

Nghiên cứu các đặc trưng dao động nền do tàu cao tốc

Characteristics of ground vibration due to high-speed train

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: 23/5/2023; Ngày chấp nhận đăng: 4/7/2023

Tóm tắt:

Một đoàn tàu khi chạy với tốc độ cao sẽ sinh ra sóng lan truyền trong nền đất. Do sóng có biên độ rất nhỏ nên khó có thể nghiên cứu chúng bằng cách quan sát trực tiếp tại hiện trường. Một cách phù hợp để tiếp cận vấn đề nghiên cứu đó là sử dụng mô hình số. Bằng cách tiếp cận này, tác giả đã mô phỏng sóng trong nền đất do tàu cao tốc sinh ra, từ đó, khảo sát các đặc trưng dao động nền: Sự lan truyền sóng mặt; góc hợp bởi mặt sóng và hướng tàu chạy; chuyển vị mặt nền dọc theo chiều dài tàu; ảnh hưởng của vận tốc tàu đến dao động nền.

Từ khóa: Dao động nền; Tàu cao tốc; Mô phỏng số.

Abstract:

A train generates waves in the ground when it runs at high speeds. Because the waves have very small amplitude, it is difficult to study them by direct observation in the field. A suitable way to approach the research problem is to use numerical models. By this approach, the author simulated train-induced waves from which the following vibration characteristics are investigated: surface wave propagation; angle between wavefronts and the train direction; ground displacement pattern along the train; effect of train speed on ground vibrations.

Keywords: Ground vibration; high-speed train; numerical simulation.

1. Giới thiệu

Để nâng cao năng lực vận tải đường sắt, Chính phủ có kế hoạch đầu tư xây dựng các tuyến đường sắt với vận tốc chạy tàu trên 200 km/h. Mục tiêu là kết nối hiệu quả giữa các đô thị lớn và các vùng kinh tế trọng điểm quốc gia. Qua đó, đặt ra các vấn đề nghiên cứu quan trọng đối với kỹ thuật xây dựng đường sắt, trong đó có thể kể đến bài toán “dao động nền do tàu cao tốc”. Tuy nhiên, bài toán này ít được quan tâm nghiên cứu trong nước. Phần lớn các nghiên cứu tập trung vào những vấn đề dao động của kết cấu tầng trên và sử dụng mô hình dầm trên nền đàn hồi [1], [2], [3], nghĩa là thay nền bằng các lò xo đàn hồi và dùng một hệ số nền đặc trưng cho toàn bộ ứng xử phức tạp của đất. Có thể nhận thấy mô hình đơn giản quá mức này không còn phù hợp khi dao động nền là đối tượng nghiên cứu chính.

Một đoàn tàu khi chạy với tốc độ cao sẽ sinh ra sóng lan truyền trong nền đất. Do sóng có biên độ rất nhỏ nên khó nghiên cứu chúng bằng cách quan sát trực tiếp tại hiện trường. Một cách phù hợp để tiếp cận vấn đề nghiên cứu, đó là sử dụng mô hình số. Bằng cách xây dựng mô hình số trên máy tính, sự lan truyền sóng có thể được mô phỏng và nghiên cứu. Dựa trên cách tiếp cận này, tác giả đã nghiên cứu các đặc trưng dao động nền: sự lan truyền sóng mặt; góc hợp bởi mặt sóng và hướng tàu chạy; chuyển vị mặt nền dọc theo chiều dài tàu; ảnh hưởng của vận tốc tàu đến dao động nền.

2. Phương pháp mô phỏng

Trong nghiên cứu này, dao động nền được mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) theo miền thời gian. Các mô hình PTHH được xây dựng trên phần mềm ABAQUS. Phần mềm này có khả năng mô phỏng dao động và

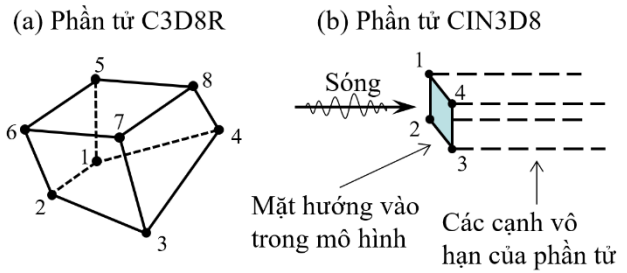
truyền sóng trong hệ dưới tác dụng của tải trọng động [4].

Tải trọng tàu được giả định là một đoàn tải trọng di động có vị trí tương ứng với vị trí của các trục bánh tàu. Độ lớn của mỗi tải di động, được xác định bằng cách phân phối tải trọng toa về từng trục bánh. Đoàn tải trọng di động được đưa vào mô hình PTHH bằng phương pháp được trình bày trong [5].

Hệ ba lát, nền đắp và nền đất được giả định có ứng xử đàn hồi với các tham số vật liệu dùng trong phân tích động: Khối lượng riêng ρ , vận tốc sóng cắt V_S và vận tốc sóng Rayleigh V_R . Các cơ cấu tiêu tán năng lượng trong hệ được đặc trưng bằng mô hình cản Rayleigh [6]. Mô hình này giả định ma trận cản nhớt tỷ lệ với ma trận cứng và ma trận khối lượng thông qua hai tham số α và β . Hai tham số này được chọn sao cho cung cấp tỷ số cản trung bình khoảng 5%.

Loại PTHH được dùng cho ba lát và nền đất là phần tử khối liên tục ba chiều C3D8R (hình 1a). Phần tử này có 06 mặt, 08 nút, trường chuyển vị bậc 1 và dùng thuật toán tích phân thu gọn cho nội lực và lực cản tại nút phần tử [4], [6]. Tại các biên xung quanh mô hình PTHH, nếu điều kiện biên cứng (biên chống chuyển vị) được sử dụng thì sóng khi gặp biên sẽ bị phản xạ và làm ảnh hưởng xấu đến kết quả mô phỏng [7]. Để khắc phục vấn đề này, tác giả sử dụng phần tử vô hạn CIN3D8 tại các biên mô

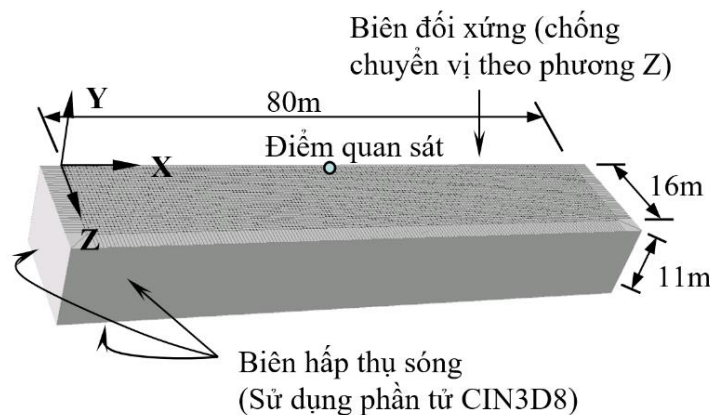
hình (hình 1b) [4]. Phần tử này có khả năng hấp thụ sóng, từ đó ngăn được hiện tượng sóng phản xạ ảnh hưởng xấu đến kết quả mô phỏng [6].



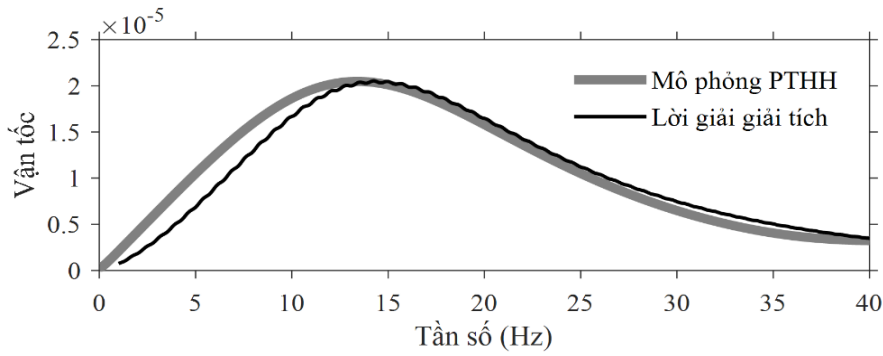
Hình 1. Minh họa phần tử C3D8R và CIN3D8.

Hệ phương trình chuyển động PTHH được giải bằng phương pháp sai phân trung tâm nửa bước (half-step central difference method). Theo [6], phương pháp này phù hợp cho các bài truyền sóng có kích thước mô hình lớn.

Để kiểm chứng phương pháp mô phỏng, tác giả xét bài toán: Tải trọng di động trên hệ ray đặt trên nền đàn hồi đồng nhất. Trong đó, tải trọng có dạng tải đơn vị di động với vận tốc 60 m/s; nền có các đặc trưng vật liệu: khối lượng riêng 1800 kg/m³, vận tốc sóng cắt $V_S = 65$ m/s và vận tốc sóng Rayleigh $V_R = 60.3$ m/s. Bài toán được giải bằng hai phương pháp: phương pháp giải tích [8] và mô phỏng PTHH. Mô hình PTHH được trình bày trên hình 2. Kết quả dao động tại điểm quan sát được trình bày trên hình 3, so sánh hai đường nhận thấy phương pháp mô phỏng PTHH cho kết quả rất sát với lời giải giải tích trong toàn bộ phạm vi tần số quan trọng.



Hình 2. Mô hình PTHH (bài toán kiểm chứng).



Hình 3. Phổ biên độ dao động tại điểm quan sát

3. Nghiên cứu các đặc trưng dao động nền

3.1. Tải trọng, nền đất và mô hình PTHH

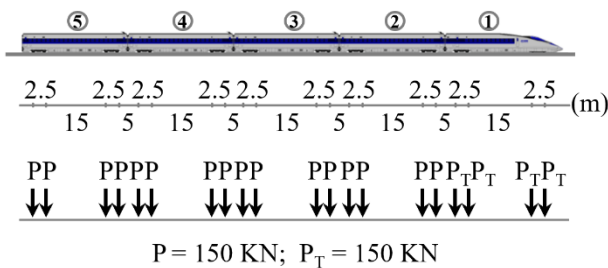
Đoàn tàu Shinkanshen 05 toa được sử dụng trong tính toán. Mỗi toa có 04 trục bánh; khoảng cách giữa các trục bánh và tải trọng trên mỗi trục được trình bày trên hình 4. Hệ ray và tà vẹt có các tham số đặc trưng $d = 0.5 \text{ m}$ và $\beta = 1.25 \text{ m}^{-1}$ (xem [5]).

Nền gồm lớp ba lát, lớp cát pha, hai lớp sét và lớp cát; phía dưới là tầng đá cứng. Bảng 1 trình bày các tham số vật liệu dùng trong bài toán truyền sóng, trong đó: V_S là vận tốc sóng cắt, V_R là vận tốc sóng Rayleigh và ρ là khối lượng riêng. Mô hình cản Rayleigh được sử dụng để đặc trưng cho tất cả cơ cấu tiêu tán năng lượng của hệ. Các tham số tỷ lệ độ cứng và khối lượng: $\alpha = 2.4$ và $\beta = 0.000675$. Các giá trị này cho ra tỷ số cản 4÷6% trong phạm vi tần số 3÷40 Hz.

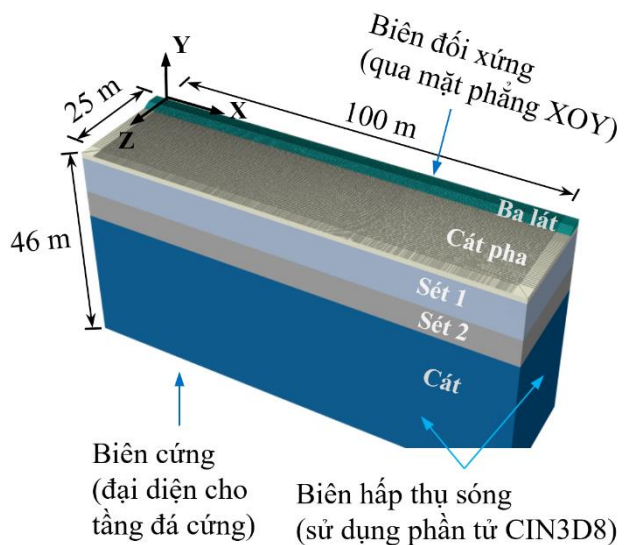
Bảng 1. Các tham số vật liệu.

Vật liệu	Chiều dày (m)	V_S (m/s)	V_R (m/s)	ρ (kg/m ³)
Ba lát	1.2	210	194.8	2000
Cát pha	1.0	63	58.5	1900
Sét 1	7.8	60	55.7	1800
Sét 2	6.0	87	80.7	1800
Cát	30	98	90.9	1850

Tác giả sử dụng phương pháp đã trình bày trong phần 2 để xây dựng mô hình PTHH (hình 5). Kiểu phần tử C3D8R được sử dụng cho ba lát và các lớp đất. Điều kiện biên chống chuyển vị theo phương Z được áp dụng cho biên đối xứng của mô hình. Điều kiện biên chống chuyển vị theo tất cả các phương được áp dụng cho đáy mô hình để mô tả tầng đá cứng. Trên các biên còn lại, phần tử vô hạn CIN3D8 được sử dụng để tạo biên hấp thụ sóng.



Hình 4. Tải trọng đoàn tàu.



Hình 5. Mô hình phần tử hữu hạn.

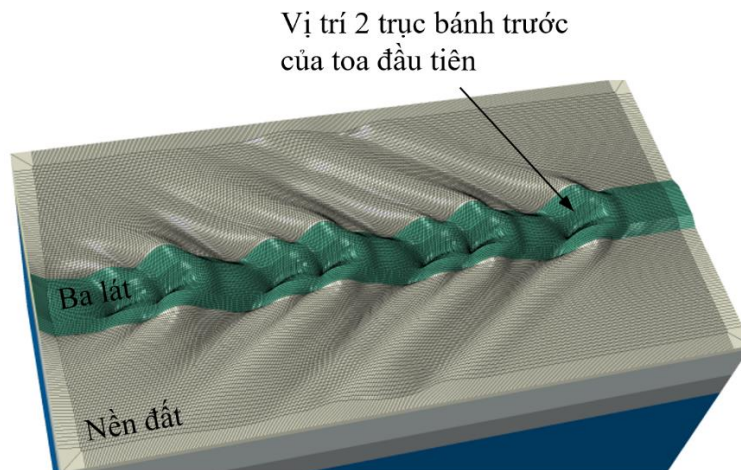
3.2. Trường sóng mặt do tàu sinh ra

Khi tàu chạy với vận tốc 60 m/s (216 km/h), tàu sinh ra sóng lan truyền trên mặt đất. Để quan sát được sóng, tác giả đã phóng đại trường chuyển vị lên 2000 lần (hình 6). Có thể nhận thấy sóng do tàu cao tốc có dạng gần giống như sóng trên mặt nước bởi tàu thủy gây ra. Mỗi tải trọng trục bánh tạo ra một trường sóng. Trường sóng trên hình 6 chính là cộng tác dụng của tất cả các trường sóng do từng tải trọng trục bánh. Quan sát đỉnh và chân sóng cho thấy sóng có biên độ lớn gần vị trí tải và biên độ giảm dần khi càng xa vị trí tải trọng tàu.

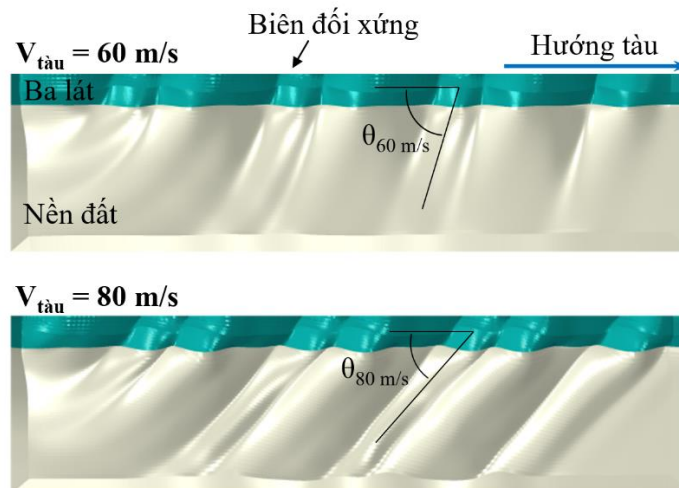
3.3. Góc hợp bởi mặt sóng và hướng tàu chạy

Hình 7 trình bày kết quả mô phỏng sóng mặt (quan sát trên mặt bằng) cho hai trường hợp tàu chạy với vận tốc 60 m/s và 80 m/s (216 km/h và 288 km/h). Để quan sát thuận lợi, các đường lưới

phần tử trên hình đã được làm ẩn. Quan sát các mặt sóng cho thấy mặt sóng hợp với trục tàu một góc θ . So sánh góc θ giữa hai trường hợp trên hình 7: $\theta_{80m/s} < \theta_{60m/s}$. Nghĩa là khi tàu chạy càng nhanh, góc hợp bởi mặt sóng và trục tàu càng giảm. Dựa vào nghiên cứu lý thuyết [9], tác giả giải thích hiện tượng trên như sau. Sự hình thành sóng mặt và độ lớn góc θ phụ thuộc vào quan hệ giữa vận tốc tàu và vận tốc sóng sóng Rayleigh (V_R) của vật liệu. Cụ thể hơn, khi vận tốc tàu tiệm cận V_R , sóng mặt xuất hiện. Khi vận tốc tàu càng tăng lên so với V_R , góc θ càng giảm. Hình 5 và bảng 1 cho thấy lớp đất trên cùng là cát pha có $V_R = 58.5$ m/s. Trong khi đó, hai vận tốc tàu đang xét (60 m/s và 80 m/s) đều lớn hơn V_R . Như vậy, cả hai trường hợp vận tốc tàu đều sinh ra sóng mặt và trường hợp vận tốc tàu 80 m/s cho ra góc θ nhỏ hơn so với trường hợp 60 m/s như thể hiện trên hình 7.



Hình 6. Trường sóng mặt do tàu sinh ra.



Hình 7. So sánh trường sóng mặt ở 2 vận tốc tàu khác nhau.

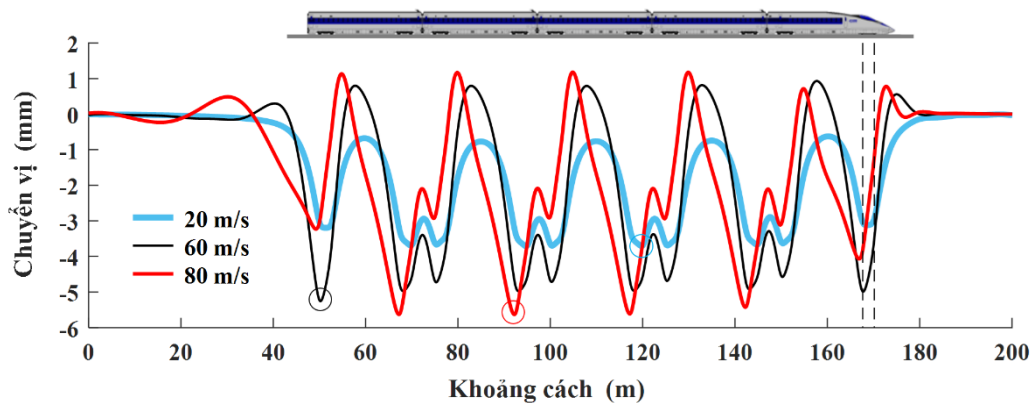
3.4. Chuyển vị nền dọc theo chiều dài tàu

Hình 8 trình bày chuyển vị mặt ba lát dọc theo chiều dài tàu (di chuyển cùng tàu) cho ba trường hợp vận tốc tàu: 20 m/s, 60 m/s và 80 m/s (72 km/h, 216 km/h và 288 km/h). Quan sát đường chuyển vị khi vận tốc tàu $V_{tàu} = 20$ m/s, tại vị trí hai trục bánh trước của toa đầu tiên, các đỉnh chuyển vị có vị trí gần như trùng với vị trí các trục bánh của tàu. Khi vận tốc tàu tăng lên, sự lệch pha bắt đầu xuất hiện giữa tàu và đường chuyển vị. Cụ thể là khi $V_{tàu} = 60$ m/s, tàu di chuyển nhanh hơn đường chuyển vị khoảng 1.1 m. Khi $V_{tàu} = 80$ m/s, tàu di chuyển nhanh hơn đường chuyển vị khoảng 1.5 m. Qua đó cho thấy, nếu tàu chạy càng nhanh thì tàu càng vượt lên phía trước so với trường chuyển vị bên dưới tàu. Hiện tượng này có thể được giải thích dựa theo nghiên cứu lý thuyết [10]. Theo đó, khi tàu có vận tốc càng lớn hơn vận tốc sóng mặt Rayleigh

của nền, tàu sẽ di chuyển càng nhanh pha hơn so với trường chuyển vị.

Hình 8 cho thấy các đỉnh chuyển vị tương ứng với các cặp trục bánh của tàu. Quan sát vị trí các toa 2, 3 và 4, khi tàu chạy ở vận tốc càng cao, chuyển vị ứng với cặp trục bánh trước càng lớn hơn chuyển vị ứng với cặp trục bánh sau của mỗi toa. Hình 8 cũng cho thấy vị trí có chuyển vị lớn nhất thay đổi khi vận tốc tàu thay đổi. Cụ thể, khi $V_{tàu} = 20$ m/s, chuyển vị lớn nhất có vị trí ứng với cặp trục bánh trước của toa 3 (được đánh dấu tròn trên hình). Khi $V_{tàu} = 60$ m/s, chuyển vị lớn nhất có vị trí ứng với cặp trục bánh sau của toa cuối. Khi $V_{tàu} = 80$ m/s, chuyển vị lớn nhất có vị trí ứng với cặp trục bánh trước của toa 4.

Qua hình 8, biên độ dao động tăng dần khi vận tốc tàu tăng. Điều này ngụ ý vận tốc tàu có ảnh hưởng quan trọng đến dao động nền. Vấn đề này được khảo sát trong phần tiếp theo.



Hình 8. Chuyển vị nền dọc theo chiều dài tàu.

3.5. Ảnh hưởng của vận tốc tàu đến dao động

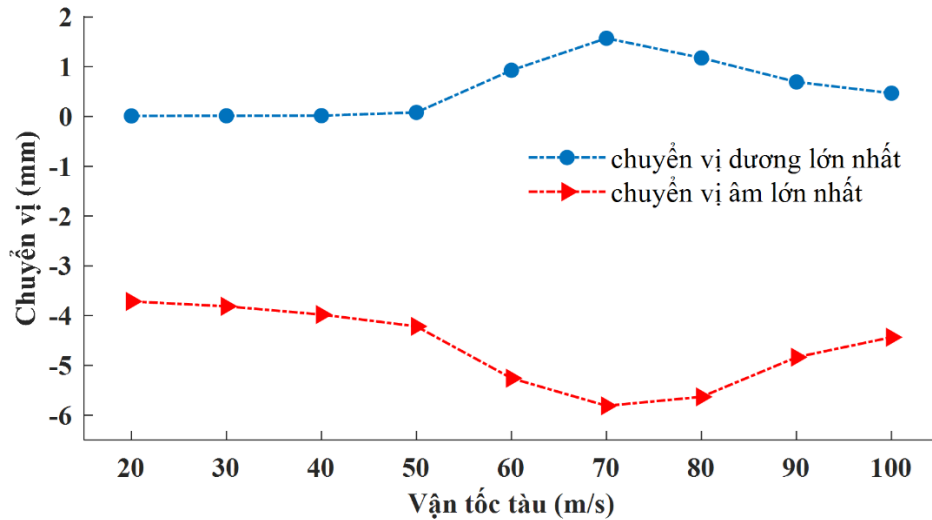
Để hiểu rõ hơn ảnh hưởng của vận tốc tàu đến biên độ dao động nền, tác giả mô phỏng dao động cho 10 trường hợp vận tốc tàu từ 20 m/s đến 100 m/s (72 km/h đến 360 km/h). Trong mỗi trường hợp, chuyển vị dương lớn nhất và âm lớn nhất trên mặt ba lát được ghi lại. Các kết quả được trình bày trên hình 9 dưới dạng quan hệ vận tốc tàu và chuyển vị.

Hình 9 cho thấy khi vận tốc tàu tăng, biên độ dao động tăng. Tuy nhiên biên độ không tăng đơn điệu theo vận tốc tàu mà đạt giá trị lớn nhất tại vận tốc 70 m/s (252 km/h) và giảm dần khi vận

tốc vượt giá trị này. Quan sát này có thể được diễn giải như sau. Theo lý thuyết truyền sóng do tải trọng di động, một hệ có tính chất phân tán vật liệu sẽ bị chi phối bởi một vài dạng sóng riêng (generalized modal waves) với các vận tốc truyền sóng riêng. Khi tải trọng có vận tốc tiến sát vận tốc sóng riêng của hệ thì tải trọng sẽ khuếch đại dao động lên cực trị [11]. Hệ đang khảo sát là nền phân lớp nên hệ có tính chất phân tán vật liệu, đồng thời hình 9 cho thấy ứng xử của hệ bị chi phối chính bởi một dạng sóng riêng có vận tốc truyền sóng khoảng 70 m/s. Khi vận tốc tàu đạt tới vận tốc sóng riêng này thì biên độ dao động nền được khuếch đại lên cực trị.

Vận tốc tàu làm cho dao động nền bị khuếch đại lớn nhất được gọi là vận tốc tới hạn V_{cr} (critical speed). V_{cr} có ý nghĩa quan trọng đối với sự an toàn vận hành của tàu. Nếu tàu chạy với vận tốc gần với V_{cr} của hệ thì dao động nền lớn có thể làm cho tàu bị trật khỏi ray. Để tránh nguy

cơ này, tốc độ vận hành của tàu cần được khống chế nhỏ hơn V_{cr} một khoảng an toàn. Ví dụ, [12] kiến nghị: $V_{tàu} < 0.6 V_{cr}$, nghĩa là để tàu vận hành an toàn qua một khu vực thì tốc độ của tàu không nên vượt quá 60% vận tốc tới hạn đặc trưng của khu vực đó.



Hình 9. Quan hệ vận tốc tàu và biên độ dao động.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, tác giả đã mô phỏng sóng trong nền đất do tàu cao tốc sinh ra, từ đó khảo sát được các đặc trưng dao động nền: Sự lan truyền sóng mặt; góc hợp bởi mặt sóng và hướng tàu chạy; chuyển vị mặt nền dọc theo chiều dài tàu; ảnh hưởng của vận tốc tàu đến dao động nền.

Khi chạy ở vận tốc cao, tàu sinh ra trường sóng lan truyền trên mặt đất và có dạng gần giống như sóng nước do tàu thủy gây ra. Mặt sóng hợp với trục tàu một góc θ . Sự hình thành sóng và độ lớn góc θ phụ thuộc vào quan hệ giữa vận tốc tàu và vận tốc sóng Rayleigh (V_R) của nền. Khi vận tốc tàu tiệm cận V_R , sóng mặt xuất hiện và khi vận tốc tàu càng tăng lên so với V_R thì góc θ càng giảm. Khi vận tốc tàu thấp, trường chuyển vị nền bên dưới tàu (di chuyển cùng tàu) không bị chậm pha so với tàu. Tuy nhiên, khi vận tốc tàu càng lớn hơn so với V_R của nền, tàu càng vượt lên phía trước (nhanh pha hơn) so với trường chuyển vị nền bên dưới tàu.

Vận tốc tàu có ảnh hưởng quan trọng đến dao động nền. Khi vận tốc tàu tăng, biên độ dao động nền tăng. Tuy nhiên, biên độ không tăng đơn điệu

theo vận tốc tàu mà đạt giá trị lớn nhất tại một vận tốc gần với vận tốc sóng riêng đặc trưng (generalized modal waves) của nền đất. Vận tốc này chính là vận tốc tới hạn của hệ. Dao động nền lớn tại vận tốc tới hạn có thể dẫn đến sự mất an toàn vận hành của tàu. Để tránh nguy cơ này, tốc độ vận hành của tàu không được gần với vận tốc tới hạn của hệ.

Tài liệu tham khảo

- [1] P. V. Ký, L. H. Hà; “Giáo trình thiết kế đường sắt”. Hà Nội, Việt Nam: NXB Giao thông vận tải. 2005.
- [2] L. V. Cừ; “Kết cấu tầng trên đường sắt”. Hà Nội, Việt Nam: NXB Xây dựng. 2013.
- [3] L. V. Cừ; “Động lực học đường sắt cao tốc và ứng dụng”. Hà Nội, Việt Nam: NXB Xây dựng. 2016.
- [4] Dassault Systèmes Simulia Corp.; “ABAQUS 6.14 theory manuals”; Providence, RI, USA; 2014.
- [5] P. N. Thạch; “Phương pháp tạo tải trọng tàu cao tốc trong mô hình phần tử hữu hạn để mô phỏng dao động nền theo miền thời gian”. Tạp chí Khoa

- học công nghệ Giao thông vận tải. 2022; 11(2):1-6. DOI:10.55228/JTST.11(2).1-6.
- [6] T. Belytschko, W. Liu, B. Moran, K. Elkhodary; “Nonlinear finite elements for continua and structures”. Second Edition. NJ, USA: John Wiley & Sons. 2014.
- [7] Y. Yang, H. Hung; “Wave propagation for train-induced vibrations”. MA, USA: World Scientific. 2009.
- [8] V. Krylov; “Chapter 9: Generation of ground vibration boom by high-speed trains”; in Noise and vibration from high-speed trains. London, UK: Thomas Telford; 2001; pp. 251-284.
- [9] F. C. P. de Barros, J. E. Luco; “Response of a layered viscoelastic half-space to a moving point load”. Wave Motion. 1994; 19(2):189–210. DOI:10.1016/0165-2125(94)90066-3.
- [10] J. Barber; “Surface displacements due to a steadily moving point force”. Journal of Applied Mechanics. 1996; 63(2):245–51. DOI:10.1115/1.2788856.
- [11] H. -H. Hung, Y. -B. Yang; “Elastic waves in viscoelastic half-space generated by various vehicle loads”. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2001; 21(1):1–17. DOI:10.1016/S0267-7261(00)00078-6.
- [12] California High Speed Rail Authority; “California High-Speed Train Project Design Criteria”; Sacramento, CA, USA; 2013.