

Phân tích ảnh hưởng của độ cứng nền đất đến dao động nền và tốc độ vận hành an toàn của tàu cao tốc

Effect of soil stiffness on ground vibration amplitude and operational train speed

Phạm Ngọc Thạch

Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Tác giả liên hệ: thach.pham@ut.edu.vn

Ngày nhận bài: 29/4/2024; Ngày chấp nhận đăng: 15/5/2024

Tóm tắt:

Bằng cách tiếp cận mô phỏng số trên phần mềm phần tử hữu hạn, tác giả nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng nền đất đến dao động của một nền nhiều lớp dưới tác dụng của tải trọng tàu cao tốc. Nghiên cứu tập trung vào: Các đặc điểm dao động nền trong trường hợp nền có chứa lớp đất yếu với độ cứng thấp; ảnh hưởng của sự gia tăng độ cứng nền đến biên độ dao động nền (U_{max}), vận tốc tới hạn (V_{TH}) và tốc độ vận hành an toàn của tàu. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng, trong trường hợp nền có lớp sét yếu và dày, do có độ cứng thấp nên lớp sét chi phối chính đến phản ứng động của nền đất dưới tác dụng của tải trọng tàu cao tốc. Lớp sét càng yếu, V_{TH} càng thấp và U_{max} càng lớn, từ đó, làm hạn chế tốc độ vận hành an toàn của tàu. Khi tăng độ cứng của lớp sét, biên dạng của lớp sét giảm, dẫn tới U_{max} giảm và V_{TH} tăng, qua đó, làm tăng tốc độ vận hành an toàn của tàu.

Từ khóa: Dao động nền; Đường sắt cao tốc; Vận tốc tới hạn; Phần tử hữu hạn.

Abstract:

Using a finite element simulation approach, we studied the influence of ground stiffness on the vibration of a multi-layer ground subjected to high-speed train loading. The study focuses on ground vibration characteristics in cases where the ground contains a soft soil layer with low stiffness, and the effect of increasing ground stiffness on ground vibration amplitude (U_{max}), critical speed (V_{TH}), and operational speed of the train. The study results show that, in the case of ground with a soft and thick clay layer, owing to its low stiffness, the clay layer mainly influences the dynamic response of the ground. The weaker the clay layer, the lower the V_{TH} and the larger the U_{max} , thereby limiting the operational speed of the train. When the clay stiffness is increased, the deformation of the clay layer decreases; thus, U_{max} decreases and V_{TH} increases, thereby increasing the operational speed of the train.

Keywords: Ground vibration; High-speed railway; Critical speed; Finite element method.

1. Giới thiệu

Việt Nam có kế hoạch xây dựng đường sắt cao tốc Bắc - Nam với tốc độ có thể lên tới 350 km/h. Khi tàu chạy với tốc độ cao, dao động nền do tàu sinh ra có biên độ lớn, có thể ảnh hưởng đến sự an toàn vận hành của tàu [1], [2]. Do vậy, các vấn đề liên quan đến dao động nền móng đường sắt do tải trọng tàu cao tốc đang nhận được sự quan tâm nghiên cứu trong nước.

Nghiên cứu [3] đã trình bày phương pháp tạo tải trọng tàu cao tốc trong mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) để mô phỏng dao động nền theo miền thời gian. Phương pháp này giả định bánh tiếp xúc lý tưởng với ray và mô tả tải trọng tàu như là các tải tập trung di động có vị trí tương ứng với vị trí các trục bánh của tàu. Phương pháp [3] đã được áp dụng trong nghiên cứu [4] để khảo sát các đặc trưng cơ bản của dao động

nền bởi tải trọng tàu cao tốc. Nghiên cứu tập trung vào hình dạng của trường sóng mặt và hiện tượng vận tốc tới hạn (V_{TH}). V_{TH} là vận tốc tàu làm cho chuyển vị nền đạt giá trị cực đại. Mặc dù [4] đã minh họa cách xác định vận tốc tới hạn dựa vào tương quan giữa vận tốc tàu và vận tốc truyền sóng riêng của nền đất, tuy nhiên, nghiên cứu chưa phân tích ảnh hưởng của độ cứng nền đất đến dao động nền.

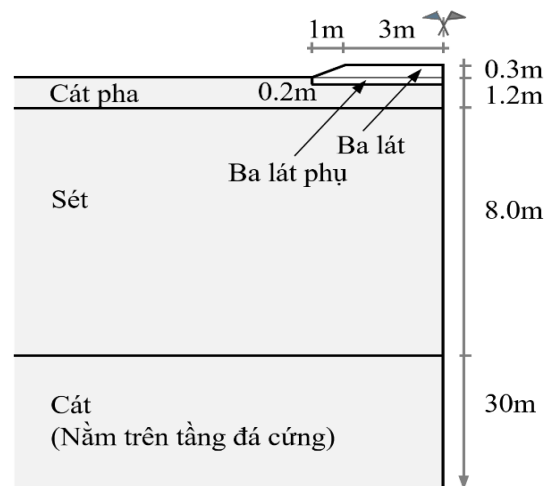
Sét mềm và bùn là những loại đất yếu có độ cứng thấp, với module đàn hồi nhỏ hơn 20 MPa. Do có độ cứng thấp nên các loại đất này nhạy cảm với tải trọng động. Khi tàu chạy qua một nền đất có độ cứng thấp, tải trọng tàu có thể làm cho nền đất dao động với biên độ lớn, từ đó, ảnh hưởng đến sự an toàn của đoàn tàu. Qua đó, cho thấy việc phân tích ảnh hưởng của độ cứng nền đất, đặc biệt là nền đất yếu, đến dao động nền đường sắt là một vấn đề quan trọng cần quan tâm nghiên cứu.

Bài báo trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của độ cứng nền đất đến dao động của một nền nhiều lớp dưới tác dụng của tải trọng tàu cao tốc. Trước tiên, tác giả trình bày số liệu địa chất, tải trọng tàu, mô hình phần tử hữu hạn và phương pháp mô phỏng. Sau đó, trình bày kết quả mô phỏng dao động nền cho các trường hợp vận tốc tàu từ 72 km/h đến 360 km/h. Các kết quả được thảo luận tập trung vào: (i) Các đặc điểm dao động nền trong trường hợp nền có chứa lớp đất yếu với độ cứng thấp; (ii) ảnh hưởng của sự gia tăng độ cứng nền đến biên độ dao động, vận tốc tới hạn và tốc độ vận hành an toàn của tàu cao tốc.

2. Địa chất, tải trọng tàu, mô hình phần tử hữu hạn và phương pháp mô phỏng số

2.1. Địa chất

Mặt cắt địa chất gồm các lớp ba lát nằm trên nền nhiều lớp như Hình 1. Trong đó, lớp sét có chiều dày 8 m và có vị trí gần mặt đất, do vậy, lớp sét sẽ chi phối chính đến phản ứng động của nền đất. Bảng 1 trình bày các tham số đàn hồi của vật liệu. Trong đó, E là module đàn hồi, ν là hệ số Poisson và ρ là khối lượng riêng của vật liệu. Để phân tích ảnh hưởng của độ cứng nền đất đến dao động nền, tác giả xét 04 trường hợp module đàn hồi của lớp đất sét là $E_{sét} = 9$ MPa, 18 MPa, 36 MPa và 54 MPa. Theo [5], các trường hợp này tương ứng với các trạng thái đất yếu, cứng vừa và cứng. Mô hình cản Rayleigh được sử dụng cho các cơ cấu tiêu tán năng lượng trong hệ [6]. Trong đó, ma trận cản nhớt tỷ lệ với ma trận độ cứng và ma trận khối lượng thông qua hai tham số α và β . Hai tham số này thường được chọn để cho ra tỷ số cản thấp, trung bình khoảng 5% [4], [7]. Theo đó, tác giả chọn $\alpha = 0.0005$ và $\beta = 1.7135$. Các giá trị này cho ra tỷ số cản 3% đến 6% trong phạm vi tần số từ 3 Hz đến 40 Hz.



Hình 1. Mặt cắt địa chất.

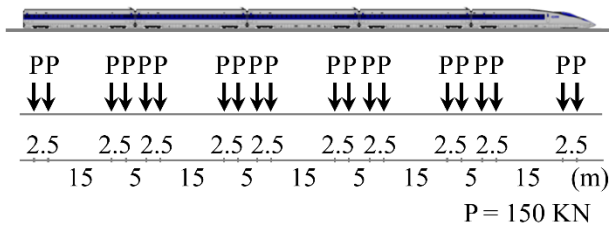
Bảng 1. Tham số vật liệu.

| Vật liệu | E (MPa) | ν | ρ (kg/m ³) | Trạng thái (theo [5]) |
|-----------|--------------|-------|--------------------------------|--------------------------|
| Ba lát | 230 | 3 | 2000 | |
| Cát pha | 12 | 3 | 1850 | |
| Sét (TH1) | 9 | 3.5 | 1800 | Yếu |

| Vật liệu | E (MPa) | ν | ρ (kg/m ³) | Trạng thái (theo [5]) |
|----------|--------------|-------|--------------------------------|--------------------------|
| (TH2) | 18 | 3.5 | 1800 | Yếu |
| (TH3) | 36 | 3.5 | 1800 | Cứng vừa |
| (TH4) | 54 | 3.5 | 1800 | Cứng |
| Cát | 60 | 3 | 1900 | |

2.2. Tải trọng tàu

Dựa theo nghiên cứu [3], tải trọng tàu được mô tả như là các tải tập trung di động có vị trí tương ứng với vị trí các trục bánh tàu (Hình 2). Số toa tàu được giả định là 05 toa. Theo [7], tải trọng tàu ứng với 05 toa là đủ để đại diện cho một đoàn tàu dài có nhiều hơn 05 toa. Mỗi toa có 04 trục bánh. Khoảng cách giữa các trục bánh và giá trị tải trọng trên mỗi trục được trình bày tại Hình 2. Vận tốc tàu được khảo sát trong phạm vi 72 km/h đến 360 km/h.



Hình 2. Tải trọng tàu.

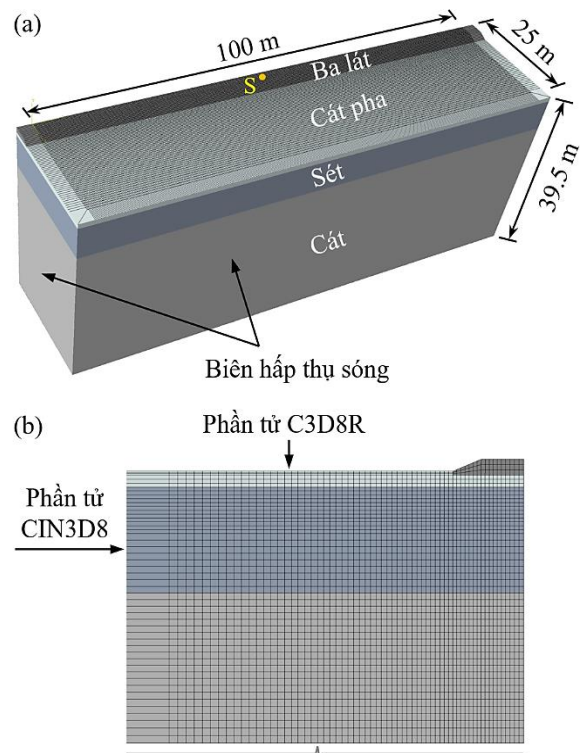
2.3. Mô hình phần tử hữu hạn

Hình 3 trình bày mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng trên phần mềm ABAQUS [8]. Loại phần tử được áp dụng cho ba lát và các lớp đất là phần tử khối 08 nút C3D8R [8]. Phần tử này có trường chuyển vị tuyến tính và dùng thuật toán tích phân thu gọn cho nội lực tại nút phần tử [9]. Do hệ có tính chất đối xứng dọc theo tuyến, mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng tương ứng với một phần hai hệ. Tại biên đối xứng, điều kiện biên chống chuyển vị theo phương ngang được áp dụng. Tại các biên xung quanh mô hình, phần tử vô hạn CIN3D8 được áp dụng để hấp thụ các sóng tới, từ đó, hạn chế hiện tượng phản xạ sóng ảnh hưởng đến kết quả mô phỏng [8]. Dưới đáy mô hình, điều kiện biên ngàm được áp dụng để mô tả nền đá cứng. Mô hình có kích thước 100 m x 25 m x 39.5 m với

2.526.986 phần tử C3D8R và 51.322 phần tử vô hạn CIN3D8 (Hình 3).

2.4. Phương pháp mô phỏng

Tác giả áp dụng phương pháp mô phỏng trong nghiên cứu [4]. Phương pháp này được tóm tắt như sau: (i) xây dựng mô hình phần tử hữu hạn cho hệ ba lát và các lớp đất; (ii) đưa tải trọng di động của đoàn tàu vào mô hình phần tử hữu hạn; (iii) giải hệ phương trình chuyển động tìm dao động nền. Để kiểm chứng phương pháp, nghiên cứu [4] đã so sánh kết quả mô phỏng số với kết quả giải tích của bài toán tải trọng di động trên ray được đặt trên nền đàn hồi đồng nhất. Qua đó, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, phương pháp mô phỏng cho kết quả dao động rất sát với kết quả giải tích trong toàn bộ phạm vi tần số quan trọng.



Hình 3. (a) Mô hình PTHH; (b) Mặt cắt ngang.

3. Kết quả và thảo luận

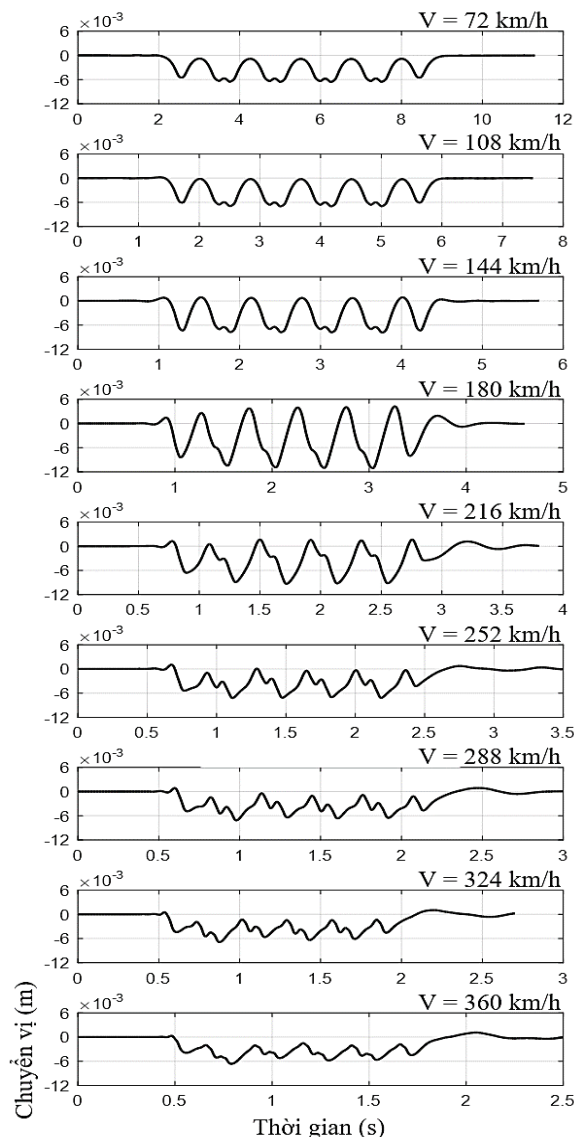
3.1. Phân tích trường hợp nền đất yếu

Phần này phân tích kết quả của hai trường hợp nền với lớp đất sét có module đàn hồi thấp là $E_{sét} = 9$ MPa và $E_{sét} = 18$ MPa (Bảng 1). Theo phân loại trong [5], hai trường hợp này thuộc nhóm đất sét yếu. Chuyển vị tại điểm quan sát (điểm S trên Hình 3) cho các trường hợp vận tốc tàu từ 72 km/h đến 360 km/h được thể hiện trên Hình 4 với trường hợp $E_{sét} = 9$ MPa và Hình 5 với trường hợp $E_{sét} = 18$ MPa. Từ Hình 4 và Hình 5, đồ thị ứng với vận tốc tàu 216 km/h được so sánh tại Hình 6. Có thể nhận thấy rằng:

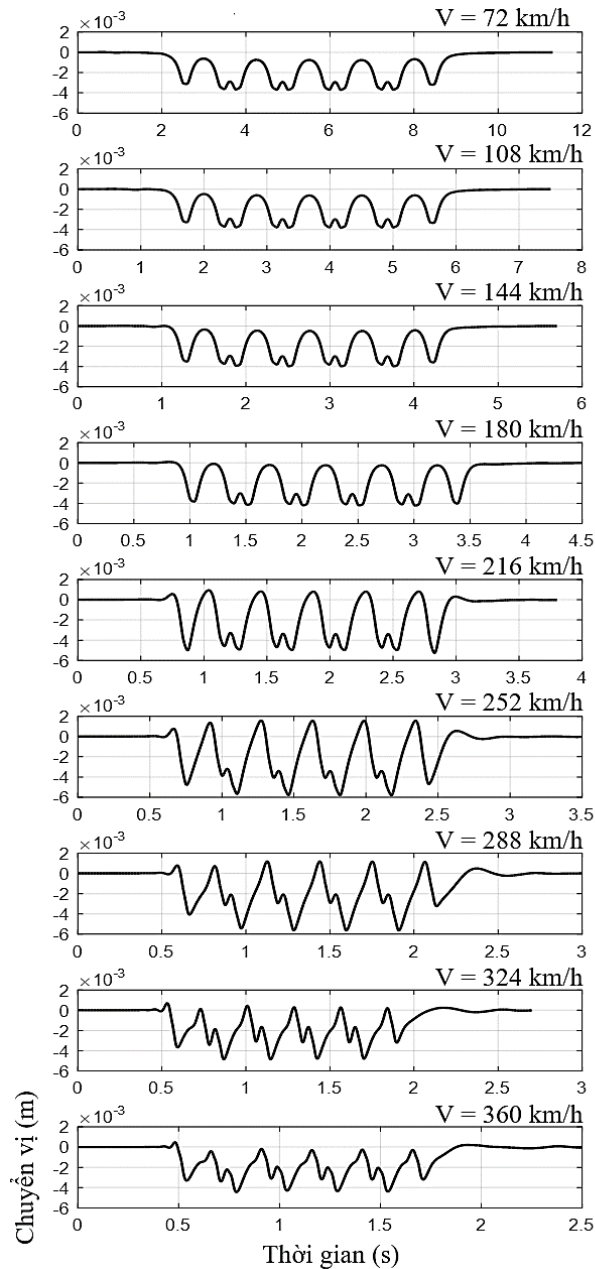
- Khi $E_{sét}$ giảm, nghĩa là nền càng yếu, chuyển vị có biên độ càng tăng và các đỉnh âm tăng mạnh so với các đỉnh dương. Chuyển vị

lớn nhất tăng từ 5.3 mm lên 9.3 mm và có thời điểm xảy ra khác nhau giữa hai trường hợp. Trong trường hợp $E_{sét} = 9$ MPa, chuyển vị lớn nhất xảy ra tại thời điểm 1.72s, khi trục bánh trước của toa thứ ba đi qua điểm quan sát. Trong trường hợp $E_{sét} = 18$ MPa, chuyển vị lớn nhất xảy ra tại thời điểm 2.83s, khi trục bánh sau của toa cuối cùng đi qua điểm quan sát.

- Khi $E_{sét}$ giảm, hình dạng biến thiên của biểu đồ chuyển vị thay đổi rõ rệt. Dấu hiệu trục bánh sau của toa hai, ba và bốn trong trường hợp $E_{sét} = 9$ MPa, không còn biểu hiện rõ như trong trường hợp $E_{sét} = 18$ MPa. Ngoài ra, trong trường hợp $E_{sét} = 9$ MPa, khi tàu chạy khỏi điểm quan sát (sau thời điểm 2.87s trên Hình 6), dao động của điểm quan sát vẫn được duy trì đáng kể trước khi tắt hẳn.

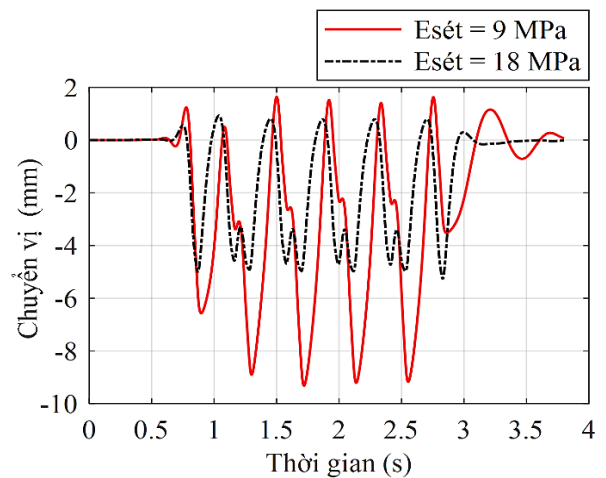


Hình 4. Chuyển vị tại điểm S ($E_{sét} = 9$ MPa).



Hình 5. Chuyển vị tại điểm S ($E_{sét} = 18 \text{ MPa}$).

Hình 7 trình bày trường chuyển vị mặt nền (được phóng đại 1000 lần) của hai trường hợp nền có $E_{sét} = 9 \text{ MPa}$ và 18 MPa khi vận tốc tàu $V = 216 \text{ km/h}$. Có thể nhận thấy rằng, cả hai trường hợp đều có sóng dao động lan truyền trên mặt nền. Trong trường hợp $E_{sét} = 9 \text{ MPa}$, sóng có biên độ lớn hơn, lan truyền ra xung quanh mạnh hơn, có góc hợp bởi mặt sóng và hướng tàu nhỏ hơn so với trong trường hợp $E_{sét} = 18 \text{ MPa}$.



Hình 6. So sánh chuyển vị tại S khi $V = 216 \text{ km/h}$.

Từ Hình 4 và Hình 5, giá trị lớn nhất của chuyển vị âm và chuyển vị dương trong mỗi trường hợp vận tốc tàu được xác định và trình bày trên Hình 8 dưới dạng quan hệ giữa chuyển vị và vận tốc tàu. Theo nghiên cứu [4], vận tốc tàu làm cho chuyển vị nền đạt giá trị cực đại chính là vận tốc tới hạn (V_{TH}). Theo đó, từ Hình 8, có thể xác định được trường hợp $E_{sét} = 18$ MPa có vận tốc tới hạn $V_{TH} = 252$ km/h và chuyển vị lớn nhất $U_{max} = 5.8$ mm. Trường hợp $E_{sét} = 9$ MPa có $V_{TH} = 180$ km/h và $U_{max} = 11.2$ mm. Kết quả này

chứng tỏ nền đất càng yếu thì V_{TH} càng nhỏ và U_{max} có giá trị càng lớn.

Theo [10], [11], [12], tốc độ vận hành an toàn của tàu có thể xác định theo hai điều kiện:

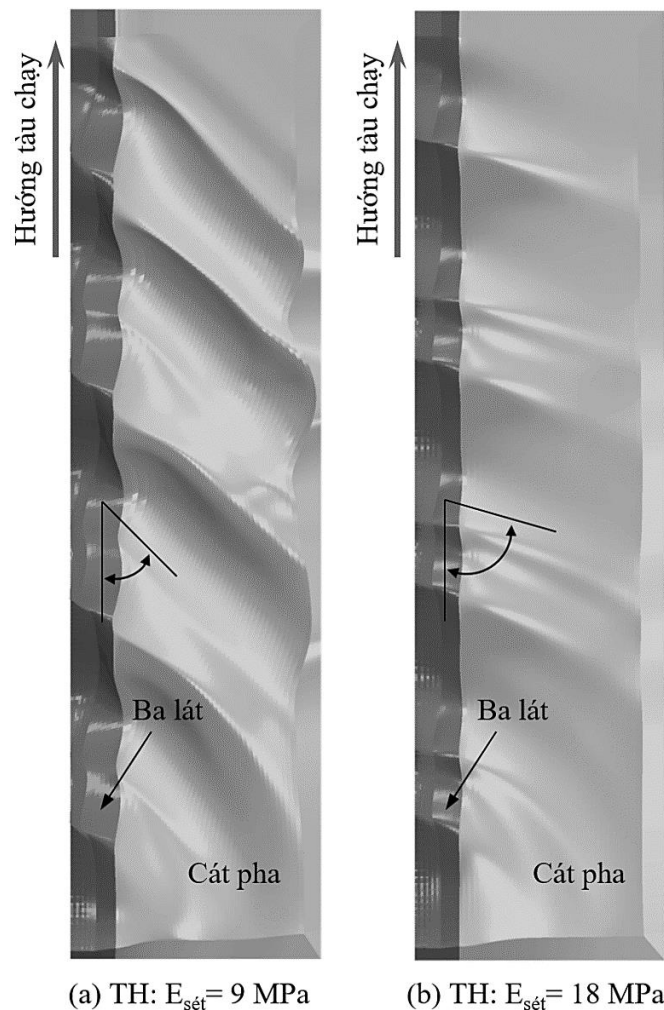
$$V \leq V_{TH} / \alpha \quad (1)$$

$$U \leq U_{cp} \quad (2)$$

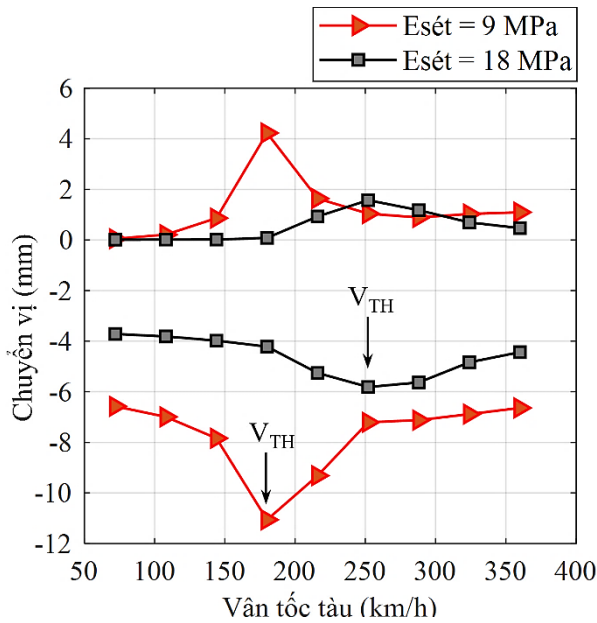
Trong đó, V là vận tốc tàu; V_{TH} là vận tốc tới hạn, α là hệ số an toàn của vận tốc tàu, U là chuyển vị nền, U_{cp} là chuyển vị nền cho phép. Giá trị của α và U_{cp} được tổng hợp tại Bảng 2.

Bảng 2. Tiêu chuẩn dao động nền.

| Nguồn tham khảo | α | U_{cp} (mm) | Ký hiệu |
|---|-----------|------------------|---------|
| Đường sắt cao tốc California (Mỹ) [10] | 1.7 | 4.0 | TC1 |
| Cục Đường sắt Quốc gia Thụy Điển [11] | 1.7 | 4.0 | TC1 |
| Viện nghiên cứu Địa kỹ thuật Na Uy [12] | 1.5 - 2.0 | 4.0 | TC2 |



Hình 7. Trường chuyển vị mặt nền khi $V = 216$ km/h.



Hình 8. Quan hệ giữa chuyển vị nền và vận tốc tàu (trường hợp nền đất yếu).

Theo TC1 trong Bảng 2, điều kiện (1) yêu cầu tốc độ tàu $V \leq V_{TH}/1.7$ và điều kiện (2) yêu cầu chuyển vị nền $U \leq 4.0$ mm. Nếu áp dụng TC1 cho trường hợp nền có $E_{sét} = 18$ MPa, điều kiện (1) yêu cầu vận tốc tàu $V \leq 252/1.7 = 148.2$ km/h. Quan sát kết quả trên Hình 8 cho thấy rằng, điều kiện (2) chỉ thỏa khi tàu có vận tốc $V \leq 144$ km/h. Tổng hợp cả hai điều kiện, tốc độ vận hành an toàn của tàu là 144 km/h. Như vậy, đất yếu đã làm cho V_{TH} thấp và chuyển vị nền lớn, từ đó, làm hạn chế tốc độ vận hành an toàn của tàu.

Nếu áp dụng TC1 cho trường hợp nền có $E_{sét} = 9$ MPa, điều kiện (1) yêu cầu vận tốc tàu $V \leq 180/1.7 = 105.9$ km/h. Quan sát kết quả trên Hình 8 cho thấy rằng chuyển vị âm đều có giá trị lớn hơn 4 mm, nghĩa là điều kiện (2) không thỏa trong toàn bộ phạm vi vận tốc tàu được xét. Phân tích trên cho thấy rằng, nền đất càng yếu thì V_{TH} càng nhỏ, càng làm giảm tốc độ vận hành an toàn của tàu. Bên cạnh đó, do nền đất quá yếu nên chuyển vị nền vượt giá trị cho phép ở tất cả vận tốc tàu. Từ đó, có thể kết luận rằng trường hợp nền có $E_{sét} = 9$ MPa không đủ điều kiện an toàn để tàu chạy qua.

3.2. Ảnh hưởng của sự gia tăng độ cứng nền

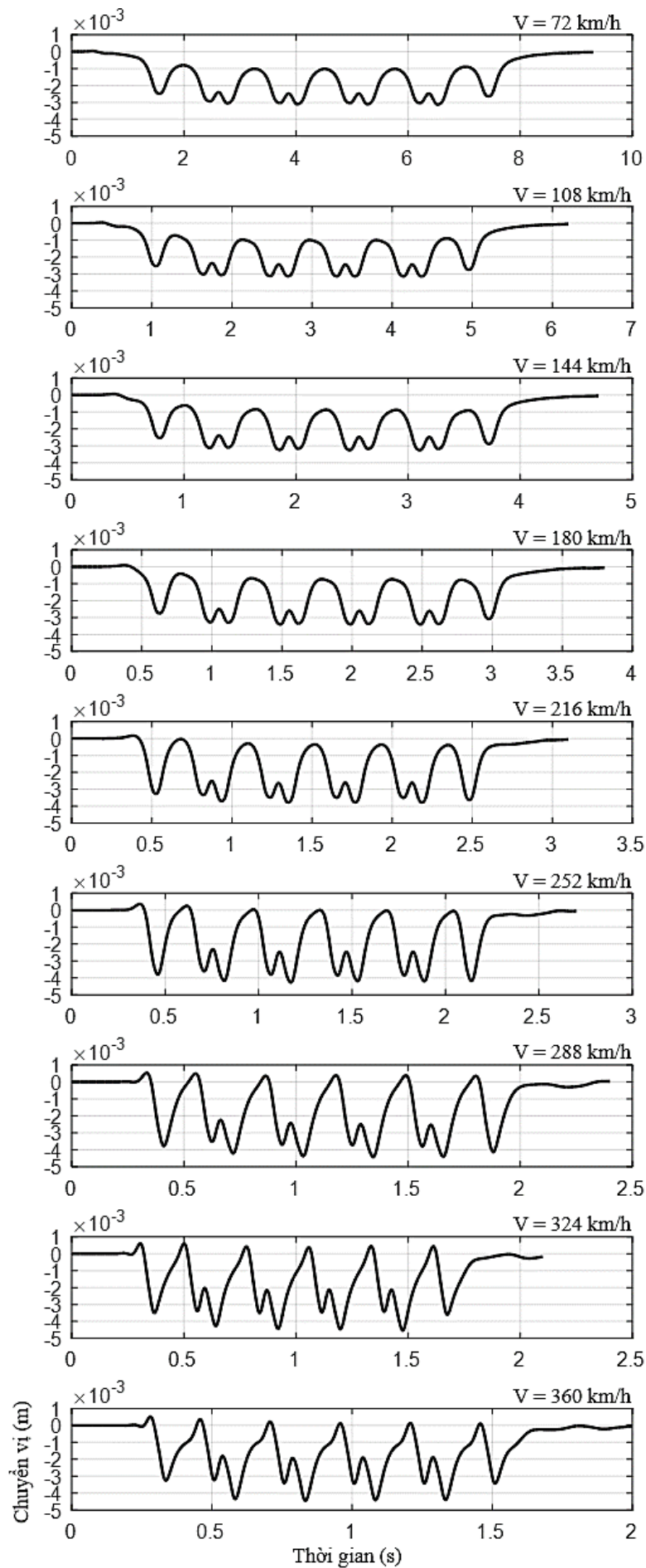
Phân tích trong phần 3.1 cho thấy rằng, nền đất yếu làm cho hệ có vận tốc tới hạn thấp và dao động nền có biên độ lớn. Để khắc phục vấn đề này, nền đất có thể được xử lý bằng một giải pháp gia cố nền, ví dụ như, phương pháp giếng thấm, phương pháp cọc xi măng đất, phương pháp cọc bê tông kết hợp vải địa kỹ thuật [1], [13], [14]. Mỗi giải pháp có những đặc trưng và ưu điểm riêng, tuy nhiên, chúng có chung mục tiêu là làm tăng độ cứng của nền đất yếu.

Để hiểu rõ ảnh hưởng của sự gia tăng độ cứng nền đến dao động nền và tốc độ vận hành của tàu, tác giả so sánh kết quả giữa trường hợp nền đất yếu có $E_{sét}$ thấp với các trường hợp $E_{sét} = 36$ MPa và $E_{sét} = 54$ MPa. Theo phân loại trong [5], hai trường hợp này thuộc loại đất sét cứng vừa và đất sét cứng (Bảng 1). Lưu ý, nghiên cứu này không tập trung vào một giải pháp gia cố nền cụ thể, chỉ xét hiệu quả gia cường nền đất yếu một cách tương đương thông qua tăng độ cứng của lớp đất sét.

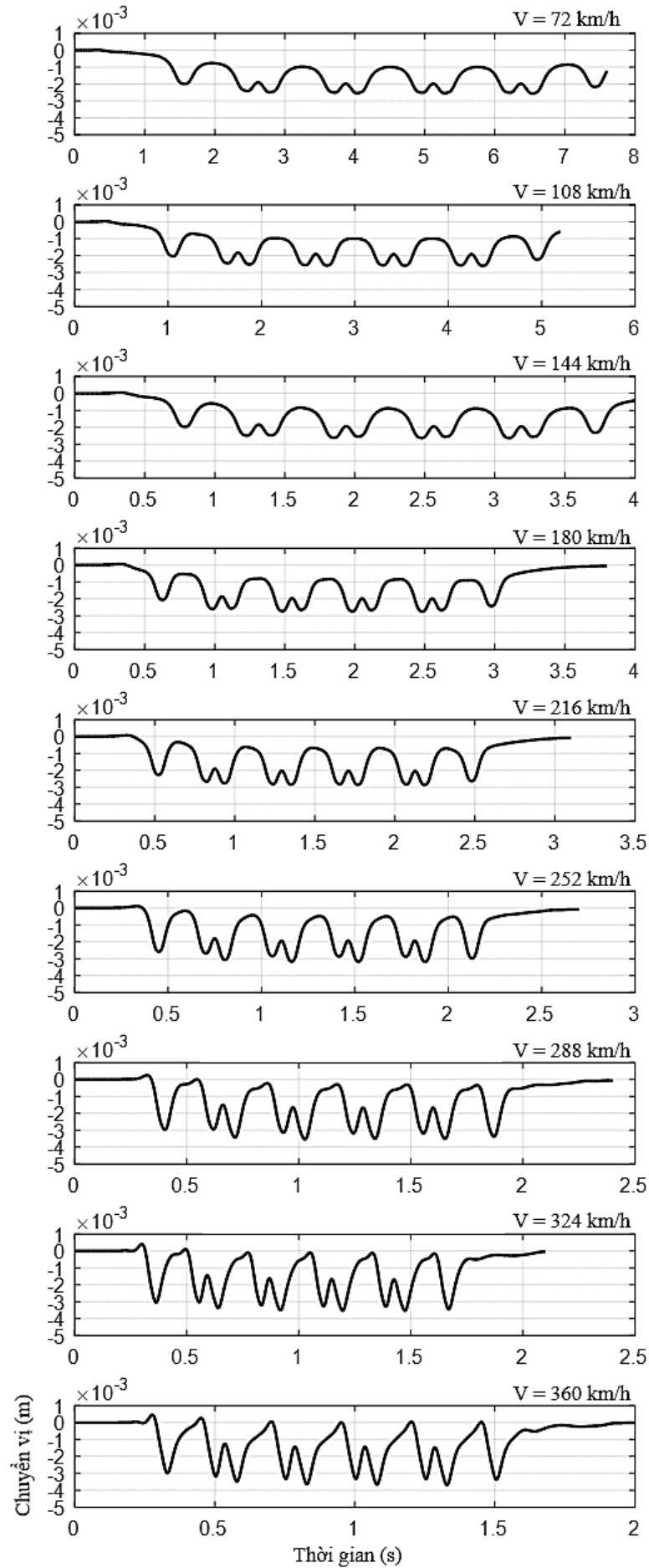
Chuyển vị tại điểm quan sát (điểm S trên Hình 3) cho các trường hợp vận tốc tàu từ 72 km/h đến 360 km/h, được trình bày trên Hình 9 cho trường hợp $E_{sét} = 36$ MPa và Hình 10 cho trường hợp $E_{sét} = 54$ MPa.

Từ Hình 4, Hình 5, Hình 9 và Hình 10, giá trị lớn nhất của chuyển vị trong mỗi trường hợp vận tốc tàu được xác định và trình bày trên Hình 11 dưới dạng quan hệ giữa chuyển vị và vận tốc tàu. Quan sát Hình 11 cho thấy:

- Trong trường hợp nền đất yếu với $E_{sét} = 9$ MPa, hệ có $V_{TH} = 180$ km/h và $U_{max} = 11.2$ mm;
- Khi tăng $E_{sét}$ lên 18 MPa, $V_{TH} = 252$ km/h và $U_{max} = 5.8$ mm;
- Khi tăng $E_{sét}$ lên 36 MPa, $V_{TH} = 324$ km/h và $U_{max} = 4.6$ mm;
- Khi tăng $E_{sét}$ lên 54 MPa, hiện tượng vận tốc tới hạn không xảy ra trong phạm vi vận tốc tàu được khảo sát. Biên độ chuyển vị tăng chậm theo vận tốc tàu và đạt giá trị lớn nhất 3.7 mm tại vận tốc 360 km/h.

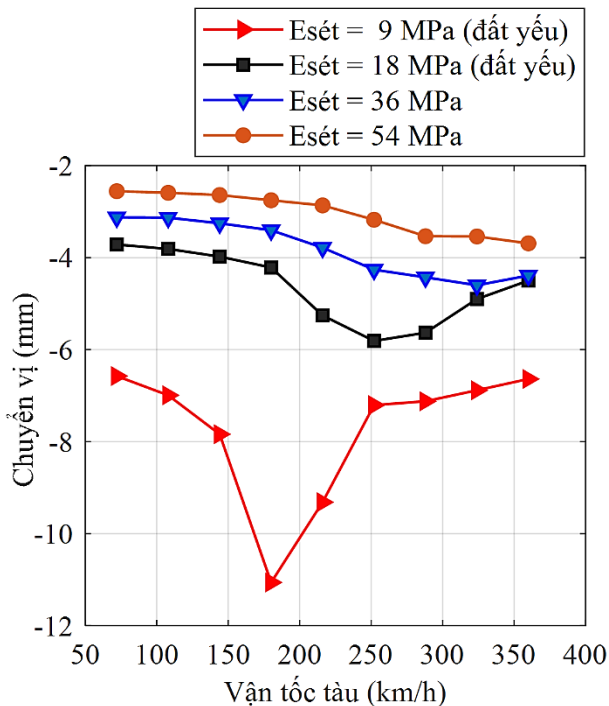


Hình 9. Chuyển vị tại điểm S ($E_{sét} = 36$ MPa).



Hình 10. Chuyển vị tại điểm S ($E_{sét} = 54$ MPa).

Quan sát trên chúng tỏ rằng, khi lớp đất yếu được gia cố càng cứng, biên độ dao động nền càng giảm và vận tốc tới hạn càng tăng. Điều này có thể được giải thích như sau: Trong mặt cắt địa chất tại Hình 1, lớp sét có chiều dày 8 m và nằm gần mặt đất, do vậy, lớp sét chi phối chính đến dao động nền trong trường hợp nền có $E_{sét}$ thấp. Khi lớp sét được gia cố, độ cứng $E_{sét}$ tăng lên, biến dạng của lớp sét bị giảm mạnh và dẫn tới biên độ dao động nền giảm ở tất cả vận tốc tàu. Bên cạnh đó, hiện tượng vận tốc tới hạn xảy ra khi vận tốc tàu gần với vận tốc truyền sóng riêng (generalized modal wave) của nền đất [4]. Khi tăng $E_{sét}$, tính chất truyền sóng riêng của nền bị thay đổi theo chiều hướng làm tăng vận tốc của sóng riêng, từ đó, làm tăng vận tốc tới hạn V_{TH} .



Hình 11. Quan hệ giữa chuyển vị nền và vận tốc tàu (04 trường hợp lớp sét có $E_{sét}$ khác nhau).

Nếu áp dụng TC1 trong Bảng 2 cho trường hợp nền có $E_{sét} = 36$ MPa, điều kiện (1) yêu cầu tốc độ tàu $V \leq 324/1.7 = 190.6$ km/h. Kết quả trên Hình 11 cho thấy rằng điều kiện (2) chỉ thỏa khi tàu có vận tốc $V \leq 233$ km/h. Tổng hợp cả hai điều kiện, tốc độ vận hành an toàn của tàu là 190.6 km/h.

Nếu áp dụng TC1 cho trường hợp $E_{sét} = 54$ MPa, kết quả trên Hình 11 cho thấy rằng, tất cả

chuyển vị đều có giá trị nhỏ hơn 4 mm, nghĩa là điều kiện (2) thỏa trong phạm vi vận tốc tàu được khảo sát. Ngoài ra, điều kiện (1) yêu cầu tốc độ tàu $V \leq V_{TH}/1.7$. Tuy nhiên, kết quả trên Hình 11 cho thấy, hiện tượng vận tốc tới hạn không xảy ra. Có thể do nghiên cứu này chỉ khảo sát vận tốc tàu tối đa 360 km/h nên V_{TH} chưa biểu hiện rõ trên Hình 11. Nếu phạm vi vận tốc tàu được khảo sát trên 360 km/h, có thể suy luận, V_{TH} sẽ lớn hơn 360 km/h, dẫn tới tốc độ vận hành an toàn của tàu sẽ trên 211.8 km/h.

4. Kết luận

Trong trường hợp nền đất yếu, do lớp sét yếu có chiều dày lớn, nằm gần mặt đất và có module đàn hồi ($E_{sét}$) thấp nên lớp sét chi phối chính đến phản ứng động của nền đất dưới tác dụng của tải trọng tàu cao tốc. Khi $E_{sét} = 18$ MPa, kết quả phân tích cho thấy hệ số vận tốc tới hạn $V_{TH} = 252$ km/h và chuyển vị lớn nhất $U_{max} = 5.8$ mm. Khi $E_{sét} = 9$ MPa, kết quả phân tích cho thấy hệ số $V_{TH} = 180$ km/h và $U_{max} = 11.2$ mm. Có thể nhận thấy rằng, nền đất càng yếu thì V_{TH} càng thấp và U_{max} có giá trị càng lớn.

V_{TH} thấp và U_{max} lớn trong trường hợp nền đất yếu có thể làm hạn chế tốc độ vận hành an toàn của tàu. Cụ thể, nếu áp dụng tiêu chuẩn dao động $V \leq V_{TH}/1.7$ và $U \leq 4.0$ mm (V là vận tốc tàu và U là chuyển vị nền), nền đất với $E_{sét} = 18$ MPa chỉ đảm bảo cho tàu chạy an toàn với vận tốc 144 km/h. Đặc biệt, khi $E_{sét}$ giảm xuống còn 9 MPa, kết quả phân tích đã chỉ ra rằng, nền đất yếu không đủ điều kiện an toàn để tàu chạy qua.

Khi độ cứng của nền đất tăng, nghĩa là $E_{sét}$ tăng, biến dạng của lớp sét giảm, dẫn tới chuyển vị U_{max} giảm ở tất cả vận tốc tàu. Bên cạnh đó, khi $E_{sét}$ tăng, tính chất truyền sóng riêng của nền bị thay đổi theo chiều hướng làm tăng vận tốc của sóng riêng, từ đó làm tăng V_{TH} .

V_{TH} tăng và U_{max} giảm (do tăng độ cứng của nền đất), giúp gia tăng tốc độ vận hành an toàn của tàu. Cụ thể, nếu áp dụng tiêu chuẩn dao động $V \leq V_{TH}/1.7$ và $U \leq 4.0$ mm, nền đất với $E_{sét} = 36$ MPa đảm bảo an toàn cho tàu chạy với

vận tốc 190.6 km/h. Đặc biệt khi $E_{sét}$ tăng lên 54 MPa, hiện tượng vận tốc tới hạn đã không xảy ra. Có thể do nghiên cứu này chỉ khảo sát vận tốc tàu tối đa 360 km/h nên V_{TH} chưa biểu hiện rõ trong trường hợp $E_{sét} = 54$ MPa. Nếu phạm vi vận tốc tàu được khảo sát trên 360 km/h, có thể suy luận rằng, V_{TH} sẽ lớn hơn 360 km/h, dẫn tới tốc độ vận hành an toàn của tàu sẽ trên 211.8 km/h.

Tài liệu tham khảo

- [1] V. Krylov, *Ground Vibrations from high-speed railways: Prediction and mitigation*. London, UK: ICE Publishing, 2019.
- [2] A. Ramos, A. Castanheira-Pinto, A. Colaco, J. Fernández-Ruiz, and A. Costa, “Predicting critical speed of railway tracks using artificial intelligence algorithm,” *Vibration*, vol. 6, no. 4, pp. 895-916, 2023, doi: 10.3390/vibration6040053.
- [3] P. N. Thạch, “Phương pháp tạo tải trọng tàu cao tốc trong mô hình phân tử hữu hạn để mô phỏng dao động nền theo miền thời gian,” *TC KHCN GTVT*, tập 11, số 2, tr. 1-6, 5. 2022, doi: 10.55228/JTST.11(2).1-6.
- [4] P. N. Thạch, “Nghiên cứu các đặc trưng dao động nền do tàu cao tốc,” *TC KHCN GTVT*, tập 12, số 4, tr. 1-7, 7. 2023, doi: 10.55228/JTST.12(4).1-7.
- [5] A. Eslami, S. Moshfeghi, H. MolaAbasi, and M. M. Eslami, *Piezocone and cone penetration test (CPTu and CPT) applications in foundation engineering*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2020.
- [6] A. Chopra, *Dynamics of structures*. London, UK: Prentice-Hall, 2020.
- [7] P. N. Thạch, “Influence of the number of train carriages on train-induced ground vibrations,” *Int. J. GEOMATE*, vol. 26, no. 114, pp. 60-67, 2024, doi: 10.21660/2024.114.4272.
- [8] Dassault Systems Simulia. *ABAQUS 6.14 theory manuals*. (2014). Accessed: February 14, 2024. [Online]. Available: <http://62.108.178.35:2080/v6.14/books/stm/default.htm>
- [9] T. Belytschko, W. K. Liu, B. Moran, and K. Elkhodary, “Element technology,” in *Nonlinear finite elements for continua and structures*, 2nd ed. NJ, USA: John Wiley & Sons, 2014, ch. 8, pp. 477-534.
- [10] *California high-speed train project - Design criteria*, California High-Speed Rail Authority, Sacramento, CA, USA, 2014.
- [11] *Soil Dynamic Analyses*, Forskrift BVF 585.13, Swedish National Rail Administration, Borlänge, Sweden, 2001.
- [12] C. Madshus, S. Lacasse, A. Kaynia, and L. Hårvik, “Geodynamic challenges in high speed railway projects,” in *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*. Reston, VA, USA: ASCE, 2004, pp. 192-215.
- [13] J. Evans, D. Ruffing, and D. Elton, *Fundamentals of ground improvement engineering*. FL, USA: CRC Press, 2022.
- [14] P. -N. Thạch, H. -L. Liu, and G. -Q. Kong, “Evaluation of PCC pile method in mitigating embankment vibrations from a high-speed train,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 139, no. 12, pp. 2225–2228, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000941.