nền đường thông qua mô phỏng số với phần mềm Plaxis 3D và GeoStudio. Đoạn tuyến nghiên cứu được lựa chọn trên Quốc lộ 53, tỉnh Vĩnh Long. Từ việc tính toán, phân tích cho thấy khi tốc độ xe tăng từ 20 lên 120 km/h kết hợp với tải trọng lặp, vận tốc và gia tốc dao động của nền đường tăng, khi đó hệ số ổn định giảm từ 1,339 xuống 1,113 (tương ứng giảm khoảng 16,9%). Ngoài ra, ở tốc độ thấp, biến dạng của nền đường lớn, nhưng khi tốc độ tăng thì biến dạng giảm. Các kết quả khẳng định tốc độ xe chạy là yếu tố có ảnh hưởng đáng kể đến sự ổn định của nền đường trên đất yếu. Nghiên cứu kiến nghị cần xem xét bổ sung tác động của tải trọng động và tốc độ xe vào tiêu chuẩn thiết kế nền đường ô tô tại Việt Nam nhằm đảm bảo an toàn và độ bền công trình trong điều kiện khai thác thực tế.

Từ khóa: tải trọng, tốc độ xe chạy, đất yếu, ổn định nền đường.

@ 2026 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong kết cấu đường áo đường ô tô, nền đường đóng vai trò trung gian tiếp nhận và phân bố ứng suất từ kết cấu áo đường xuống nền đất tự nhiên. Khả năng làm việc của nền đường ảnh hưởng trực tiếp đến tuổi thọ khai thác, độ bằng phẳng mặt đường và khả năng chịu tải lâu dài [1-4]. Đối với khu vực nền đất yếu, các đặc trưng như cường độ thấp, độ biến dạng lớn và khả

năng tích nước cao làm gia tăng nguy cơ mất ổn định trong quá trình sử dụng. Khi thiết kế nền đường trên đất yếu, số xe nặng được xếp tối đa trên toàn bộ bề rộng nền đường trong cùng một lúc được xem là tải trọng xe sử dụng trong tính toán (TCCS 41:2022/TCĐBVN) [5]. Như vậy, trong các tiêu chuẩn hiện hành, bài toán tính lún không xét tải trọng xe tối đa xếp kín bên trên và khi tính ổn định đã xét tải trọng xe nhưng quy đổi thành tĩnh tải (lớp đất đắp tương đương) và chưa có khuyến nghị việc tính đến tác động động từ các phương tiện giao thông.

Khi xe chạy, tải trọng làm gia tăng tác dụng xuống nền đường, tăng nguy cơ gây mất ổn định, đặc biệt là trong trường hợp xây dựng nền đường ở khu vực địa chất yếu, đắp nền đường cao, thời gian thi công kéo dài, các phương tiện, máy móc thi công di chuyển nhiều nên cần phải xét đến ảnh hưởng của tải trọng xe chạy xuống nền đường [1, 6-13].

Bên cạnh các vấn đề về ổn định tổng thể, dưới tác dụng của tải trọng xe chạy, nền đường đắp trên đất yếu còn bộc lộ nhiều đặc điểm phức tạp cần được xem xét bao gồm các vấn đề sau:

- Đối với các vùng có đất yếu phân bố rộng khắp, tải trọng nền đường thường rất nhạy cảm với hiện tượng lún lệch. Khác với nền đắp cao, ở các nền đắp thấp, tải trọng giao thông có ảnh hưởng trực tiếp đến nền đất phía dưới, làm tăng nguy cơ phá hoại kết cấu mặt đường và gây rung động lan truyền sang địa chất xung quanh [10, 14].

- Sự gia tăng biến dạng do tải trọng lặp: Khi tải trọng động lặp tác dụng xuống nền đường, độ lún nền đường sau thi công có thể tăng lên đáng kể so với trường hợp tải trọng tĩnh. Mức độ gia tăng này phụ thuộc chặt chẽ vào biên độ tải trọng, bản chất của đất yếu và đặc tính động học của nguồn lực. Các nghiên cứu cho thấy tải trọng của phương tiện giao thông truyền xuống bề mặt nền đường có thể được mô phỏng dưới dạng xung áp lực nửa hình sin [6, 10, 15].

- Mối liên hệ giữa tốc độ xe và thời gian tác dụng: Tốc độ xe chạy tỉ lệ nghịch với thời gian tác dụng của tải trọng lên một điểm trên bề mặt nền. Ví dụ, khi tốc độ tăng từ 40 km/h lên 100 km/h, thời gian tác dụng của bánh xe giảm từ khoảng 0,72 giây xuống còn 0,29 giây. Điều đó làm ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình cố kết của đất nền đường và áp lực nước lỗ rỗng dư của đất dưới tác dụng của tải trọng lặp [14].

- Trong quá trình khai thác khi tốc độ xe chạy cao, sự tương tác giữa tần số của tải trọng và tần số dao động riêng của hệ nền đường vẫn là yếu tố then chốt gây ra hiện tượng khuếch đại dao động và suy giảm hệ số ổn định [6, 8, 10-15].

Như vậy, việc xem xét đồng thời ảnh hưởng của vận tốc phương tiện - yếu tố chi phối thời gian tác dụng của tải trọng, cùng với đặc trưng tần số của tải trọng động là cần thiết nhằm đánh giá một cách đầy đủ cả độ lún lâu dài và độ ổn định của nền đường trên đất yếu, đặc biệt đối với các tuyến đường đắp trong điều kiện địa chất phức tạp. Trong nghiên cứu này, tập trung phân tích ảnh hưởng của tốc độ xe chạy đến độ ổn định nền đường trên đất yếu bằng phương pháp mô phỏng số (kết hợp phần mềm Plaxis 3D và GeoStudio).

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Cơ sở lý thuyết theo các tiêu chuẩn hiện hành tại Việt Nam

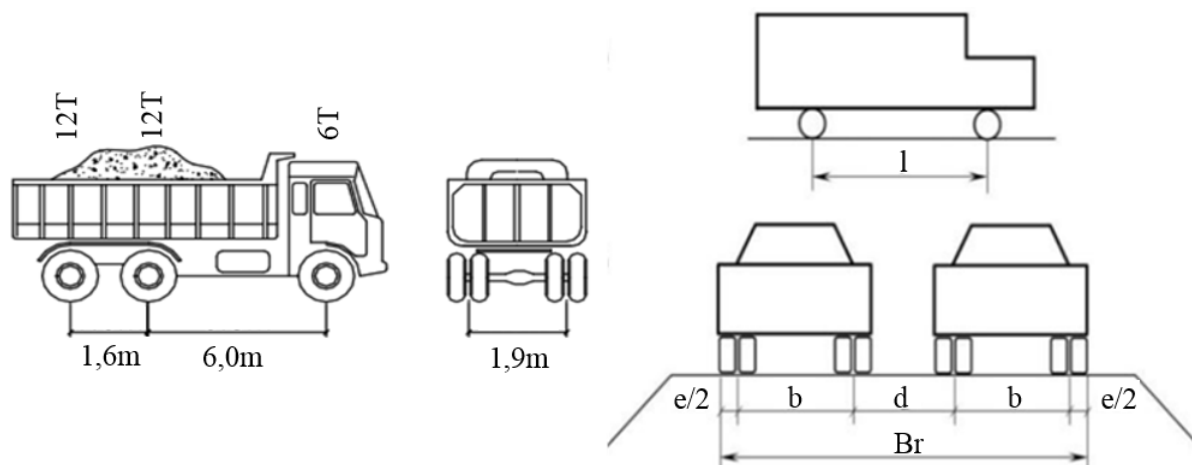
Theo tiêu chuẩn hiện hành TCCS 41:2022/TCĐBVN [5]:

- Trong giai đoạn thi công, khi đánh giá ổn định của nền đắp cần xét đến tải trọng gồm: trọng lượng bản thân nền đắp đã kể đến phần bù lún, đất đắp gia tải (nếu áp dụng) và tác động của phương tiện thi công. Trong giai đoạn khai thác, bài toán kiểm tra ổn định phải được thực hiện với sự tham gia của tải trọng nền đường sau bù lún, kết cấu áo đường, tải trọng xe lưu

thông và ảnh hưởng của động đất.

- Trong bài toán dự báo lún, tải trọng được xem xét là tải trọng tĩnh của hệ nền - mặt đường theo phương án thiết kế, bao gồm phân đắp bù lún và bề phản áp (nếu có). Các thành phần tải trọng mang tính tạm thời như gia tải trước và tải trọng xe không được đưa vào tính toán.

- Tải trọng xe được quy đổi từ số xe nặng tối đa phân bố trên toàn bề rộng nền đường trong 1 m chiều dài, dưới dạng tải trọng phân bố đều tương đương lớp đất.



Hình 1. Tải trọng xe tính toán, sơ đồ xếp xe để xác định tải trọng trong tính toán [5].

Hiện nay, các tiêu chuẩn thiết kế trong nước chưa xem xét đầy đủ ảnh hưởng của tải trọng động trong nền đất, bao gồm sự lan truyền, suy giảm và tác động đến các tham số cơ học của đất như lực dính đơn vị c và góc nội ma sát φ . Đồng thời, các yếu tố như tốc độ xe, thời gian tác dụng tải trọng, ảnh hưởng đến kết cấu mặt đường và dao động môi trường, cũng như tương tác giữa tần số kích thích và tần số riêng của nền đường vẫn chưa được tính đến.

2.2. Mô hình các lớp đất và mô phỏng tải trọng xe chạy trong phần mềm Plaxis 3D

Trong phân tích phân tử hữu hạn, ứng xử của đất nền được mô tả thông qua các mô hình vật liệu khác nhau, trong đó mô hình Mohr-Coulomb (đàn hồi tuyến tính - dẻo lý tưởng) được sử dụng phổ biến trong Plaxis 3D [16]. Mô hình này được đặc trưng bởi năm tham số cơ bản, bao gồm các tham số về độ cứng và cường độ, được xác định từ các thí nghiệm địa kỹ thuật tiêu chuẩn. Các tham số độ cứng có thể biểu diễn dưới dạng mô đun đàn hồi hiệu dụng và hệ số Poisson, hoặc thông qua các đại lượng tương đương như mô đun trượt và mô đun nén một chiều, với mối quan hệ được thiết lập theo lý thuyết đàn hồi tuyến tính. Trong phân tích động, việc sử dụng vận tốc sóng dọc và sóng cắt cho phép mô tả đầy đủ hơn đặc trưng đáp ứng của đất dưới tác dụng của tải trọng biến thiên theo thời gian.

Vận tốc sóng dọc V_p trong điều kiện nén một chiều được xác định là hàm của mô đun nén một chiều E_{oed} và khối lượng riêng của đất ρ , theo biểu thức:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}} \quad (1)$$

$$E_{oed} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{\gamma_{unsat}}{g}; g=9,81\text{m/s}^2 \quad (3)$$

Trong bài toán nén một chiều, vận tốc sóng cắt V_s được xác định như một hàm của mô đun trượt G và khối lượng riêng của đất, phản ánh đặc trưng lan truyền dao động trong môi trường đàn hồi.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}; \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

Ứng xử động phụ thuộc thời gian của hệ chịu tải trọng biến thiên được mô tả dựa trên các nguyên lý động lực học và được mô hình hóa trong các phần mềm phần tử hữu hạn, điển hình như Plaxis và GeoStudio [16, 17]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (5)$$

Trong đó:

M - ma trận khối lượng;

C - ma trận giảm chấn động;

K - ma trận độ cứng;

F - vectơ tải trọng;

u, \dot{u}, \ddot{u} - lần lượt là chuyển vị, vận tốc và gia tốc.

Hai hạng tử $Ku = F$ biểu diễn biến dạng tĩnh.

Trong phân tích động, ma trận khối lượng thường được lý tưởng hóa dưới dạng tập trung nhằm giảm độ phức tạp tính toán. Ma trận giảm chấn động C được biểu diễn theo mô hình Rayleigh, là hàm tuyến tính của ma trận khối lượng và ma trận độ cứng của hệ.

$$C = \alpha_R M + \beta_R K \quad (6)$$

Hệ số α_R chi phối cản dao động tần số thấp, còn β_R chi phối cản dao động tần số cao. Ở chế độ mặc định, $\alpha_R = \beta_R = 0$.

Phương pháp tích phân theo thời gian có vai trò quyết định trong phân tích động. Phương pháp Newmark ngầm định được sử dụng phổ biến để xác định chuyển vị và vận tốc tại thời điểm $t+\Delta t$ được xác định bởi:

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \dot{u}_t \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \alpha\right) \ddot{u}_t \Delta t^2 + \alpha \ddot{u}_{t+\Delta t} \Delta t^2 \quad (7)$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \ddot{u}_t \Delta t + \beta \ddot{u}_{t+\Delta t} \Delta t \quad (8)$$

Trong đó:

Δt - bước thời gian;

α, β là hệ số xác định độ chính xác của tích phân (không trùng với hệ số Rayleigh damping). Để đảm bảo ổn định, cần thỏa mãn điều kiện:

$$\beta \geq \frac{1}{2}, \alpha \geq \frac{1}{4}(0.5 + \beta)^2$$

Thiết lập mặc định trong Plaxis sử dụng sơ đồ Newmark với $\alpha = 0,25$ và $\beta = 0,5$ (phương pháp gia tốc trung bình).

Theo Kramer (1996) [16], tần số dao động riêng của một lớp đất được tính toán dựa trên mối quan hệ được thể hiện trong công thức sau:

$$f_n = \frac{V_s}{4H} (1 + 2n) \quad (9)$$

Trong đó:

f_n - tần số dao động riêng thứ n của lớp đất, tính bằng Hz, với $n = 0, 1, 2, \dots$;

V_s - vận tốc dao động của đất;

H - chiều dày lớp đất.

Trong Plaxis 3D, tải trọng xe chạy được xác định bởi một đường đi và một hàm chuyển động. Hàm chuyển động được áp dụng trên đường xác định trước và có thể tác dụng cho cả phần tĩnh và phần động của tải trọng điểm hoặc tải trọng đường [16].

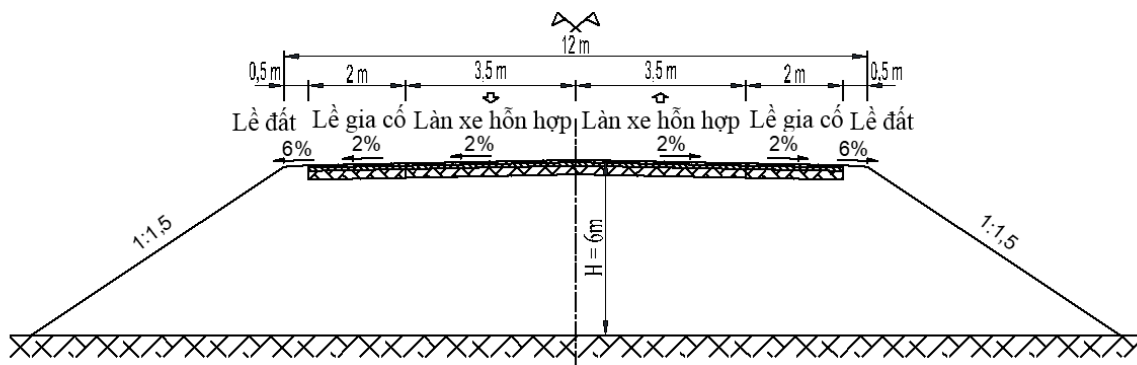
Trong Plaxis, vận tốc xe chạy được định nghĩa thông qua hàm chuyển động theo biểu thức [16]:

$$V = V_0 + A \sin(\omega t) \quad (10)$$

Trong đó: V_0 là vận tốc ban đầu; A : là biên độ của hàm chuyển động; $\omega = 2\pi f$, với f là tần số (đơn vị Hz).

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phương pháp nghiên cứu được xây dựng trên cơ sở mô phỏng số nhằm đánh giá ảnh hưởng của tốc độ xe đến các đặc trưng động học và ổn định của nền đường. Các phân tích được thực hiện bằng cách kết hợp phần mềm Plaxis 3D với mô-đun QUAKE/W trong GeoStudio. Đoạn tuyến khảo sát nằm tại khu vực đầu cầu Bung Trường 2, Quốc lộ 53, tỉnh Vĩnh Long [18]. Mặt cắt tính toán có chiều rộng nền đường 12 m, chiều rộng mặt đường (bao gồm lề gia cố) 11 m. Chiều cao đất đắp tính cho 2 trường hợp $H_{\text{đắp}} = 2$ m và $H_{\text{đắp}} = 6$ m, với vật liệu đắp là đất cát pha, lớp đất nền bên dưới là đất sét, có chiều dày 6 m.



Hình 2. Mặt cắt tính toán điển hình.

Trong đó, Plaxis 3D được sử dụng để mô phỏng và xác định các đặc trưng động học của nền đường. Kết quả phân tích vận tốc, gia tốc từ phần mềm Plaxis 3D sẽ được nhập vào phần mềm GeoStudio (QUAKE/W) và sử dụng để đánh giá ổn định trong điều kiện động xét đến ảnh hưởng của vận tốc xe.

- Các kịch bản tốc độ xe được xem xét với vận tốc thay đổi từ 20 km/h đến 120 km/h như trong Bảng 1. Đối với phân tích tải trọng động khai báo cố định vận tốc ban đầu V_0 ; tần số $f =$

0 Hz vì giả định vận tốc xe không thay đổi trong một lần phân tích.

Bảng 1. Vận tốc và thời gian tính toán.

TT	Vận tốc (km/h)	Vận tốc (m/s)	Chiều dài mô hình Plaxis 3D (m)	Thời gian xe chạy hết chiều dài mô hình (giây)
1	20	5,56	20	3,59712
2	40	11,11	20	1,80018
3	60	16,67	20	1,19976
4	80	22,22	20	0,90009
5	120	33,33	20	0,60006

Dữ liệu đầu vào cho nền đắp (cát pha) và đất nền yếu (sét) được thu thập từ kết quả khảo sát, thí nghiệm thuộc dự án Quốc lộ 53. Lớp đất yếu là đất sét ở trạng thái bão hòa, và theo phương án thiết kế ban đầu, với chiều cao đắp từ 2-6 m, nền đường không đáp ứng yêu cầu về độ lún và ổn định. Vì vậy, giải pháp xử lý nền bằng trụ đất - xi măng đã được lựa chọn. Trong nghiên cứu này, để phản ánh điều kiện làm việc thực tế trong giai đoạn khai thác có xét đến ảnh hưởng của tốc độ xe, các thông số của nền đất ban đầu không được sử dụng. Thay vào đó, mô hình tính toán sử dụng các thông số của nền đất sau gia cố bằng trụ đất - xi măng [18]. Các tham số cơ lý phục vụ cho mô hình Mohr-Coulomb trong Plaxis 3D được tổng hợp trong Bảng 2, trong đó một số tham số như hệ số Poisson, vận tốc sóng cắt và sóng dọc được xác định dựa trên hướng dẫn của phần mềm và các nghiên cứu liên quan.

Bảng 2. Thông số các lớp đất khai báo trong Plaxis 3D.

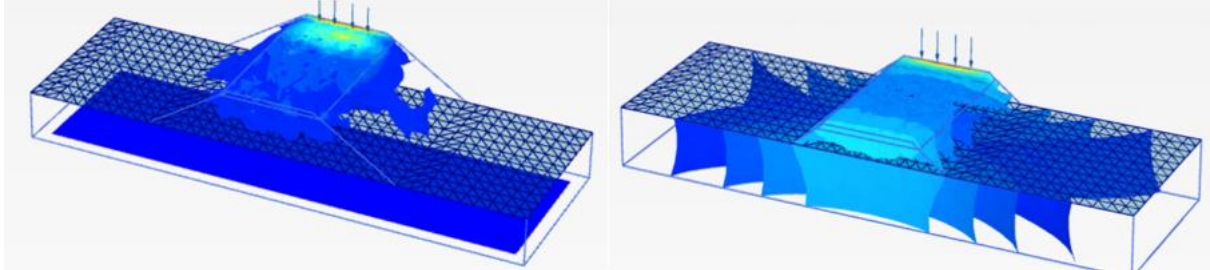
Nhóm thông số	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Lớp đất	
				1	2
Nhận dạng vật liệu	Loại đất	-	-	Cát pha (Nền đắp)	Đất sét (nền đất bên dưới)
	Mô hình đất	-	-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
	Điều kiện thoát nước	-	-	Drained	Drained
Trọng lượng thể tích	Trạng thái khô	γ_{unsat}	kN/m ³	19	19
	Trạng thái bão hòa	γ_{sat}	kN/m ³	20	20
Độ cứng đàn hồi	Mô đun đàn hồi tham chiếu	E'_{ref}	kN/m ²	25×10^3	35×10^3
	Hệ số Poisson	ν	-	0,3	0,3
Thông số tương đương	Mô đun trượt	G_{ref}	kN/m ²	9615	$13,46 \times 10^3$
	Mô đun đàn hồi	E_{oed}	kN/m ²	$33,65 \times 10^3$	$47,12 \times 10^3$
Tham số sức chống cắt	Lực dính	C_{ref}	kN/m ²	10	5
	Góc nội ma sát	ϕ	Độ	25	20
Vận tốc sóng đàn hồi	Sóng cắt	V_s	m/s	70,46	83,37
	Sóng dọc	V_p	m/s	131,8	156

4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN, PHÂN TÍCH

Các kịch bản vận tốc xe được lựa chọn theo Bảng 1. Gia tốc dao động trong nền đường, do

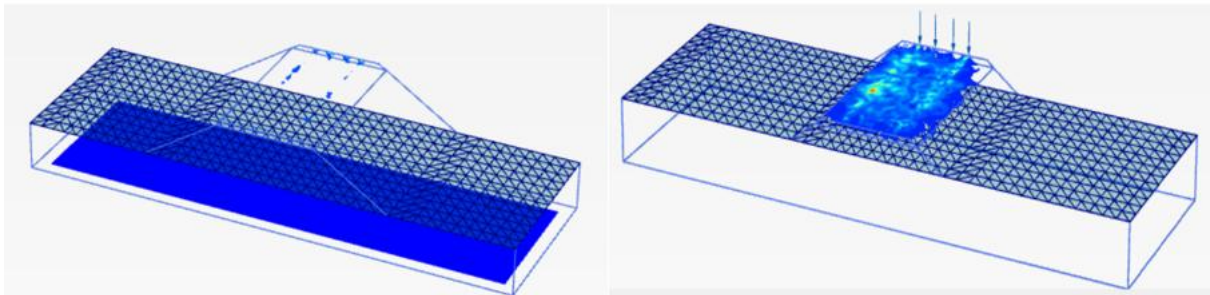
ảnh hưởng của tải trọng di động và vận tốc phương tiện, được tính toán theo biểu thức (5). Giá trị gia tốc được ghi nhận tại hai vị trí quan trọng là đỉnh nền đắp và chân nền đắp.

Kết quả cho thấy vận tốc và gia tốc dao động của nền thay đổi theo tốc độ xe (Hình 3 - đại diện).



Vận tốc dao động của nền đường với $H_{\text{đắp}} = 6\text{m}$,
 $V = 120\text{km/h}$

Vận tốc dao động của nền đường với $H_{\text{đắp}} = 2\text{m}$,
 $V = 20\text{km/h}$

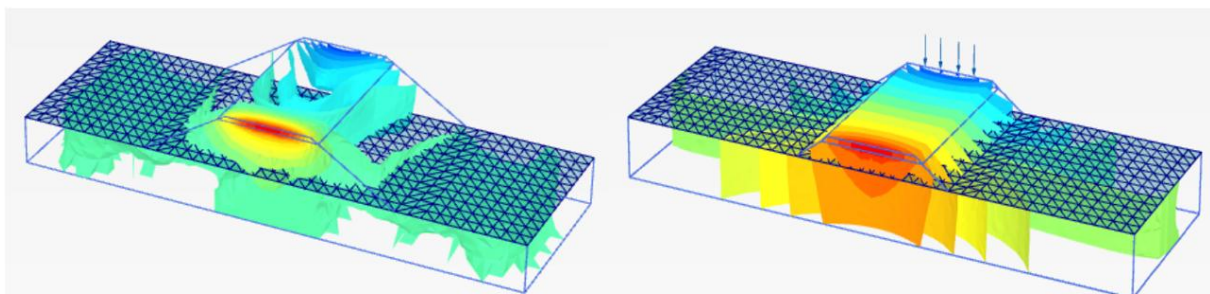


Gia tốc dao động của nền đường với $H_{\text{đắp}} = 6\text{m}$,
 $V = 120\text{km/h}$

Gia tốc dao động của nền đường với $H_{\text{đắp}} = 2\text{m}$,
 $V = 20\text{km/h}$

Hình 3. Vận tốc, gia tốc dao động của nền đường với tốc độ xe chạy khác nhau (điển hình).

Xác định biến dạng của nền đường với tốc độ xe chạy khác nhau (Hình 4 - đại diện):

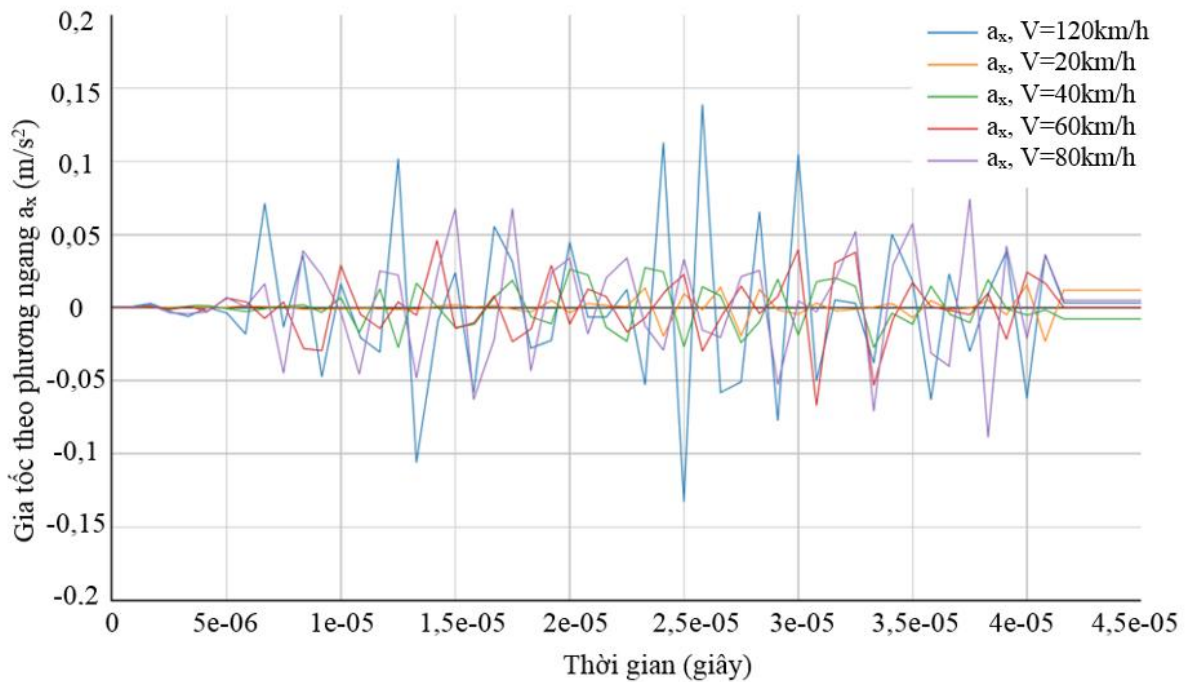


Biến dạng của nền đường với $H_{\text{đắp}} = 6\text{m}$,
 $V = 120\text{km/h}$

Biến dạng của nền đường với $H_{\text{đắp}} = 2\text{m}$,
 $V = 20\text{km/h}$

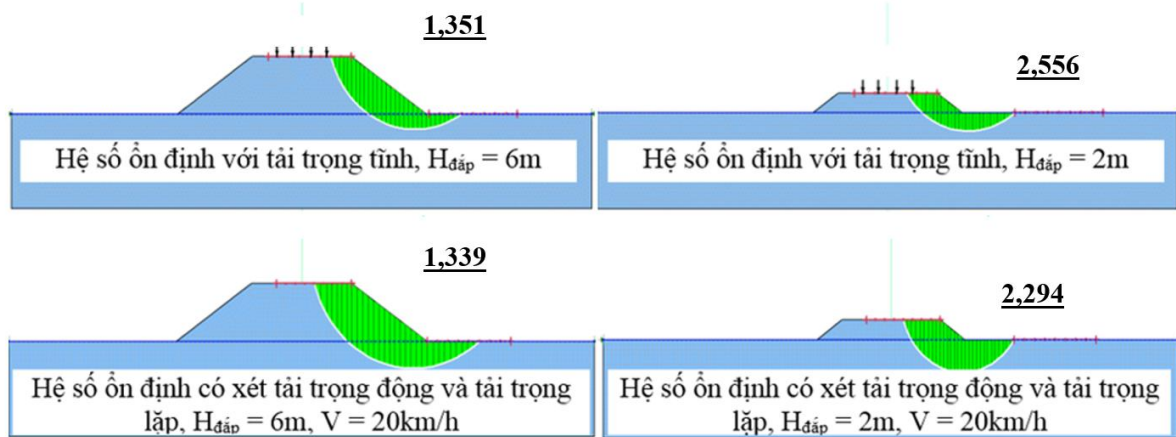
Hình 4. Biến dạng của nền đường với tốc độ xe chạy khác nhau.

Tích hợp số liệu từ Plaxis 3D 2024.2 vào GeoStudio 2025.1 và phân tích hệ số ổn định của nền đường với các tốc độ xe chạy: Tích hợp thông số xét đến sự suy giảm ứng suất cắt trong đất, gia tốc theo phương ngang (a_x), gia tốc theo phương dọc (a_z) ứng với các tốc độ 20, 40, 60, 80, 120 km/h (Hình 5 - đại diện).



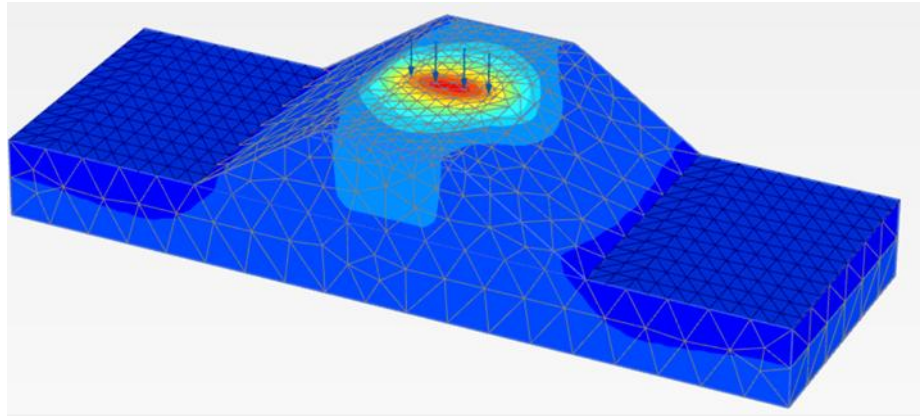
Hình 5. Biểu đồ gia tốc theo phương ngang a_x ứng với các vận tốc 20, 40, 60, 80, 120 km/h.

Xác định hệ số ổn định tổng thể của nền đường với các tốc độ khác nhau có xét đến tải trọng lặp, số liệu tải trọng lặp tham khảo từ thư viện của phần mềm GeoStudio vì chưa có điều kiện thí nghiệm, kết quả phân tích được thể hiện trên Hình 6.



Hình 6. Phân tích hệ số ổn định tổng thể của nền đường dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và ở các tốc độ khác nhau có xét đến tải trọng lặp (điển hình với $V = 20\text{km/h}$).

Xác định biến dạng của nền đường dưới tác dụng của tải trọng tĩnh (Hình 7).

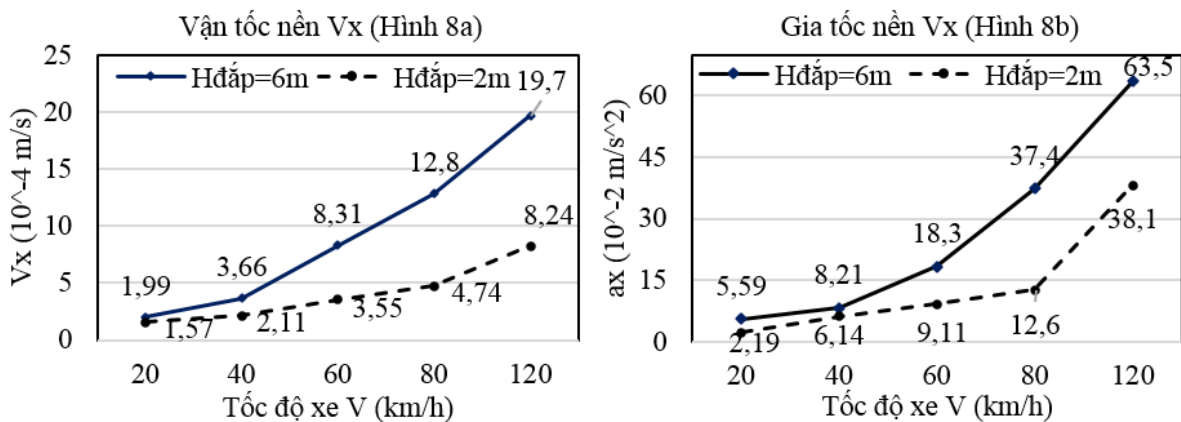


Hình 7. Biểu dạng với tải trọng tĩnh $U_z = 10,70$.

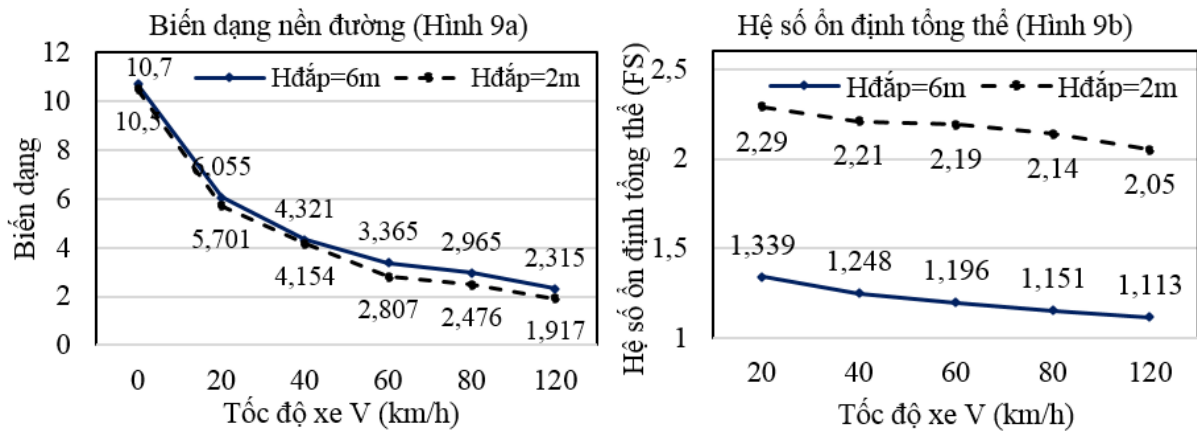
Các kết quả tính toán được tổng hợp trong Bảng 3 và Hình 8, 9.

Bảng 3. Tổng hợp kết quả phân tích ảnh hưởng của tốc độ xe chạy đến nền đường.

TT	Vận tốc (km/h)	Vận tốc nền V_x do tải trọng di động ($10^{-4}m/s$)		Gia tốc nền a_x do tải trọng di động ($10^{-2}m/s^2$)		Biến dạng		Hệ số ổn định tổng thể (có xét đến tải trọng lặp)	
		$H_{\text{đắp}} = 6m$	$H_{\text{đắp}} = 2m$	$H_{\text{đắp}} = 6m$	$H_{\text{đắp}} = 2m$	$H_{\text{đắp}} = 6m$	$H_{\text{đắp}} = 2m$	$H_{\text{đắp}} = 6m$	$H_{\text{đắp}} = 2m$
1	0					10,7	10,5		
2	20	1,99	1,57	5,59	2,19	6,055	5,701	1,339	2,29
3	40	3,66	2,11	8,21	6,14	4,321	4,154	1,248	2,21
4	60	8,31	3,55	18,30	9,11	3,365	2,807	1,196	2,19
5	80	12,80	4,74	37,40	12,60	2,965	2,476	1,151	2,14
6	120	19,70	8,24	63,50	38,10	2,315	1,917	1,113	2,05



Hình 8. Tổng hợp kết quả phân tích vận tốc nền (Hình 8a), gia tốc dao động của nền đường (Hình 8b) với tốc độ xe chạy khác nhau cho hai trường hợp nền đắp thấp (2 m) và nền đắp cao (6 m)



Hình 9. Tổng hợp kết quả phân tích biến dạng (Hình 9a), hệ số ổn định tổng thể (Hình 9b) với tốc độ xe chạy khác nhau cho hai trường hợp nền đắp thấp (2 m) và nền đắp cao (6 m).

Từ kết quả mô phỏng Hình 8 và Hình 9, cho thấy:

- **Vận tốc nền (V_x) do tải trọng di động gây ra:**

Dựa trên bảng số liệu tính toán, vận tốc nền theo phương ngang (V_x) do tải trọng di động gây ra tăng rõ rệt khi vận tốc tăng trong cả hai trường hợp $H = 6\text{ m}$ và $H = 2\text{ m}$. Đối với trường hợp $H = 6\text{ m}$, giá trị V_x tăng từ $1,99 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ tại vận tốc 20 km/h lên $19,70 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ tại 120 km/h. Trong khi đó, với $H = 2\text{ m}$, V_x tăng từ $1,57 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ lên $8,24 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ trong cùng dải vận tốc. So sánh tại cùng một vận tốc cho thấy vận tốc nền V_x của trường hợp $H = 6\text{ m}$ luôn lớn hơn trường hợp $H = 2\text{ m}$, với mức chênh lệch dao động khoảng từ 1,3 đến trên 2 lần tùy theo vận tốc tải trọng. Cụ thể, tại 60 km/h, V_x tương ứng là $8,31 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ ($H = 6\text{ m}$) so với $3,55 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ ($H = 2\text{ m}$); tại 120 km/h, các giá trị này lần lượt là $19,70 \times 10^{-4}\text{ m/s}$ và $8,24 \times 10^{-4}\text{ m/s}$. Kết quả trên cho thấy chiều cao đắp có ảnh hưởng rõ rệt đến mức độ dao động của nền dưới tác dụng tải trọng di động, trong đó khối đắp cao hơn làm gia tăng vận tốc dao động nền và phản ánh xu hướng khuếch đại phản ứng động của hệ nền - đắp. Trong phân tích hệ số ổn định tổng thể công trình, thành phần dao động theo phương ngang (V_x) có ý nghĩa quan trọng, vì nó trực tiếp tác động đến sự dịch chuyển ngang, trượt hoặc sạt lở của mái dốc. Do đó, khi đánh giá ổn định tổng thể của công trình, cần tập trung phân tích tác động của dao động ngang để đảm bảo an toàn lâu dài cho nền đường và kết cấu bên trên.

- **Gia tốc dao động của nền đường (a_x):**

Gia tốc dao động của nền đường theo phương ngang (a_x) tăng rõ rệt khi vận tốc tăng trong cả hai trường hợp chiều cao đắp $H = 6\text{ m}$ và $H = 2\text{ m}$. Đối với trường hợp $H = 6\text{ m}$, giá trị gia tốc nền a_x tăng từ $5,59 \times 10^{-2}\text{ m/s}^2$ tại vận tốc 20 km/h lên $63,50 \times 10^{-2}\text{ m/s}^2$ tại 120 km/h, cho thấy mức gia tăng mạnh của phản ứng động nền khi tốc độ tải trọng tăng. Trong khi đó, với $H = 2\text{ m}$, gia tốc nền a_x cũng tăng theo vận tốc tải trọng, từ $2,19 \times 10^{-2}\text{ m/s}^2$ tại 20 km/h lên $38,10 \times 10^{-2}\text{ m/s}^2$ tại 120 km/h, tuy nhiên các giá trị này luôn nhỏ hơn so với trường hợp $H = 6\text{ m}$ tại cùng một vận tốc. So sánh giữa hai chiều cao đắp cho thấy gia tốc dao động của nền đường trong trường hợp $H = 6\text{ m}$ lớn hơn đáng kể so với $H = 2\text{ m}$, với mức chênh lệch phổ biến từ khoảng 1,5 đến gần 3 lần tùy theo vận tốc tải. Điều này phản ánh ảnh hưởng rõ rệt của chiều cao khối đắp đến khả năng khuếch đại gia tốc dao động của nền đường dưới tác dụng của tải trọng di động.

- **Biến dạng của nền đường:**

Biến dạng của nền đường có xu hướng giảm khi vận tốc tăng trong cả hai trường hợp chiều cao đắp $H = 6$ m và $H = 2$ m. Ở trường hợp $H = 6$ m, biến dạng giảm từ 6,055 tại 20 km/h xuống 2,315 tại 120 km/h. Tương tự, với $H = 2$ m, biến dạng giảm từ 5,701 xuống 1,917 trong cùng dải vận tốc. So sánh giữa hai chiều cao đắp tại cùng một vận tốc cho thấy biến dạng của nền đường ở trường hợp $H = 6$ m luôn lớn hơn trường hợp $H = 2$ m, tuy nhiên mức chênh lệch không quá lớn. Điền hình tại 60 km/h, biến dạng lần lượt là 3,365 ($H = 6$ m) và 2,807 ($H = 2$ m); tại 120 km/h, các giá trị tương ứng là 2,315 và 1,917. Ngoài ra, tại vận tốc 0 km/h, biến dạng ghi nhận là 10,7 ($H = 6$ m) và 10,5 ($H = 2$ m), lớn hơn đáng kể so với các trường hợp có tải di động (20 - 120 km/h).

- Hệ số ổn định tổng thể:

Hệ số ổn định tổng thể (xét trường hợp có tải lợp) có xu hướng giảm khi vận tốc tăng trong cả hai trường hợp chiều cao đắp $H = 6$ m và $H = 2$ m. Đối với $H = 6$ m, giảm từ 1,339 tại 20 km/h xuống 1,113 tại 120 km/h. Mức giảm diễn ra liên tục theo vận tốc, với các giá trị trung gian lần lượt là 1,248 (40 km/h), 1,196 (60 km/h), 1,151 (80 km/h), cho thấy khi tốc độ tăng thì điều kiện ổn định tổng thể trở nên bất lợi hơn. Đối với $H = 2$ m, cũng giảm theo vận tốc nhưng cao hơn đáng kể so với $H = 6$ m, từ 2,29 tại 20 km/h xuống 2,05 tại 120 km/h (các giá trị trung gian là 2,21; 2,19; 2,14). Xu hướng này cho thấy nền đường với chiều cao đắp nhỏ có dự trữ ổn định lớn hơn trong toàn bộ dải vận tốc khảo sát. So sánh hai trường hợp tại cùng một vận tốc cho thấy $H = 2$ m lớn hơn $H = 6$ m, chênh lệch khoảng 0,8 đến 1,1 tùy vận tốc (chẳng hạn tại 60 km/h: 2,19 so với 1,196; tại 120 km/h: 2,05 so với 1,113). Kết quả phản ánh chiều cao khối đắp là yếu tố ảnh hưởng mạnh đến ổn định tổng thể, trong đó khối đắp cao hơn làm giảm đáng kể hệ số ổn định khi chịu tác dụng tải trọng di động lợp.

Từ các kết quả và phân tích trên cho thấy, có sự đối lập giữa hai khía cạnh: tại tốc độ thấp, biến dạng nền đường lớn hơn; trong khi tại tốc độ cao, mặc dù biến dạng nhỏ nhưng gia tốc và ứng xử động lực lại mạnh, gây suy giảm hệ số ổn định tổng thể. Điều này nhấn mạnh sự cần thiết phải cân nhắc đồng thời cả biến dạng và ổn định động lực học khi đánh giá an toàn công trình giao thông chịu tải trọng xe chạy.

5. KẾT LUẬN

Trong phạm vi nghiên cứu, kết quả mô phỏng số bằng Plaxis và GeoStudio cho thấy sự suy giảm hệ số ổn định của nền đường khi xét đến tải trọng động so với trường hợp chỉ xét tải trọng tĩnh. Trong khoảng vận tốc từ 20 đến 120 km/h, hệ số ổn định giảm từ 1,339 xuống 1,113 (tương ứng khoảng 16,9%).

Phân tích chi tiết cho thấy tốc độ xe có ảnh hưởng rõ rệt đến đặc trưng làm việc của nền đường. Ở tốc độ thấp, nền đường xuất hiện biến dạng lớn hơn, trong khi khi tốc độ tăng, biến dạng giảm nhưng mức độ dao động (vận tốc và gia tốc) lại tăng lên, từ đó làm giảm độ ổn định tổng thể.

Như vậy, bên cạnh các yếu tố địa chất và chiều cao nền đắp, tốc độ xe chạy cần được xem xét như một yếu tố quan trọng trong đánh giá ổn định nền đường trên đất yếu. Do đó, cần bổ sung yếu tố tải trọng động và tốc độ xe vào các tiêu chuẩn thiết kế hiện hành. Đồng thời, việc kết hợp nghiên cứu thực nghiệm và quan trắc hiện trường là cần thiết để hiệu chỉnh và hoàn thiện các mô hình tính toán.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Văn Du, Đánh giá các phương pháp phân tích độ lún và độ ổn định của nền đường ô tô trên đất yếu, Tạp chí Cầu đường Việt Nam, 1+2 (2025).
- [2]. Bộ Giao thông Vận tải, TCVN 4054:2005 - Đường ô tô - Yêu cầu thiết kế, 2005.
- [3]. Bộ Giao thông Vận tải, TCVN 9436:2012 - Nền đường ô tô - Thi công và nghiệm thu, 2012.
- [4]. Tổng cục đường bộ Việt Nam, TCCS 38:2022/TCĐBVN - Áo đường mềm - Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế, 2022.
- [5]. Tổng cục đường bộ Việt Nam, TCCS 41:2022/TCĐBVN, Tiêu chuẩn khảo sát, thiết kế nền đường ô tô trên nền đất yếu, 2022.
- [6]. X. Cui, In situ tests simulating traffic-load-induced settlement of alluvial silt subsoil, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 58 (2014) 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.11.010>
- [7]. Nguyễn Văn Du, Nguyễn Văn Hùng, Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng tải trọng động đến ổn định mái dốc nền đường, Tạp chí Giao thông vận tải, 2024.
- [8]. H. Yildirim, H. Ersan, Settlements under consecutive series of cyclic loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27 (2007) 577-585. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.10.007>
- [9]. Nguyễn Văn Hùng, Lê Thành Trung, Xác định chiều cao nền đường đắp tối thiểu trên đất yếu cho các tuyến đường cao tốc khu vực phía Nam Việt Nam, Tạp chí Cầu đường Việt Nam, 2016.
- [10]. L. Guo-Wei, N. N. Thang, A. C. Andrew, Settlement prediction of surcharge preloaded low embankment on soft ground subjected to cyclic loading, *Marine Georesources & Geotechnology*, 34 (2016) 154-161. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2014.985860>
- [11]. M. Ling, J. Wang, H. B. Wu, Residual deformation of saturated clay subgrade under vehicle load, *Journal of Tongji University*, 30 (2002) 1315-1320.
- [12]. C. Stamatopoulos, Improvement of dynamic soil properties induced by preloading verified by field test. *Engineering Geology*, 163 (2013) 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.003>
- [13]. W. Zhang, Design of treatment scheme and identification method of treatment effect for soft soil subgrade, *Vibroengineering Procedia*, 55 (2024) 8-13.
- [14]. N. T. Nguyen, Effects of dynamic traffic load frequency on consolidation behavior of soft clay under low embankment, *International Journal of Geomate*, 25 (2023) 166-172. <https://doi.org/10.21660/2023.107.3851>
- [15]. H. Fujiwara, Effect of preloading on post-construction consolidation settlement of soft clay subjected to repeated loading, *Soils and Foundations*, 30 (1990) 76-86. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.30.76>
- [16]. Bentley Systems, *Plaxis 3D 2024.2 User Manual*. Bentley Systems, USA, 2024.
- [17]. Geo-Slope International Ltd, *GeoStudio 2025.1 User Guide*, Canada, 2025.
- [18]. Công ty Cổ phần Tư vấn Thiết kế Giao thông vận tải phía Nam, Hồ sơ khảo sát địa chất công trình - Bước báo cáo nghiên cứu khả thi, dự án đầu tư xây dựng công trình cải tạo, nâng cấp Quốc lộ 53 đoạn Long Hồ - Ba Sĩ trên địa bàn hai tỉnh Vĩnh Long và Trà Vinh, 2025.