

# ĐÁNH GIÁ SO SÁNH CÁC GIẢI PHÁP XỬ LÝ NỀN ĐẤT YẾU CHO NỀN ĐƯỜNG QUANH HỒ BÚN XÁNG, THÀNH PHỐ CẦN THƠ

COMPARATIVE EVALUATION OF SOFT GROUND IMPROVEMENT METHODS FOR ROAD EMBANKMENTS AROUND BUN XANG LAKE, CAN THO CITY

➤ **TS. Nguyễn Thanh Tâm** - Trường Kỹ thuật và Công nghệ, Đại học Trà Vinh.

Email: Tamxd@tvu.edu.vn - Phone: 0982.284.405

➤ **Ths. Kỳ Minh Hưng** - Khoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Trà Vinh.

Tác giả liên hệ Email: kmhung12@tvu.edu.vn - Phone: 0947.014.050

**Tóm tắt:** Đê đường xung quanh hồ Bún Xáng ở thành phố Cần Thơ nằm trên nền đất rất mềm, đặc trưng bởi lớp đất sét phù sa dày, hàm lượng nước tự nhiên cao, sức chịu tải thấp, độ nén cao và mực nước ngầm nông. Những đặc điểm địa chất và thủy lực bất lợi này đã dẫn đến nguy cơ sụt lún, biến dạng và mất ổn định mái dốc đáng kể, khiến việc xây dựng đê trực tiếp trên nền đất tự nhiên không phù hợp. Nghiên cứu này đánh giá các phương pháp cải tạo nền đất thay thế để ổn định nền đường xung quanh hồ, đặc biệt nhấn mạnh vào phương pháp trộn sâu xi măng như một giải pháp tiềm năng. Một khung đánh giá tuần tự đã được áp dụng, bao gồm xem xét điều kiện hiện trường, xác định các phương pháp xử lý khả thi và đánh giá kỹ thuật so sánh. Bốn phương pháp tiêu biểu đã được xem xét chi tiết, đó là cọc tre và cọc tràm, cọc bê tông cốt thép, gia cố bằng vải địa kỹ thuật và trộn sâu xi măng. Bên cạnh đánh giá kỹ thuật định tính, phân tích đa tiêu chí bằng số đã được thực hiện bằng Python. Các phương pháp được lựa chọn đã được đánh giá bằng thang điểm lợi ích năm cấp dựa trên các tiêu chí như khả năng tương thích với đất sét mềm sâu, cải thiện ổn định tổng thể, kiểm soát sụt lún, tăng cường sức chịu tải, khả năng thích ứng thủy lực, khả năng thi công, thân thiện với môi trường và tính khả thi về kinh tế. Trọng số tiêu chí được xác định bằng phương pháp Phân tích thứ bậc (AHP), và thứ hạng cuối cùng được thu được thông qua phương pháp TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), với phân tích độ nhạy Monte Carlo được sử dụng để kiểm tra tính ổn định của thứ hạng. Kết quả cho thấy cọc tre và cọc tràm chỉ phù hợp với các ứng dụng tải trọng nhẹ, cọc bê tông cốt thép có khả năng chịu tải cao nhưng lại có những nhược điểm đáng kể về thi công và kinh tế, còn gia cố bằng vải địa kỹ thuật chủ yếu hiệu quả như một biện pháp ổn định bổ sung. Trong số các phương pháp được đánh giá, phương pháp trộn sâu xi măng thể hiện hiệu suất tổng thể thuận lợi và ổn định nhất vì nó trực tiếp cải thiện cường độ và độ cứng của đất yếu, tăng cường ổn định tổng thể, giảm lún và biến dạng ngang, và có thể được áp dụng hiệu quả trong điều kiện hạn chế của khu vực ven sông đô thị.

**Từ khóa:** Đất yếu; ổn định nền đường; cọc đất gia cố xi măng; hồ Bún Xáng; phân tích đa tiêu chí

**Abstract:** The road embankment around Bun Xang Lake in Can Tho City is located on very soft ground characterized by thick alluvial clay, high natural water content, low bearing capacity, high compressibility, and shallow groundwater conditions. These unfavorable geological and hydraulic characteristics have led to significant risks of settlement, deformation, and slope instability, making direct embankment construction on natural ground unsuitable. This study evaluates alternative ground improvement methods for stabilizing the roadbed around the lake, with particular emphasis on cement deep mixing as a potential solution. A sequential assessment framework was adopted, including site-condition review, identification of feasible treatment methods, and comparative technical evaluation. Four representative methods were examined in detail, namely bamboo and Melaleuca piles, reinforced concrete piles, geotextile reinforcement, and cement deep mixing. In addition to qualitative engineering assessment, a numerical multi-criteria analysis was implemented in Python. The selected methods were evaluated using a five-level benefit scale based on criteria such as compatibility with deep soft clay, global stability improvement, settlement control, bearing-capacity enhancement, hydraulic adaptability, constructability, environmental friendliness, and economic practicality. Criterion weights were determined using the Analytic Hierarchy Process (AHP), and the final ranking was obtained through the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), with Monte Carlo sensitivity analysis used to test ranking robustness. The results show that bamboo and Melaleuca piles are only suitable for light-load applications, reinforced concrete piles provide high capacity but involve significant construction and economic disadvantages, and geotextile reinforcement is effective mainly as a supplementary stabilization measure. Among the evaluated methods, cement deep mixing demonstrates the most favorable and robust overall performance because it directly improves the strength and stiffness of the weak soil, enhances global stability, reduces settlement and lateral deformation, and can be applied efficiently under constrained urban waterfront conditions.

**Keywords:** Soft soil; cement deep mixing; Bun Xang Lake; Can Tho City; ground improvement

## 1. Đặt vấn đề

Thành phố Cần Thơ nằm ở trung tâm Đồng bằng sông Cửu Long, nơi môi trường xây dựng chịu sự chi phối mạnh mẽ của quá trình bồi tụ phù sa, mực nước ngầm nông và sự tương tác giữa các quá trình sông ngòi và thủy triều [1]. Thành phố được bao phủ bởi mạng lưới sông, kênh rạch dày đặc và đã nhiều lần xảy ra tình trạng ngập lụt, xói lở bờ sông và biến dạng công trình hạ tầng trên nền đất yếu, như thể hiện trong Hình 1. Trong những năm gần đây, biến đổi khí hậu, đô thị hóa và sự mở rộng các công trình giao thông dọc theo các thủy vực tự nhiên và nhân tạo đã làm gia tăng nhu cầu về các phương pháp cải tạo nền đất đáng tin cậy. Vấn đề này đặc biệt nghiêm trọng đối với các dự án kết hợp chức năng thoát nước, cảnh quan và giao thông tại các khu vực đô thị trung thấp [2]. Hồ Bún Xáng là một trong những vị trí nhạy cảm như vậy. Hồ đóng vai trò thoát nước và điều tiết nước cho thành phố, đồng thời được bao quanh bởi các tuyến đường địa phương và lối tiếp cận khu dân cư. Tuy nhiên, các tuyến kè xung quanh hồ được hình thành trên nền đất rất yếu, và một số đoạn đã xuất hiện các dấu hiệu rõ ràng về biến dạng, lún sụt và mất ổn định cục bộ của mái dốc.

Mặt cắt địa chất xung quanh hồ Bún Xáng không thuận lợi cho việc xây dựng trực tiếp nền đường/kè. Dữ liệu khảo sát hiện trường cho thấy có một lớp đất sét mềm dày, lẫn vật chất hữu cơ, với chiều dày khoảng từ 19,2 m đến 29,5m. Đất thường ở trạng thái chảy đến rất mềm, có độ ẩm tự nhiên cao khoảng 45–64%, hệ số rỗng lớn và cường độ không thoát nước rất thấp. Giá trị thí nghiệm xuyên tiêu chuẩn SPT nhìn chung nằm trong khoảng từ 0 đến 7. Những đặc tính này cho thấy đất có tính nén lún cao, sức kháng cắt thấp và có xu hướng mạnh gây lún lâu dài cũng như chuyển vị ngang dưới tác dụng của tải trọng đắp. Khi mực nước ngầm và mực nước hồ dao động, trạng thái ứng suất trở nên bất lợi hơn, làm tăng khả năng xảy ra mất ổn định của mái dốc về phía hồ. Vì vậy, bất kỳ giải pháp ổn định nào cho nền đường xung quanh hồ cũng phải giải quyết đồng thời cả vấn đề sức chịu tải và ổn định tổng thể.



Hình 1. Xói lở bờ sông và bờ hồ tại thành phố Cần Thơ

Nhiều phương án xử lý khác nhau đã được sử dụng ở Đồng bằng sông Cửu Long để cải thiện nền đất yếu, bao gồm cọc tràm, cọc bê tông cốt thép, gia cường bằng vải địa kỹ thuật, giếng cát, bắc thấm đứng, đắp gia tải trước và các giải pháp kết hợp giữa cọc với bản kết cấu [3]. Mỗi phương pháp đều có ưu điểm và hạn chế riêng. Cọc tràm truyền thống có chi phí thấp nhưng chỉ phù hợp với các công trình chịu tải nhẹ và không thể đảm bảo hiệu quả lâu dài đáng tin cậy cho các công trình giao thông đô thị quan trọng. Hệ cọc bê tông cốt thép kết hợp bản sàn có thể mang lại khả năng chịu tải cao, nhưng chi phí lớn, thi công phức tạp và có thể gây ảnh hưởng đến các công trình lân cận. Ngược lại, phương pháp trộn sâu xi măng trực tiếp biến đổi đất yếu thành một vật liệu tổ hợp cứng hơn và bền hơn, đồng thời cho phép xử lý tập trung vào vùng quan trọng nhất. Do đó, nghiên cứu này sẽ đánh giá chi tiết các phương pháp này nhằm cung cấp cơ sở để lựa chọn giải pháp phù hợp cho các khu vực lân cận có đặc điểm địa chất tương tự.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu này áp dụng một khung đánh giá tuần tự để xác định các phương pháp cải tạo nền thích hợp nhằm ổn định đê đường quanh hồ Bún Xáng, thành phố Cần Thơ. Trước hết, các đặc điểm địa chất và thủy lực của khu vực được xem xét dựa trên dữ liệu khảo sát hiện có và các tài liệu nền, tập trung vào lớp đất sét phù sa dày và mềm, độ ẩm tự nhiên cao, sức chịu tải thấp, độ nén cao, mực nước ngầm nông và các dao động thủy lực do mưa và biến đổi mực nước hồ gây ra. Tiếp theo, điều kiện hiện trường được phân tích thông qua thông tin địa hình và địa kỹ thuật như hình dạng bờ hồ, tuyến đường, cao độ mặt đất và cấu trúc địa tầng. Dữ liệu SPT được sử dụng như một chỉ số về độ chặt của đất và sức kháng tương đối, xác nhận rằng điều kiện nền yếu không phù hợp để xây dựng trực tiếp đê mà không có biện pháp xử lý. Cuối cùng, các phương án cải tạo nền khả thi được nhận dạng và sàng lọc, bao gồm cọc gỗ, giếng cát, bắc thấm đứng, hút chân không, đê đối trọng, thấm cát, gia cường bằng vải địa kỹ thuật, hệ thống cọc bê tông cốt thép, và hệ cọc kết hợp bản sàn và cột đất trộn xi măng. Các phương án này được đánh giá sơ bộ dựa trên khả năng áp dụng cho lớp đất sét mềm sâu, mức độ đóng góp vào việc ổn định mái dốc, tính khả thi trong thi công ở môi trường ven hồ đô thị, tác động môi trường và hiệu quả kinh tế.

Để bổ sung cho bước sàng lọc định tính, một đánh giá đa tiêu chí số đã được thực hiện bằng Python. Các phương án được lựa chọn được chuyển thành ma trận quyết định, trong đó mỗi phương án

được chấm điểm theo thang lợi ích năm cấp (1–5) đối với các tiêu chí như khả năng phù hợp với lớp đất sét mềm sâu, cải thiện ổn định tổng thể, kiểm soát lún, tăng cường sức chịu tải, khả năng thích ứng thủy lực, khả năng thi công, thân thiện môi trường và tính khả thi kinh tế. Trong số của các tiêu chí được xác định bằng phương pháp phân tích thứ bậc (AHP) và thứ hạng cuối cùng được xác định bằng phương pháp TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Ngoài ra, phân tích độ nhạy Monte Carlo được thực hiện bằng cách thay đổi trọng số tiêu chí trong một phạm vi nhất định để kiểm tra độ bền vững của kết quả thứ hạng. Dựa trên kết quả đánh giá định tính và định lượng tích hợp, các phương án xử lý thích hợp nhất cho đề đường quanh hồ Bún Xáng đã được xác định.

### 3. Các phương pháp tăng cường ổn định nền đất yếu

#### 3.1. Cọc tre và cọc tràm

Cọc tre và cọc tràm là giải pháp xử lý nền truyền thống cho các công trình có tải trọng nhẹ trên nền đất yếu. Cọc tre và cọc tràm, chiều dài từ 3–6m, được đóng xuống để gia cố nền đất, qua đó tăng khả năng chịu tải và giảm lún. Hiện nay chưa có lý thuyết tính toán cụ thể, do đó sức chịu tải và lún của nền cọc tre hoặc cọc tràm được ước tính bằng các phương pháp tính toán thông thường. Cọc tre và cọc tràm không được đóng ở đất cát vì đất cát không giữ nước; chúng thường chỉ được đóng trong đất sét có nước, với mật độ khoảng 16–25 cọc/m<sup>2</sup>. Cọc tre và cọc tràm có thể được đóng thủ công hoặc bằng máy, và thi công chỉ thực hiện được ở những khu vực có mực nước ngầm cao để tránh mối mọt và các loại côn trùng khác phá hoại trong quá trình sử dụng. Chúng chỉ được sử dụng cho các công trình có yêu cầu tải trọng thấp.

#### 3.2. Cọc bê tông cốt thép

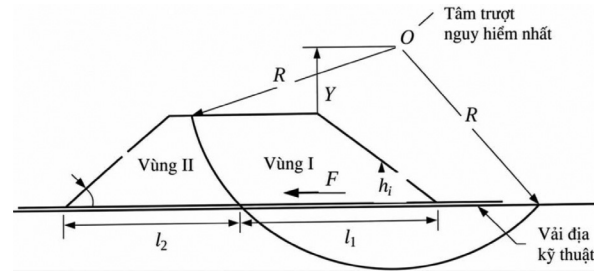
Phạm vi áp dụng: các công trình cần sức chịu tải cao; sử dụng ở các khu vực bị xói mòn do nước và khí, các công trình ven biển và các khu vực có mực nước ngầm thay đổi.

Cấu tạo phổ biến hiện nay là cọc đặc, tiết diện vuông, chiều dài  $L = (3–24)m$ , tiết diện cọc từ  $20 \times 20cm$  đến  $45 \times 45cm$ , và trọng lượng mỗi cọc khoảng (0,3–10) tấn. Để bảo vệ đầu cọc và mũi cọc, thường bố trí cốt thép dày hơn tại các vị trí này. Công nghệ thi công: hạ cọc bằng búa treo, búa diesel, búa khí nén; hạ cọc bằng biện pháp xói nước; hạ cọc bằng máy ép cọc.

#### 3.3. Giải pháp vải địa kỹ thuật

Trong hệ thống gia cố này, đề được chia thành

hai vùng: (I) Vùng hoạt động, tương ứng với khối trượt, và (II) Vùng bị động, nơi vải địa kỹ thuật đóng vai trò lớp neo. Vải địa kỹ thuật chịu một lực kéo  $F$  (T/m), trong khi  $Y$  biểu thị cánh tay đòn của  $F$  đối với tâm trượt nguy hiểm nhất  $O$  như thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Vải địa kỹ thuật dùng để gia cường các lớp nền đất yếu [4]

Trong nghiên cứu này, phương pháp gia cố vải địa kỹ thuật được xem như một biện pháp ổn định cho các đề xây dựng trên nền đất yếu. Lớp gia cố được đặt tại mặt phân cách giữa vật liệu đắp và nền đất yếu nhằm huy động sức kháng kéo và cải thiện độ ổn định của đề. Nguyên tắc thiết kế dựa trên điều kiện rằng lực kéo phát triển trong vải địa kỹ thuật không được vượt quá sức kháng kéo cho phép của một dải vải rộng 1m, được biểu diễn bởi biểu thức sau:

$$F \leq F_{cp} \quad (1)$$

Sức kháng kéo cho phép được xác định dựa trên tiêu chí cường độ vật liệu và tiêu chí ma sát cho phép tại mặt tiếp xúc. Theo yêu cầu về cường độ vật liệu,  $F_{cp}$  được tính như sau:

$$F_{cp} = \frac{F_{\max}}{k} \quad (2)$$

Trong đó:  $F_{\max}$  là cường độ kéo giới hạn của tấm vải địa kỹ thuật rộng 1m, và  $k$  là hệ số an toàn. Theo thực hành thông thường,  $k=2$  được áp dụng cho vải địa kỹ thuật polyester, trong khi  $k=5$  được sử dụng cho vải địa kỹ thuật polypropylene hoặc polyethylene.

Ngoài ra, sức kháng cho phép còn được kiểm tra theo sức kháng ma sát được huy động dọc theo lớp gia cường trong cả vùng chủ động và vùng bị động của nền đất. Các sức kháng này phụ thuộc vào chiều dài gia cường trong vùng chủ động ( $l_1$ ) và vùng bị động ( $l_2$ ), dung trọng của đất đắp ( $\gamma_d$ ), chiều cao lớp đất đắp phía trên vải địa kỹ thuật ( $h_i$ ), và hệ số ma sát cho phép tại mặt tiếp xúc ( $f'$ ).

Sức kháng kéo cho phép trong vùng chủ động được xác định như sau:

$$F_{cp,active} = \sum_0^{l_1} \gamma_d h_i f' \quad (3)$$

Hệ số ma sát cho phép tại mặt tiếp xúc được ước tính bằng:

$$f' = k' \left( \frac{2}{3} \right) \tan \varphi \quad (4)$$

Trong đó:  $\varphi$  là góc ma sát trong của đất đắp nền đường, tương ứng với điều kiện đầm nén thực tế tại hiện trường, và  $k' = 0,66$  là hệ số dự trữ ma sát.

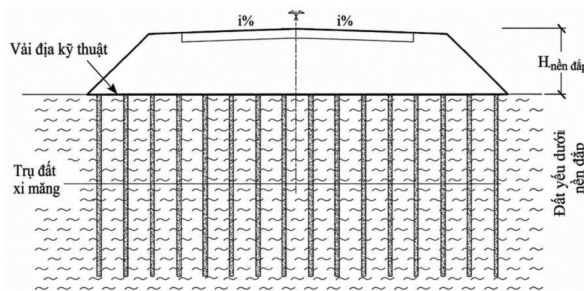
Để tăng cường hơn nữa hiệu quả gia cường, và địa kỹ thuật có thể được bố trí thành nhiều lớp, thường từ 1 đến 4 lớp, với các lớp đất đắp được đầm chặt dày khoảng 15–30cm đặt giữa các lớp gia cường liên kế. Cách bố trí này được kỳ vọng sẽ làm tăng ma sát tại mặt tiếp xúc, cải thiện sự phân bố lại ứng suất trong nền đắp và lớp đất yếu bên dưới, giảm độ lún và lún lệch, đồng thời tăng cường tính ổn định tổng thể của hệ nền đắp.

### 3.4. Giải pháp cọc đất gia cố xi măng

#### Tổng quan về trụ đất gia cố xi măng

Trước đây, phương pháp cải tạo nền bằng cách trộn vôi được áp dụng rộng rãi ở Việt Nam. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, nhờ tiến bộ về công nghệ thi công, sự du nhập của thiết bị nước ngoài và sự quan tâm nghiên cứu gia tăng, các trụ đất gia cố xi măng được ứng dụng rộng rãi hơn trong kỹ thuật đê kè. Phương pháp này đặc biệt phù hợp cho các công trình chịu tải trọng cao như đường lán và sân đỗ máy bay, cơ sở cảng; các công trình đòi hỏi độ ổn định cao như mố cầu cao, bãi đúc cấu kiện bê tông và khu vực lưu trữ; cũng như các dự án cải tạo nền cục bộ trong khu vực thi công hạn chế.

Một cấu hình điển hình của giải pháp xử lý nền yếu bằng trụ đất gia cố xi măng được minh họa trong Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ giải pháp cọc đất gia cố xi măng [5]

Hiệu quả của việc xử lý đất bằng xi măng hoặc vôi nói chung giảm khi độ ẩm và hàm lượng hữu cơ của đất tăng lên. Tương tự, chỉ số dẻo cao hơn có xu hướng làm giảm hiệu quả cải tạo nền. Đối với đất hữu cơ, xử lý bằng xi măng thường hiệu quả hơn so với xử lý bằng vôi. Tuy nhiên, hiệu quả của xi măng

cũng giảm khi hàm lượng sét và chỉ số dẻo tăng lên. Do đó, đất có tính dẻo càng cao thì cường độ đạt được trong đất xử lý xi măng càng thấp. Trong nền ổn định bằng xi măng, cường độ thu được chủ yếu phụ thuộc vào quá trình kết dính hình thành do phản ứng giữa đất và chất kết dính.

#### Phương pháp thi công trụ đất gia cố xi măng phổ biến

Hiện nay, phương pháp trộn sâu là một trong những kỹ thuật được áp dụng rộng rãi nhất để thi công trụ đất gia cố xi măng, cả trên thế giới và tại Việt Nam, nhờ những ưu điểm về kỹ thuật và môi trường. Phương pháp này có thể áp dụng cho nhiều loại đất, từ bùn mềm, sét đến tầng sỏi. Nó cho phép xử lý cục bộ lớp đất yếu mà không ảnh hưởng đáng kể đến các lớp đất tốt lân cận, có thể thi công dưới nước và chỉ cần diện tích thi công nhỏ. Ngoài ra, phương pháp này tạo ra rung động và tiếng ồn hạn chế, giảm thiểu ảnh hưởng đến các công trình lân cận. Nó cũng khá sạch, giảm ô nhiễm môi trường, sử dụng thiết bị gọn nhẹ phù hợp với các vị trí có chiều cao hạn chế và cho phép thi công nhanh với thời gian dưỡng ngắn, do đó rút ngắn tiến độ dự án.

Trộn sâu là một kỹ thuật cải tạo nền được sử dụng để tăng cường sức chịu tải, kiểm soát biến dạng và giảm tính thấm bằng cách trộn cơ học đất tại chỗ với xi măng và khi cần thiết, các chất kết dính khác ở dạng vữa hoặc khô. Các phần tử xử lý được hình thành dưới dạng cột đất–xi măng. Trong thực tế, các cột này được thi công bằng dụng cụ khoan gắn vào cần khoan, xuyên xuống đất đến độ sâu yêu cầu. Vữa xi măng hoặc xi măng khô sau đó được phun qua các lỗ ở đầu khoan dưới áp lực cao. Các lưỡi trộn xoay gắn trên ống khoan trộn đất tự nhiên với chất kết dính được phun vào, tương tự như một máy trộn đất sét cơ học, tạo ra một cột đất ổn định với các tính chất kỹ thuật được cải thiện.

#### Các ứng dụng chọn lọc của trụ đất gia cố xi măng

Trụ đất gia cố xi măng đã được áp dụng để cải thiện nền đất yếu dưới các đê đường dẫn, nơi việc xây dựng trên đất sét mềm hoặc đất hữu cơ thường gặp khó khăn do biến dạng thẳng đứng và ngang quá lớn. Việc sử dụng cột đất–xi măng có thể nhanh chóng và đáng kể cải thiện độ bền và đặc tính biến dạng của nền. Phương pháp này cũng được sử dụng rộng rãi để gia cố nền yếu cho các công trình giao thông, bãi container và các công trình thủy. Trong ổn định mái dốc, khi đê hoặc taluy đào có độ ổn định không đủ và chịu ứng suất cắt cao, hệ số an toàn chống trượt có thể tăng lên bằng cách gia cố các lớp đất thích hợp bằng các cột đất–xi măng. Các ứng dụng bổ sung bao gồm tạo nền móng đáng tin

cậy cho các tòa nhà cao tầng và công nghiệp, xây dựng hệ thống tường chắn và kè, cũng như ổn định vách đào, đặc biệt trong các hố đào sâu cần kiểm soát thấm.

**4. Diễn giải tổng hợp kết quả đánh giá so sánh**

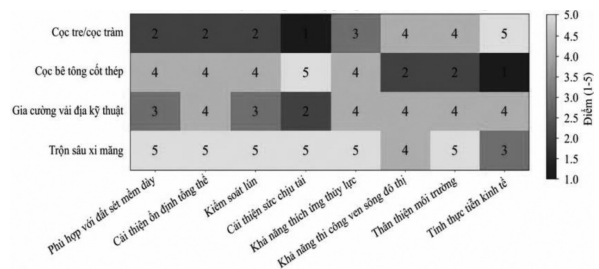
Cuộc đánh giá so sánh được thực hiện bằng thang lợi ích năm cấp từ 1 đến 5, trong đó 1 thể hiện hiệu quả rất kém và 5 thể hiện hiệu quả rất tốt. Các điểm số này phản ánh mức độ phù hợp tương đối của mỗi phương pháp cải tạo nền đối với các điều kiện cụ thể tại hồ Bún Xáng và làm cơ sở để diễn giải các kết quả đồ họa và số liệu trong phần tiếp theo.

Kết quả đánh giá so sánh cho thấy rõ bốn phương pháp cải tạo nền được trình bày trong các mục 3.1-3.4 không phải là các mô tả độc lập mà là những lựa chọn kỹ thuật liên quan được đánh giá dưới cùng điều kiện địa kỹ thuật, thủy lực, thi công và kinh tế của hồ Bún Xáng. Mối quan hệ này được minh họa trước tiên trong bản đồ nhiệt ma trận quyết định (Hình 4), nơi tất cả các phương pháp được chấm điểm dựa trên cùng một tập tiêu chí: khả năng tương thích với đất sét mềm sâu, cải thiện ổn định tổng thể, kiểm soát lún, tăng cường sức chịu tải, khả năng thích ứng thủy lực, khả năng thi công trong môi trường ven sông đô thị, thân thiện môi trường và tính khả thi kinh tế. Bản đồ nhiệt cho thấy sự khác biệt giữa bốn phương pháp không nằm ở một tham số đơn lẻ mà ở toàn bộ hồ sơ kỹ thuật của chúng. Đặc biệt, phương pháp trộn sâu xi măng có điểm số cao đồng đều ở hầu hết các tiêu chí; cọc bê tông cốt thép có hiệu suất cao về sức chịu tải và ổn định nhưng điểm thấp hơn về khả năng thi công và môi trường; gia cường vải địa kỹ thuật đạt điểm tốt về thi công và thân thiện môi trường nhưng trung bình về cải thiện sức chịu tải; trong khi cọc tre và cọc tràm chỉ phù hợp chủ yếu cho các ứng dụng tải nhẹ và chi phí thấp chứ không phải để xử lý nền đất yếu sâu tại khu vực nghiên cứu. Những tương phản này phản ánh trực tiếp các mô tả kỹ thuật được trình bày trong các mục 3.1-3.4.

Việc xác định thang điểm đánh giá trong Hình 4 được xây dựng trên cơ sở kết hợp giữa nguyên lý làm việc của từng giải pháp xử lý nền, đặc điểm nền đất yếu khu vực nghiên cứu và mức độ đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật chủ yếu của nền đường, gồm khả năng kiểm soát độ lún, hạn chế lún lệch, nâng cao ổn định tổng thể, tính phù hợp với chiều sâu lớp đất yếu và điều kiện thi công thực tế. Trong nghiên cứu này, thang điểm từ 1 đến 5 được sử dụng để lượng hóa mức độ đáp ứng của từng phương pháp đối với từng tiêu chí đánh giá, trong đó: điểm 1 thể hiện

mức đáp ứng rất thấp hoặc không phù hợp; điểm 2 thể hiện mức đáp ứng thấp, chỉ phù hợp trong một số điều kiện hạn chế; điểm 3 thể hiện mức đáp ứng trung bình, có thể áp dụng nhưng cần kiểm soát chặt chẽ các điều kiện kỹ thuật; điểm 4 thể hiện mức đáp ứng tốt, phù hợp với phần lớn yêu cầu kỹ thuật của tiêu chí đang xét; và điểm 5 thể hiện mức đáp ứng rất tốt, có hiệu quả nổi trội và phù hợp cao với điều kiện nền đất yếu của khu vực nghiên cứu.

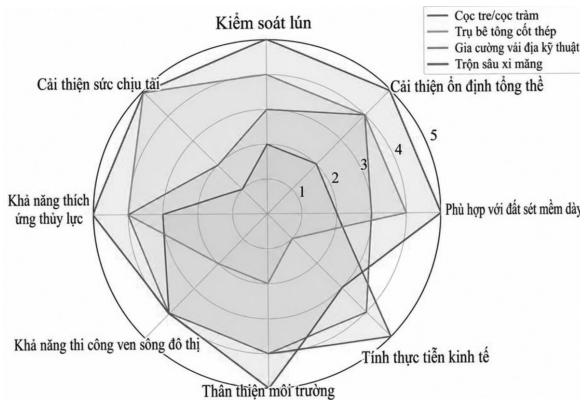
Đối với phương pháp cọc bê tông cốt thép, tải trọng nền đường được truyền xuống các lớp đất sâu hơn có khả năng chịu lực tốt hơn, do đó giải pháp này có hiệu quả cao trong việc giảm lún và tăng sức chịu tải cục bộ. Tuy nhiên, do hệ cọc là các phần tử rời rạc, hiệu quả cải thiện chủ yếu tập trung tại vị trí cọc và phụ thuộc đáng kể vào cấu tạo lớp truyền tải, khoảng cách cọc, chiều dài cọc, ma sát âm, cũng như sự tương tác giữa nền đắp và đất yếu xung quanh. Vì vậy, trong điều kiện nền đường trên đất yếu có yêu cầu kiểm soát lún đều và ổn định tổng thể trên phạm vi rộng, cọc bê tông cốt thép được đánh giá ở mức tốt, tương ứng hệ số điểm 4. Trong khi đó, phương pháp trụ đất xi măng tạo ra vùng đất gia cố dạng khối hoặc dạng lưới, làm tăng đồng thời cường độ chống cắt, mô đun biến dạng và khả năng khống chế biến dạng của nền đất trong toàn vùng xử lý. Cơ chế cải thiện theo thể tích này giúp giảm tổng độ lún, hạn chế lún lệch và nâng cao ổn định trượt tổng thể của nền đường hiệu quả hơn trong điều kiện lớp đất yếu phân bố sâu. Do đó, xét riêng theo tiêu chí độ lún và ổn định tổng thể, trụ đất xi măng được đánh giá ở mức rất tốt, tương ứng hệ số điểm 5.



Hình 4. Bản đồ nhiệt ma trận quyết định dùng để đánh giá so sánh các phương pháp cải tạo nền đất thay thế

Mối quan hệ kỹ thuật giữa các phương pháp được làm rõ thêm bằng biểu đồ radar (Hình 5), biểu diễn hồ sơ hiệu suất của mỗi giải pháp trên tất cả các tiêu chí. Khác với bản đồ nhiệt nhấn mạnh điểm số tuyệt đối, biểu đồ radar cho thấy sự cân bằng hay mất cân bằng của từng phương pháp. Phương pháp trộn sâu xi măng tạo ra đa giác rộng và cân bằng nhất, cho thấy đây là phương pháp duy nhất đáp ứng tốt hầu hết các yêu cầu của hiện trường. Mẫu

đồ họa này phù hợp với thảo luận ở mục 3.4, mô tả phương pháp có khả năng cải thiện cả độ bền và độ cứng trong vùng đất yếu đồng thời duy trì khả năng thi công thuận lợi trong điều kiện ven sông đô thị hạn chế. Cọc bê tông cốt thép cũng thể hiện giá trị cao trong các tiêu chí cấu trúc chính, đặc biệt là sức chịu tải và ổn định, nhưng hồ sơ của chúng thu hẹp đáng kể ở các tiêu chí thi công, kinh tế và môi trường, phù hợp với quá trình thi công xâm lấn hơn và tốn kém hơn. Gia cường vải địa kỹ thuật cho thấy hồ sơ trung bình nhưng tương đối cân bằng, ủng hộ lập luận rằng đây là biện pháp ổn định bổ sung hiệu quả, đặc biệt cho việc gia cố đê nông và kiểm soát biến dạng, mặc dù nó không cung cấp mức độ gia cố sâu như trộn sâu hoặc cọc bê tông. Ngược lại, cọc tre và cọc tràm thể hiện bao kỹ thuật hẹp, xác nhận rằng phạm vi áp dụng của chúng bị giới hạn dưới điều kiện đất sét mềm dày tại hồ Bún Xáng.

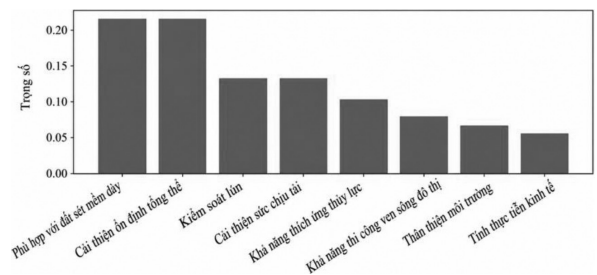


**Hình 5. Biểu đồ radar thể hiện hồ sơ hiệu quả kỹ thuật của bốn phương pháp để xuất**

Tầm quan trọng tương đối của các tiêu chí đánh giá được thể hiện trong biểu đồ trọng số AHP (Hình 6). Hình này rất quan trọng vì nó giải thích lý do xếp hạng các phương án không mang tính tùy ý. Trọng số lớn nhất được gán cho khả năng tương thích với đất sét mềm sâu và cải thiện ổn định tổng thể, tiếp theo là kiểm soát lún và tăng cường sức chịu tải. Mẫu trọng số này hoàn toàn phù hợp với đặc điểm hiện trường tại khu vực nghiên cứu, nơi lớp đất sét yếu dày, độ nén cao, giá trị SPT thấp và nguy cơ mất ổn định gần hồ chi phối vấn đề kỹ thuật. Nói cách khác, Hình 6 cung cấp cấu nối logic giữa vấn đề địa chất được xác định ở phần đầu bài báo và thứ hạng số của các phương pháp. Sơ đồ trọng số cho thấy giải pháp phù hợp nhất không phải là phương án rẻ nhất hoặc dễ thi công nhất mà là phương án đáp ứng tốt nhất các cơ chế phá hoại chủ đạo của hiện trường. Trong điều kiện như vậy, các phương pháp chỉ cải thiện cục bộ hoặc nông sẽ ít được ưu tiên hơn so với các phương pháp có khả năng cải thiện

đáng kể hành vi của nền đất yếu sâu.

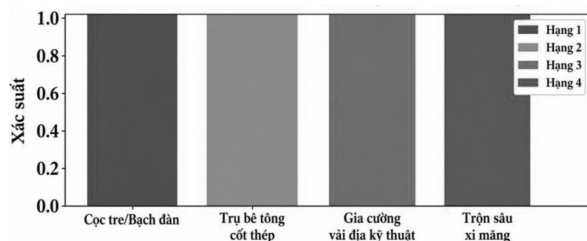
Cơ sở xây dựng thang trọng số trong Hình 6 không nhằm xem nhẹ các tiêu chí sức chịu tải và tổng độ lún, mà phản ánh mức độ chi phối tương đối của từng tiêu chí đối với bài toán lựa chọn giải pháp xử lý nền đường trong điều kiện cụ thể của khu vực nghiên cứu. Đối với công trình nền đường trên đất yếu quanh hồ Bún Xáng, yêu cầu kỹ thuật không chỉ dừng lại ở khả năng chịu tải thẳng đứng hoặc giá trị lún tính toán tại một mặt cắt, mà còn phụ thuộc mạnh vào khả năng bảo đảm ổn định tổng thể của khối nền đắp, kiểm soát biến dạng trên phạm vi rộng, mức độ xử lý đến hết hoặc gần hết chiều sâu lớp đất yếu, khả năng hạn chế trượt sâu và tính ổn định lâu dài trong quá trình khai thác. Vì vậy, các tiêu chí như ổn định tổng thể và gia cố sâu được gán trọng số cao hơn do có vai trò quyết định đến an toàn tổng thể và độ bền vững của nền đường trong điều kiện địa chất bất lợi. Ngược lại, sức chịu tải và tổng độ lún vẫn là các tiêu chí quan trọng, nhưng trong bài toán so sánh này chúng được xem là những chỉ tiêu kiểm soát bắt buộc: khi các phương pháp đều có thể được thiết kế để thỏa mãn giới hạn chịu tải và lún cho phép, sự khác biệt giữa các giải pháp cần được đánh giá thêm thông qua mức độ ổn định tổng thể, khả năng xử lý chiều sâu lớp đất yếu, tính đồng đều của vùng gia cố, điều kiện thi công và hiệu quả kinh tế - kỹ thuật. Do đó, việc phân bổ trọng số thấp hơn cho sức chịu tải và tổng độ lún là cách tiếp cận theo mức độ chi phối tương đối trong lựa chọn phương án tối ưu, chứ không phải phủ nhận vai trò quan trọng của hai tiêu chí này trong thiết kế nền đường.



**Hình 6. Trọng số các tiêu chí đánh giá được xác định bằng phương pháp AHP cho trường hợp hồ Bún Xáng**

Do đó, việc giải thích thứ hạng cuối cùng cần được xem xét cùng với biểu đồ xác suất thứ hạng từ phân tích độ nhạy Monte Carlo (Hình 7). Trong khi thứ hạng TOPSIS cung cấp một trật tự ưu tiên cơ sở duy nhất, biểu đồ xác suất thứ hạng đánh giá xem trật tự đó có giữ ổn định khi trọng số các tiêu chí thay đổi trong phạm vi hợp lý hay không. Hình này củng cố lập luận vì nó cho thấy trộn sâu xi măng không chỉ xếp hạng đầu trong trường hợp cơ sở mà

còn duy trì vị thế thống trị trong phần lớn các kịch bản trọng số mô phỏng. Điều này có nghĩa là sự vượt trội của phương pháp không phụ thuộc vào một giả định trọng số hẹp hoặc chủ quan mà gắn liền với hiệu suất mạnh mẽ của nó trên nhiều tiêu chí quan trọng. Cọc bê tông cốt thép có xu hướng xếp thứ hai trong nhiều kịch bản, cho thấy chúng vẫn là một lựa chọn kỹ thuật mạnh nhưng bị giảm điểm khi tác động môi trường, khó khăn thi công hoặc gánh nặng kinh tế trở nên quan trọng hơn. Gia cường vải địa kỹ thuật thường xuất hiện ở các vị trí thứ hạng trung gian, cho thấy đây là giải pháp hữu ích và khả thi nhưng không phải là phản ứng toàn diện nhất đối với điều kiện đất yếu của khu vực. Cọc tre và cọc tràm vẫn tập trung ở các thứ hạng thấp, điều này xác nhận rằng mặc dù chúng có thể vẫn hữu ích cho các ứng dụng truyền thống tải nhẹ, nhưng chúng không phải là giải pháp thích hợp nhất cho yêu cầu ổn định đê đường quanh hồ Bún Xáng.



Hình 7. Biểu đồ xác suất xếp hạng Monte Carlo thể hiện độ ổn định của thứ hạng các phương pháp khi trọng số thay đổi

## 5. Kết luận

Nghiên cứu này xem xét các phương pháp cải tạo nền khác nhau nhằm ổn định nền đường quanh hồ Bún Xáng, thành phố Cần Thơ, nơi nền đất đặc trưng bởi một lớp đất sét rất mềm, dày, có độ ẩm cao, độ nén cao, sức chịu tải thấp và giá trị SPT thấp. Trong những điều kiện địa chất và thủy lực bất lợi như vậy, việc xây dựng đê trực tiếp trên nền đất tự nhiên không đáp ứng được các tiêu chí về độ ổn định và khả năng khai thác. Do đó, một đánh giá kỹ thuật so sánh đã được thực hiện cho 4 phương pháp tiêu biểu, gồm cọc tre và cọc tràm, cọc bê tông cốt thép, gia cường vải địa kỹ thuật và trộn sâu xi măng. Kết quả cho thấy cọc tre và cọc tràm truyền thống chỉ phù hợp cho các ứng dụng tải nhẹ và không thích hợp để xử lý nền đất yếu ở độ sâu trong khu vực nghiên cứu. Cọc bê tông cốt thép cung cấp khả năng chịu lực cao, nhưng quá trình thi công phức tạp, gây biến động môi trường và chi phí cao, khiến chúng kém phù hợp cho hồ Bún Xáng. Gia cường vải địa kỹ thuật là giải pháp bổ sung hiệu quả để cải thiện khả năng ổn định đê và giảm biến dạng, nhưng hiệu quả gia cố của nó

bị hạn chế hơn đối với lớp đất sét mềm dày và sâu. Trong số các phương án được đánh giá, trộn sâu xi măng cho thấy hiệu quả tổng thể thuận lợi nhất vì nó trực tiếp cải thiện cường độ và độ cứng của đất yếu, tăng cường ổn định tổng thể, giảm lún và chuyển vị ngang, đồng thời có thể thi công hiệu quả trong điều kiện ven sông đô thị hạn chế. Đánh giá số so sánh cũng xác nhận rằng trộn sâu xi măng vẫn là giải pháp vững chắc và phù hợp về mặt kỹ thuật trong các kịch bản trọng số khác nhau. Do đó, phương pháp này có thể được đề xuất như lựa chọn cải tạo nền thích hợp nhất để ổn định nền đường quanh hồ Bún Xáng, đồng thời cũng có thể cung cấp tham chiếu hữu ích cho các dự án nền đất yếu tương tự ở Đồng bằng sông Cửu Long. □

### Tài liệu tham khảo

- [1] Duy, N.L., et al., Groundwater dynamics in the Vietnamese Mekong Delta: Trends, memory effects, and response times. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2021. 33: p. 100746.
- [2] Takagi, H., N.D. Thao, and L.T. Anh Sea-Level Rise and Land Subsidence: Impacts on Flood Projections for the Mekong Delta's Largest City. *Sustainability*, 2016. 8, 959 DOI: 10.3390/su8090959.
- [3] Lam, N.D., T.T.T. Vo, and T.N. Nguyen, Evaluation of studies on soft ground treatment methods applied in the Mekong Delta. *Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 2019(66): p. 108-113.
- [4] Jewell, R.A., A limit equilibrium design method for reinforced embankments on soft foundations. *Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles*, 1982: p. 671-676.
- [5] Dao, H.D., A.T. Pham, and C.T. Phan, The influence of some parameters in the solution for geosynthetic reinforced soil cement pile supported embankment. *Journal of Science and Technology - The University of Danang*, 2014. 9(82): p. 5-9.