



TỔNG QUAN VỀ PHƯƠNG PHÁP GIA CỐ NỀN CỌC BÊ TÔNG KẾT HỢP LƯỚI ĐỊA KỸ THUẬT (GRPS) TRONG XÂY DỰNG CÔNG TRÌNH ĐƯỜNG SẮT TỐC ĐỘ CAO

GEOSYNTHETIC-REINFORCED PILED EMBANKMENTS (GRPS) IN HIGH-SPEED RAILWAY CONSTRUCTION: A REVIEW

Bùi Mạnh Hà*, Nguyễn Văn Đức

Trường Đại học Giao Thông Vận Tải Thành phố Hồ Chí Minh

DOI: <https://doi.org/10.65934/mkusj.2026.44.1247>

*Email: 24958020505@ut.edu.vn

Ngày nhận bài: 12/06/2026

Ngày phản biện: 20/06/2026

Ngày duyệt bài: 28/08/2026

TÓM TẮT

Sự phát triển của hệ thống đường sắt tốc độ cao đang đặt ra yêu cầu ngày càng cao đối với khả năng chịu tải, độ ổn định và kiểm soát biến dạng của nền đường, đặc biệt tại các khu vực có điều kiện địa chất yếu. Trong số các giải pháp xử lý nền hiện nay, gia cố nền cọc bê tông kết hợp lưới địa kỹ thuật (Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankment – GRPS) được đánh giá là một trong những giải pháp phù hợp nhờ khả năng kết hợp cơ chế chịu tải của hệ cọc với hiệu ứng phân phối tải của lớp lưới địa kỹ thuật và hiệu ứng vòm đất trong nền đắp. Bài báo tổng hợp các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến cấu tạo, cơ chế làm việc, các phương pháp nghiên cứu và xu hướng ứng dụng hệ GRPS trong công trình đường sắt tốc độ cao. Trên cơ sở đó, bài báo phân tích các khoảng trống nghiên cứu còn tồn tại và đề xuất định hướng phát triển phù hợp với điều kiện nền đất yếu tại Việt Nam.

Từ khóa: GRPS; nền đất yếu; đường sắt tốc độ cao.

ABSTRACT

The development of high-speed railway systems is imposing increasingly stringent requirements on load-bearing capacity, stability, and deformation control of railway subgrades, particularly in areas with weak geological conditions. Among the currently available ground improvement solutions, the Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankment (GRPS) system has been recognized as one of the most suitable approaches due to its ability to combine the load-bearing mechanism of pile foundations with the load redistribution effect of geosynthetic reinforcement and the soil arching effect within the embankment. This paper reviews previous domestic and international studies related to the structural configuration, working mechanisms, research methodologies, and application trends of GRPS systems in high-speed railway engineering. Based on this review, the paper identifies existing research gaps and proposes future development directions that are more compatible with weak soil conditions in Vietnam.

Keywords: GRPS; weak soil, high-speed railway.

GIỚI THIỆU

Trong chiến lược phát triển kết cấu hạ tầng giao thông của Việt Nam, đường sắt tốc độ cao được xác định là một trong những công trình trọng điểm nhằm nâng cao năng lực vận tải, tăng cường liên kết vùng và tạo động lực phát triển kinh tế – xã hội. Phần lớn hướng tuyến được bố trí lệch về phía đông, bám theo vùng đồng bằng duyên hải, đặc trưng địa chất của vùng đồng bằng ven biển

có nhiều khu vực địa chất yếu lớp đất yếu có chiều dày lớn và đặc tính biến dạng phức tạp.

Khác với công trình đường bộ, nền đường sắt tốc độ cao không chỉ chịu tải trọng lớn mà còn chịu tải trọng động do tàu chạy với tần suất cao trong suốt quá trình khai thác. Các hiện tượng lún tổng thể, chênh lệch lún và biến dạng dư có thể làm suy giảm độ bằng phẳng tuyến, ảnh hưởng đến an toàn vận hành và tuổi thọ công trình. Vì vậy, việc

lựa chọn giải pháp xử lý nền phù hợp có ý nghĩa quyết định đối với hiệu quả khai thác lâu dài của hệ thống đường sắt tốc độ cao.

Hiện nay, nhiều giải pháp xử lý nền đất yếu đã được áp dụng trong công trình giao thông như cọc xi măng đất, cọc khoan nhồi, cọc cát và gia tải trước kết hợp thoát nước thẳng đứng.

Cọc xi măng đất là giải pháp gia cường nền thông qua quá trình trộn đất tại chỗ với chất kết dính nhằm tăng cường độ và giảm tính nén lún của đất. Giải pháp này có ưu điểm về tốc độ thi công, khả năng áp dụng trên diện rộng và chi phí đầu tư tương đối hợp lý. Tuy nhiên, hiệu quả làm việc phụ thuộc đáng kể vào tính đồng nhất của hỗn hợp đất – xi măng, điều kiện nước ngầm và công nghệ thi công. Đối với công trình đường sắt tốc độ cao, yêu cầu kiểm soát biến dạng lâu dài và tải trọng động khiến phương pháp này còn tồn tại những hạn chế nhất định.

Cọc khoan nhồi hoặc các dạng cọc bê tông chịu lực có khả năng truyền tải xuống lớp đất tốt ở chiều sâu lớn và cho hiệu quả kiểm soát lún cao. Tuy nhiên, khi áp dụng trên các tuyến công trình kéo dài, giải pháp này sẽ tăng chi phí đầu tư và thời gian thi công, đồng thời chưa khai thác được cơ chế phân phối tải trên diện rộng của nền đắp.

Đối với cọc cát và các giải pháp thoát nước thẳng đứng, cơ chế gia cường nền chủ yếu làm tăng nhanh tốc độ cố kết và cải thiện điều kiện thoát nước của đất yếu. Đây là nhóm giải pháp phù hợp với các công trình cho phép thời gian chờ lún, tuy nhiên hiệu quả kiểm soát biến dạng dưới tải trọng động còn hạn chế khi áp dụng cho công trình yêu cầu độ ổn định cao như đường sắt tốc độ cao.

So với các giải pháp trên, gia cố nền cọc bê tông kết hợp lưới địa kỹ thuật (GRPS) được xem là một hướng tiếp cận phù hợp hơn. Giải pháp này kết hợp khả năng chịu tải của hệ cọc với cơ chế phân phối tải thông qua lớp lưới địa kỹ thuật và hiệu ứng vòm đất trong nền đắp. Nhờ đó, tải trọng được truyền ưu tiên xuống đầu cọc, làm giảm ứng suất tác dụng lên đất yếu, đồng thời nâng cao khả năng kiểm soát độ lún và chênh lệch lún của nền đường.

Nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy, GRPS có tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong công trình đường sắt tốc độ cao nhờ khả năng giảm biến dạng và nâng cao độ ổn định khai thác dưới tác động của tải trọng động. Tuy nhiên, các vấn đề liên quan đến cơ chế truyền lực, tương tác đất – cọc – lớp lưới địa gia cường và ứng xử động của hệ nền vẫn còn cần tiếp tục nghiên cứu nhằm hoàn thiện cơ sở khoa học cho thiết kế và ứng dụng trong điều kiện địa chất Việt Nam [19], [20].

Bảng 1. So sánh các giải pháp xử lý nền đất yếu.

Phương pháp	Cơ chế chính	Ưu điểm	Nhược điểm	Mức độ phù hợp ĐSTĐC
Cọc xi măng đất	Tăng cường độ nền	Thi công nhanh	Khó kiểm soát biến dạng dài hạn	Trung bình
Cọc khoan nhồi	Truyền tải xuống lớp tốt	Chịu tải cao	Chi phí lớn	Khá
Cọc cát	Tăng tốc cố kết	Kinh tế	Hạn chế với tải động	Trung bình
GRPS	Cọc + vải địa + hiệu ứng vòm	Giảm lún, lún lệch	Thiết kế phức tạp hơn	Rất phù hợp

(Nguồn: tác giả tổng hợp)

Từ những phân tích trên có thể thấy rằng GRPS là giải pháp có nhiều triển vọng đối với công trình đường sắt tốc độ cao trên nền đất yếu. Việc tổng hợp và đánh giá có hệ thống các kết quả nghiên cứu hiện có là cần thiết nhằm làm rõ cơ chế làm việc của hệ, xác định khoảng trống nghiên cứu và định hướng ứng dụng trong điều kiện Việt Nam.

Bài báo tổng hợp, phân tích và đánh giá các

kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến giải pháp gia cố nền bằng cọc kết hợp lưới địa kỹ thuật (GRPS) ứng dụng cho công trình đường sắt tốc độ cao trên nền đất yếu. Làm rõ cơ chế làm việc của hệ GRPS, đánh giá xu hướng phát triển các phương pháp nghiên cứu hiện nay và xác định các khoảng trống nghiên cứu phục vụ định hướng nghiên cứu tiếp theo phù hợp với điều kiện Việt Nam.

Phạm vi tập trung vào các nghiên cứu công bố trong giai đoạn 2010–2026, ưu tiên các tài liệu có liên quan trực tiếp đến nền đắp gia cố cọc chịu tải động, nền đường sắt tốc độ cao, hiệu ứng vòm đất, cơ chế truyền tải của lớp địa kỹ thuật và mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Các nghiên cứu chỉ xét nền đắp đường bộ thông thường hoặc không phân tích cơ chế truyền tải của hệ GRPS được sử dụng ở mức tham khảo đối chiếu.

Nguồn tài liệu được thu thập từ các cơ sở dữ liệu khoa học quốc tế và trong nước gồm các bài báo thuộc hệ thống cơ sở dữ liệu khoa học quốc tế, tạp chí chuyên ngành, kỷ yếu hội nghị khoa học, luận án và tiêu chuẩn kỹ thuật liên quan. Các từ khóa tìm kiếm chính bao gồm: “GRPS”, “pile-supported embankment”, “high-speed railway”, “soil arching effect”, “geosynthetic reinforcement”, “dynamic response”, “finite element analysis”, và các từ khóa tương đương bằng tiếng Việt.

Việc lựa chọn tài liệu được thực hiện theo các tiêu chí: (i) mức độ liên quan đến chủ đề nghiên cứu; (ii) độ tin cậy của nguồn công bố; (iii) mức độ trích dẫn và tính cập nhật của kết quả; (iv) khả năng cung cấp thông tin về cơ chế làm việc, phương pháp nghiên cứu hoặc kết quả ứng dụng thực tế.

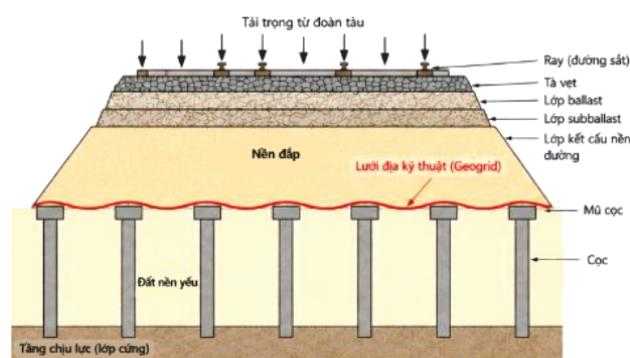
Sau khi sàng lọc, các tài liệu được phân nhóm theo bốn nhóm nội dung chính: (1) nghiên cứu về cấu tạo và cơ chế làm việc của hệ GRPS; (2) nghiên cứu về hiệu ứng vòm đất và cơ chế phân phối tải; (3) nghiên cứu thực nghiệm, mô hình số và mô phỏng động; (4) nghiên cứu ứng dụng trong công trình đường sắt tốc độ cao và định hướng phát triển trong điều kiện nền đất yếu.

1. Cơ sở lý thuyết.

Khái quát về hệ nền cọc bê tông kết hợp lưới địa kỹ thuật (GRPS).

Nền đắp gia cường cọc kết hợp lưới địa kỹ thuật (GRPS) là giải pháp xử lý nền đất yếu sử dụng đồng thời hệ cọc chịu lực và lớp lưới địa kỹ thuật nhằm tăng khả năng truyền tải trọng, hạn chế biến dạng và nâng cao ổn định tổng thể của nền đắp. Khác với các giải pháp gia cố nền truyền thống chỉ tập trung cải thiện đặc tính cơ học của đất nền hoặc tăng tốc độ cố kết, GRPS khai thác cơ chế làm việc tổng hợp giữa cọc – nền đắp – lớp lưới địa kỹ thuật gia cường để phân phối lại ứng suất trong toàn hệ thống.

Một hệ GRPS điển hình bao gồm các thành phần chính: nền đất yếu tự nhiên, hệ cọc gia cố, mũ cọc truyền lực, lớp lưới địa kỹ thuật và nền đắp phía trên. Trong đó, cọc có nhiệm vụ tiếp nhận phần lớn tải trọng và truyền xuống lớp đất có khả năng chịu lực tốt hơn; mũ cọc tạo vùng chuyển tiếp ứng suất; còn lớp lưới địa kỹ thuật làm việc chủ yếu theo cơ chế chịu kéo nhằm hỗ trợ phân phối tải trọng và giảm chênh lệch biến dạng.



Hình 1. Sơ đồ cấu tạo một hệ GRPS

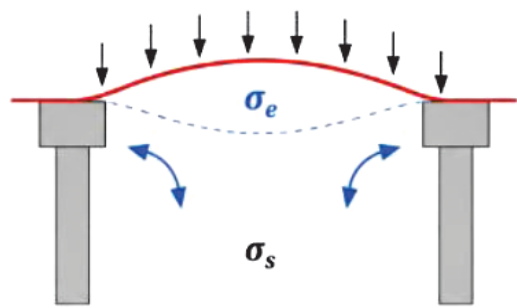
Đối với công trình đường sắt tốc độ cao, nền đường phải duy trì độ bằng phẳng trong suốt thời gian khai thác và chịu tác động tải trọng động lặp với chu kỳ lớn. Vì vậy, việc sử dụng GRPS không chỉ nhằm giảm độ lún tổng thể mà còn hướng tới kiểm soát lún không đều, giảm tích lũy biến dạng dư và nâng cao độ ổn định động của kết cấu nền đường.

Cơ chế làm việc của hệ GRPS

Hiệu quả của hệ GRPS được hình thành từ sự tương tác đồng thời giữa nền đắp, hệ cọc, lớp lưới địa kỹ thuật gia cường và nền đất tự nhiên. Các nghiên cứu hiện nay cho thấy khả năng làm việc của hệ phụ thuộc chủ yếu vào ba cơ chế gồm hiệu ứng vòm đất, hiệu ứng màng kéo của lớp lưới địa kỹ thuật và tương tác đất – cọc.

Hiệu ứng vòm đất

Hiệu ứng vòm đất được xem là cơ chế truyền lực quan trọng nhất của hệ GRPS. Khi nền đắp chịu tải, sự khác biệt lớn về độ cứng giữa đầu cọc và nền đất yếu làm cho ứng suất không truyền đồng đều mà có xu hướng tập trung về các vùng có độ cứng lớn hơn. Kết quả là tải trọng được chuyển phần lớn xuống đầu cọc thay vì truyền trực tiếp xuống nền đất yếu.



Do chênh lệch độ cứng giữa cọc và đất yếu, ứng suất chuyển dịch về phía cọc, hình thành vòm đất và giảm tải truyền trực tiếp xuống đất yếu.

Hình 2. Hiệu ứng vòm đất

Hiệu ứng này làm giảm đáng kể ứng suất tác dụng lên nền đất giữa các cọc, từ đó hạn chế độ lún tổng thể và giảm chênh lệch lún. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số đã chỉ ra rằng mức độ phát triển của vòm đất phụ thuộc vào chiều cao nền đắp, khoảng cách cọc, hình học đầu cọc và độ cứng tương đối giữa các thành phần của hệ.

Đối với đường sắt tốc độ cao, tải trọng tác dụng thay đổi liên tục theo thời gian và vị trí, làm cho hiệu ứng vòm không còn mang tính ổn định như trường hợp tải tĩnh. Khi chịu tải trọng tàu di động, sự phát triển và suy giảm của hiệu ứng vòm có thể ảnh hưởng trực tiếp đến phân bố ứng suất và biến dạng của nền đường.

Hiệu ứng màng kéo của lớp vải địa gia cường

Bên cạnh hiệu ứng vòm đất, lớp lưới địa kỹ thuật đóng vai trò quan trọng trong việc hỗ trợ phân phối tải thông qua cơ chế màng kéo. Khi nền đất giữa các đầu cọc xuất hiện chuyển vị lớn hơn vùng đầu cọc, lớp gia cường bị kéo căng và phát sinh nội lực kéo, từ đó tạo ra thành phần lực hướng lên giúp chuyển tải trọng về vùng đầu cọc.



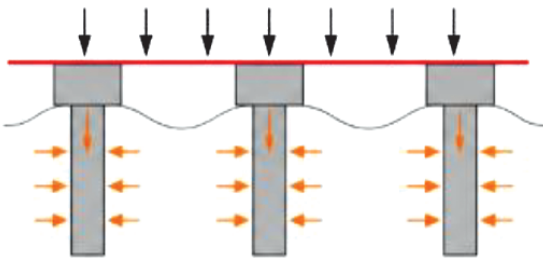
Lưới địa kỹ thuật biến dạng võng xuống giữa các đầu cọc và sinh lực kéo (tension), phân phối lại tải trọng và hạn chế lún cục bộ.

Hình 3. Hiệu ứng màng kéo

Cơ chế này làm giảm tập trung ứng suất, tăng tính đồng đều biến dạng và cải thiện hiệu quả làm việc tổng thể của nền đắp. Hiệu quả của lớp gia cường phụ thuộc vào độ cứng kéo, vị trí bố trí, số lớp gia cường và đặc tính biến dạng của nền đất.

Tương tác đất – cọc và cơ chế truyền lực

Ngoài hiệu ứng vòm và hiệu ứng màng kéo, tương tác giữa đất nền và hệ cọc cũng quyết định đáng kể đến ứng xử của hệ GRPS. Do sự khác biệt về mô đun biến dạng giữa các thành phần, lực ma sát dọc thân cọc và quá trình tái phân bố ứng suất theo chiều sâu đóng vai trò quan trọng trong việc xác định khả năng chịu tải và độ lún của hệ.



Tải trọng từ nền đắp được truyền xuống đầu cọc và dọc thân cọc nhờ sức kháng của đất, từ đó giảm biến dạng tổng thể của nền.

Hình 4. Tương tác đất – cọc

Các nghiên cứu cho thấy các thông số như chiều dài cọc, khoảng cách cọc, đường kính cọc, chiều dày lớp đệm và độ cứng của lớp địa kỹ thuật đều có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả làm việc của nền gia cố. Trong đó, việc tối ưu hóa các thông số nói trên đang trở thành xu hướng nghiên cứu hiện nay.

2. Xu hướng nghiên cứu hiện nay về hệ GRPS

Sự phát triển của phương pháp GRPS trong những năm gần đây gắn liền với sự phát triển của các phương pháp nghiên cứu hiện đại, bao gồm thí nghiệm hiện trường, mô hình vật lý và mô phỏng số.

Các nghiên cứu thực nghiệm hiện trường tập trung đánh giá độ lún, phân bố ứng suất và khả năng làm việc lâu dài của nền gia cố trong điều kiện khai thác thực tế. Trong khi đó, các mô hình vật lý như mô hình ly tâm được sử dụng để phân tích cơ chế vòm đất và tương tác giữa các thành phần của hệ.

Song song với thực nghiệm, mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn đang trở thành công cụ nghiên cứu phổ biến nhờ khả năng mô tả

chi tiết ứng xử phi tuyến của nền đất và tải trọng động. Các mô hình ba chiều cho phép đánh giá ảnh hưởng của tải tàu di động, đặc tính vật liệu và cấu tạo nền gia cố tới ứng xử tổng thể của công trình.

Xu hướng nghiên cứu hiện nay không chỉ dừng ở việc đánh giá riêng lẻ các tham số thiết kế mà đang chuyển sang xây dựng các mô hình tích hợp xét đồng thời hiệu ứng vòm đất, tương tác đất – cọc – lớp lưới địa kỹ thuật và tác động của tải trọng động nhằm nâng cao độ tin cậy của thiết kế nền đường sắt tốc độ cao.

3. Khoảng trống nghiên cứu và định hướng phát triển ứng dụng GRPS cho đường sắt tốc độ cao.

Kết quả tổng hợp các nghiên cứu cho thấy nền đắp gia cường cọc kết hợp lưới địa kỹ thuật (GRPS) đã chứng minh được hiệu quả đáng kể trong việc cải thiện khả năng chịu tải, giảm độ lún và nâng cao độ ổn định của công trình trên nền đất yếu. Các nghiên cứu trong những năm gần đây đã từng bước làm rõ cơ chế truyền lực, sự hình thành hiệu ứng vòm đất, vai trò của lớp gia cường và ảnh hưởng của các thông số thiết kế đến ứng xử tổng thể của hệ. Tuy nhiên, xét dưới góc độ ứng dụng cho công trình đường sắt tốc độ cao, nhiều vấn đề vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ:

Thứ nhất, phần lớn các nghiên cứu hiện nay vẫn tập trung vào điều kiện tải trọng tĩnh hoặc tải phân bố tương đương. Trong khi đó, tải trọng do đoàn tàu tốc độ cao tạo ra có bản chất động học phức tạp, thay đổi liên tục theo thời gian và vị trí, gây ra quá trình tái phân bố ứng suất và tích lũy biến dạng khác biệt đáng kể so với trường hợp tải trọng tĩnh. Các nghiên cứu đánh giá ứng xử của GRPS dưới tải trọng tàu di động thực còn tương đối hạn chế và chưa hình thành cơ sở dữ liệu đủ lớn để phục vụ xây dựng tiêu chuẩn thiết kế.

Thứ hai, cơ chế tương tác giữa nền đất, hệ cọc và lớp lưới địa kỹ thuật vẫn chưa được mô tả đầy đủ trong nhiều mô hình hiện hành. Nhiều nghiên cứu vẫn dựa trên giả thiết đơn giản hóa về phân bố ứng suất hoặc điều kiện tiếp xúc giữa các thành phần, dẫn đến sai khác giữa kết quả tính toán và ứng xử thực tế của nền đường. Đặc biệt, ảnh hưởng của biến dạng phi tuyến, điều kiện bão hòa nước và quá trình phát triển ứng suất theo thời gian vẫn còn là chủ đề cần tiếp tục nghiên cứu.

Thứ ba, phần lớn các nghiên cứu quốc tế hiện được xây dựng trên điều kiện địa chất khác biệt đáng kể so với điều kiện nền đất yếu phổ biến tại Việt Nam. Trong khi đó, các khu vực đồng bằng và ven biển nước ta thường có lớp đất yếu dày, độ bão hòa cao và khả năng biến dạng lớn. Điều này làm hạn chế khả năng áp dụng trực tiếp các thông số thiết kế và kết quả nghiên cứu quốc tế vào thực tế trong nước.

Một vấn đề khác cần được quan tâm là việc thiếu hệ thống tiêu chuẩn và hướng dẫn thiết kế chuyên sâu đối với nền GRPS cho công trình đường sắt tốc độ cao. Hiện nay, việc lựa chọn thông số thiết kế chủ yếu dựa trên kinh nghiệm hoặc tham khảo tiêu chuẩn quốc tế, trong khi chưa có quy trình đánh giá đồng bộ đối với điều kiện địa chất và yêu cầu khai thác tại Việt Nam.

Trên cơ sở các khoảng trống nghiên cứu đã xác định, định hướng phát triển trong thời gian tới cần tập trung vào bốn nhóm nội dung chính, đồng thời cần xem xét khả năng thích ứng với điều kiện nền đất yếu và yêu cầu khai thác đường sắt tốc độ cao tại Việt Nam:

Nhóm thứ nhất là hoàn thiện cơ sở lý thuyết về cơ chế truyền tải và tương tác trong hệ GRPS dưới tác dụng của tải trọng động đoàn tàu tốc độ cao, làm rõ ảnh hưởng của hiệu ứng vòm đất, hiệu ứng màng của lớp lưới địa kỹ thuật và sự làm việc đồng thời giữa nền – cọc.

Nhóm thứ hai là phát triển các mô hình số và mô hình thực nghiệm phục vụ đánh giá ứng xử dài hạn của hệ GRPS, trong đó xét đến đặc điểm nền đất yếu phổ biến tại Việt Nam như đất bùn sét mềm, chiều dày lớp đất yếu lớn và điều kiện mực nước ngầm cao.

Nhóm thứ ba là nghiên cứu tối ưu hóa cấu hình kết cấu GRPS (chiều dài cọc, khoảng cách cọc, kích thước mũ cọc, độ cứng lớp lưới địa gia cường và vật liệu nền đắp) nhằm đáp ứng yêu cầu kiểm soát lún và hiệu quả kinh tế trong điều kiện thi công thực tế tại Việt Nam.

Nhóm thứ tư là xây dựng cơ sở dữ liệu, tiêu chí thiết kế và quy trình đánh giá phù hợp cho ứng dụng GRPS trong công trình đường sắt tốc độ cao tại Việt Nam thông qua kết hợp mô phỏng, quan trắc hiện trường và đối chiếu với kinh nghiệm quốc tế.

Như vậy, mặc dù GRPS đã chứng minh được nhiều ưu điểm trong xử lý nền đất yếu, việc mở rộng ứng dụng cho công trình đường sắt tốc độ cao vẫn cần tiếp tục nghiên cứu theo hướng tích hợp giữa lý thuyết, mô phỏng số và kiểm chứng thực nghiệm nhằm nâng cao độ tin cậy của thiết kế và khả năng triển khai trong thực tế.

KẾT LUẬN

Bài báo đã tổng hợp và phân tích các kết quả nghiên cứu liên quan đến nền đắp gia cường cọc kết hợp lưới địa kỹ thuật (GRPS) ứng dụng cho công trình đường sắt tốc độ cao. Trên cơ sở tổng quan các công trình đã công bố, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

(1) So với các giải pháp xử lý nền truyền thống như cọc xi măng đất, cọc khoan nhồi hoặc cọc cát, hệ GRPS cho thấy nhiều ưu điểm trong việc kết hợp khả năng truyền tải của hệ cọc với hiệu ứng phân phối tải của lớp lưới địa kỹ thuật và hiệu ứng vòm đất, từ đó nâng cao hiệu quả kiểm soát độ lún và độ ổn định của nền đường.

(2) Hiệu quả làm việc của hệ GRPS phụ thuộc chủ yếu vào ba cơ chế gồm hiệu ứng vòm đất, hiệu ứng màng kéo của lớp lưới địa gia cường và tương tác đất – cọc. Các yếu tố như chiều dài cọc, khoảng cách cọc, độ cứng của lớp gia cường và điều kiện địa chất nền có ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng truyền lực và biến dạng của hệ.

(3) Xu hướng nghiên cứu hiện nay đang chuyển từ các mô hình giải tích và đánh giá tải trọng tĩnh sang các nghiên cứu tích hợp giữa mô phỏng số, thí nghiệm thực nghiệm và tải trọng động nhằm mô tả sát hơn điều kiện khai thác thực tế của đường sắt tốc độ cao.

(4) Mặc dù đã đạt được nhiều kết quả tích cực, các nghiên cứu hiện nay vẫn còn tồn tại khoảng trống liên quan đến tải trọng tàu di động, tương tác phi tuyến đất – cọc – lớp lưới địa gia cường và điều kiện nền đất yếu đặc thù của Việt Nam.

(5) Trong thời gian tới, cần tiếp tục nghiên cứu theo hướng tích hợp giữa lý thuyết, mô phỏng số và kiểm chứng thực nghiệm, đồng thời xây dựng cơ sở khoa học phục vụ hoàn thiện hướng dẫn kỹ thuật và tiêu chuẩn thiết kế nền đường sắt tốc độ cao trên nền đất yếu ứng dụng công nghệ GRPS.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Alsirawan, R. (2021). Review of GRPS embankments – parametric study and design methods. *Acta Technica Jaurinensis*, 14(3), 295–319.

Ariyaratne, P., & Liyanapathirana, D. S. (2015). Review of existing design methods for geosynthetic-reinforced pile-supported embankments. *Soils and Foundations*, 55(1), 126–141.

Bian, X., Liu, S., Duan, X., et al. (2024). Dynamic soil arching effect in pile-supported embankment due to train passages at high speeds. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178, Article 108481.

Butzner, M., Leslie, D. L., Cuffee, Y., Hollenbeak, C. S., Sciamanna, C., & Abraham, T. (2021). Stable rates of obstructive hypertrophic cardiomyopathy in a contemporary era. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 8, Article 765876.

Dang, C. C., Dang, L. C., Khabbaz, H., & Sheng, D. (2021). Numerical study on deformation characteristics of fibre-reinforced load-transfer platform. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(12), 1888–1900.

Edries, N. M., et al. (2023). Estimation of piled embankment critical height: A systematic review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), Article 28.

Gupta, R. K., & Chawla, S. (2022). Performance evaluation of micropiles as a ground improvement technique for existing railway tracks. *International Journal of Geomechanics*, 22(8), Article 04022123.

Gupta, S., & Kumar, S. (2023). A state-of-the-art review of the deep soil mixing technique for ground improvement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(2), Article 58.

Holtz, R. D., Shang, J. Q., & Bergado, D. T. (2001). Soil improvement. Trong R. K. Rowe (Biên tập), *Geotechnical and geoenvironmental engineering handbook* (tr. 429–461). Springer.

Hou, R. Y., Zheng, J. J., Fang, H., & Yang, W. Y. (2024). A mechanical model and solution for dynamic response of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment under traveling loads. *International Journal of Geomechanics*, 24(4), Article 04024031.

Li, T. F., Cai, D., Cheng, Z. B., et al. (2022). Study of deformation and failure states of reinforced mesh cushion in high-speed railway. Trong *Proceedings of the 5th International Conference on Railway Engineering* (tr. 112–124). Springer.

- Liu, C., Shan, Y., Wang, B., et al. (2022). Reinforcement load in geosynthetic-reinforced pile-supported embankments. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(4), 745–758.
- Liu, K. F., Feng, W. Q., Cai, Y. H., Xu, H., & Wu, P. C. (2023). Physical model study of pile type effect on long-term settlement under traffic loading. *Transportation Geotechnics*, 41, Article 101012.
- Liu, S., Bian, X., & Zhao, C. (2025). Static and dynamic responses of GRPS of high-speed railway. Trong *ICTG 2025 Proceedings: Transportation Geotechnics* (tr. 45–56). Springer.
- Liu, W., Qu, S., Zhang, H., & Nie, Z. (2017). An integrated method for analyzing load transfer in geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(3), 687–702.
- Nguyen, V. D., Luo, Q., Wang, T., et al. (2023). Load transfer in geosynthetic-reinforced piled embankments with a triangular arrangement of piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(9), Article 04023068.
- Niu, T., Yang, Y., Ma, Q., et al. (2023). Dynamic soil arching in piled embankment under train load of high-speed railways. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 22(4), 1015–1028.
- Nobahar, M., Abu-Farsakh, M. Y., & Izadifar, M. (2024). Evaluating the mechanisms and performance of geosynthetic-reinforced load transfer platform. *Geotextiles and Geomembranes*, 52(2), 214–228.
- Pan, G., Liu, X., Yuan, S., et al. (2022). A field study on the arching behavior of a geogrid-reinforced floating pile-supported embankment. *Transportation Geotechnics*, 37, Article 100854.
- Pham, H. V., & Dias, D. (2020). 3D modeling of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment under cyclic loading. *Geosynthetics International*, 27(6), 612–626.
- Pham, T. A., & Dias, D. (2021a). 3D numerical study of the performance of geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments. *Soils and Foundations*, 61(4), 1038–1053.
- Pham, T. A., & Dias, D. (2021b). Comparison and evaluation of analytical models for the design of geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(4), 978–994.
- Pham, T. A., Tran, Q. A., Villard, P., & Dias, D. (2024). Numerical analysis of geosynthetic-reinforced and pile-supported embankments considering integrated soil-structure interactions. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(3), 1845–1862.
- Roshan, M. J., et al. (2022). Improved methods to prevent railway embankment failure and subgrade degradation: A review. *Transportation Geotechnics*, 34, Article 100746.
- Thai, L. N., Duc, M. N., & Hai, H. N. (2021). Analysis of impacting factors for soil-cement column combined high strength geogrid. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, 15(2), 45–56.
- Wang, H. L., & Chen, R. P. (2019). Estimating static and dynamic stresses in GRPS track-bed under train moving loads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(9), Article 04019051.
- Wang, H. L., Chen, R. P., Liu, Q. W., et al. (2019). Investigation on geogrid reinforcement and pile efficacy in GRPS track-bed. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(4), 521–534.
- Wang, K., Cao, J., Ye, J., Qiu, Z., & Wang, X. (2024). Discrete element analysis of geosynthetic-reinforced pile-supported embankments. *Construction and Building Materials*, 449, Article 138412.
- Wu, D., Luo, C., Gao, Z., et al. (2022). Effect of different reinforced load transfer platforms on GRPS. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(8), 3350–3362.
- Xu, C., Zeng, Q., & Yang, Y. (2021). Centrifuge testing on the global stability of geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(12), Article 1142.
- Yan, M., Guo, S., Zhang, H., Song, X., & Xiao, H. (2025). Investigation on load transfer in geosynthetic-reinforced pile-supported embankments. *Indian Geotechnical Journal*, 55(1), 112–125.