

Hiệu ứng cộng hưởng của sợi polypropylene, cát và xi măng trong gia cường đất sét yếu: Cường độ và đặc tính phá hoại

Nguyễn Thanh Tú^{1*}

¹ Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

Sợi polypropylene
Cát
Xi măng
Cường độ UCS
Đặc tính phá hoại

TÓM TẮT

Việc cải thiện lớp đất sét yếu để đáp ứng nhu cầu xây dựng đã và đang được quan tâm. Sợi polypropylene (PP) được đánh giá là giải pháp tiết kiệm chi phí và hiệu quả để cải thiện cường độ đất yếu, do khả năng chịu kéo cao và khả năng chống ăn mòn cao. Trong nghiên cứu này, sợi PP, cát và xi măng được sử dụng cả riêng lẻ và cả kết hợp để gia cường đất sét yếu. Các thí nghiệm nén cố kết một trục nở hông UCS được thực hiện để đánh giá hiệu quả của việc gia cường. Kết quả cho thấy, cường độ của đất gia cường với 0,5% PP, 5% cát hoặc 5% xi măng đều cao hơn trường hợp đất không gia cường, lần lượt là 1,32; 1,37; 1,93 lần. Khi kết hợp gia cường, hỗn hợp gồm 0,5% sợi, 5% cát và 5% xi măng cho cường độ nén UCS cao nhất, gấp 3,5 lần so với đất không gia cường. Tuy nhiên, việc gia cường bằng cát và xi măng làm cho mẫu chuyển sang phá hoại giòn và biến dạng tại cường độ đỉnh nhỏ hơn so với trường hợp không có cát và xi măng. Ngược lại việc xuất hiện của sợi làm mẫu chuyển sang phá hoại dẻo hơn và duy trì được ứng suất dư sau khi đạt cường độ đỉnh. Do đó, sợi PP, cát, xi măng có thể được sử dụng để cải thiện đất sét yếu. Đặc biệt là sự kết hợp của cả ba vật liệu này vừa có thể cải thiện cường độ và vừa gia tăng độ cứng cũng duy trì được cường độ sau khi đạt cường độ đỉnh.

KEYWORDS

Polypropylene fiber Sand
Cement
UCS strength
Failure characteristics

ABSTRACT

Improving soft clay to satisfy the demands of construction projects has received significant attention in geotechnical engineering. Polypropylene (PP) fiber has been widely recognized as a cost-effective and efficient reinforcement material due to its high tensile strength and excellent resistance to corrosion. In this study, PP fiber, sand, and cement were used both individually and in combination to improve the engineering properties of soft clay. Unconfined compressive strength (UCS) tests were performed to evaluate the effectiveness of the different reinforcement approaches. The results showed that the UCS of soils reinforced with 0.5% PP fiber, 5% sand, and 5% cement increased by factors of 1.32, 1.37, and 1.93, respectively, compared with the untreated soil. Among all tested mixtures, the combination of 0.5% PP fiber, 5% sand, and 5% cement yielded the highest strength, with a UCS approximately 3.5 times greater than that of the untreated soil. However, the addition of sand and cement resulted in a more brittle failure mode and lower peak strain compared with specimens without these additives. In contrast, the inclusion of PP fiber promoted ductile behavior and allowed the specimens to retain considerable residual strength after peak loading. These findings demonstrate that PP fiber, sand, and cement represent effective materials for the improvement of soft clay. In particular, the combined application of these three materials is particularly beneficial, as it not only increases the soil strength and stiffness but also maintains significant residual strength after peak loading.

1. Giới thiệu

Hiện nay, do nhu cầu về sự phát triển cơ sở hạ tầng, việc xây dựng các công trình trên nền đất yếu là điều không tránh khỏi. Đặc biệt, vùng đồng bằng sông Cửu Long, nơi có mạng lưới sông ngòi dày đặc, việc xây dựng trên nền đất này mang nhiều nhược điểm như: dễ gây mất ổn định nền móng, và mất cường độ khi độ ẩm tăng cao [1], ảnh hưởng trực tiếp tuổi thọ công trình. Do đó, việc cải tạo các lớp đất này là cần thiết.

Gia cường bằng sợi polypropylene (PP) đang được quan tâm do phương pháp này thân thiện với môi trường [2, 3] cũng như chi phí thấp [4]. Bên cạnh đó, sợi PP có khả năng chịu kéo cao và chống ăn mòn tốt, đặc biệt là trong môi trường axit và kiềm [2, 3]. Các nghiên cứu trước cho thấy hiệu quả của việc gia cường đất bằng sợi. Trong thí nghiệm ba trục trong các trường hợp cố kết - thoát nước (CD) và cố kết - không thoát nước (CU), khi hàm lượng sợi 0,4 %, góc ma sát trong tăng khoảng 50 % [5]. Taha et al. [2] cho thấy khi hàm lượng sợi PP tăng, chỉ số dẻo giảm, làm tăng tính ổn định và khả năng làm việc của đất CH. Việc thêm sợi

*Liên hệ tác giả: tunt@hcmute.edu.vn

Nhận ngày 06/06/2026, sửa xong ngày 25/06/2026, chấp nhận đăng ngày 26/06/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1397>

tổng hợp vào đất làm gia tăng trọng lượng riêng của đất và giá trị khối lượng khô lớn nhất trong khi giá trị hàm lượng nước tối ưu không thay đổi [6, 7]. Tác giả Yetimoglu và Salbas [8] xác nhận rằng tăng hàm lượng sợi sẽ cải thiện độ dẻo của đất [8]. Murray và cộng sự [6] cho rằng hàm lượng sợi tối ưu là 1 %, khi hàm lượng sợi trên 1,5 % thì sẽ khó trộn đều và sợi dễ bị vón cục và giảm hiệu quả cơ học. Cường độ nén 1 trục nở hông UCS gia tăng khi hàm lượng sợi gia tăng. Giá trị lực dính mẫu gia cường với hàm lượng sợi 1 % gấp 1,5 lần so với khi không gia cường. Hung [9] cho rằng việc thêm sợi ở hàm lượng từ 0,5 % đến 1 % làm cho cường độ gia tăng cao hơn so với đất không gia cường. Cơ chế gia tăng cường độ của đất gia cường sợi chủ yếu dựa trên sự tương tác cơ học giữa đất và sợi. Sợi PP hoạt động như một hệ thống "cốt thép vi mô" phân bố ngẫu nhiên ba chiều trong ma trận đất. Khả năng chịu kéo của đất sét nhỏ hơn nhiều so với khả năng chịu nén. Khi mẫu đất bị nén dọc trục và có xu hướng nở hông, các sợi sẽ phát huy lực ma sát bề mặt với hạt đất và chịu lực kéo căng, giữ cho khối đất không bị xé toạc. Nói cách khác, sợi PP bắc cầu qua các vết nứt vi mô, làm chậm quá trình lan truyền vết nứt từ đó gia tăng cường độ.

Sợi tổng hợp PP (polypropylene) kết hợp với xi măng được sử dụng để gia cường đất. Park [10] cũng làm thí nghiệm nén 1 trục nở hông (UCS) với hỗn hợp cát và xi măng (hàm lượng xi măng từ 2-6 %). Kết quả cho thấy, hỗn hợp với 2 % xi măng đạt cường độ nén gấp 3,5 lần so với không có sợi polyvinyl alcohol. Bên cạnh đó, chỉ số biến dạng cũng gia tăng theo hàm lượng sợi và chỉ số biến dạng không bị ảnh hưởng bởi tỷ lệ xi măng khi hàm lượng sợi nhỏ hơn 1 %. Jamsawang và cộng sự [11] cho thấy hỗn hợp cát gia cố xi măng bằng sợi CCFS được cải thiện các đặc tính, bao gồm: ứng xử uốn khi đạt giá trị cực đại, ngăn ngừa sự phá hủy đột ngột. Tác giả cũng chỉ ra, với hàm lượng sợi cao (2 %) có thể phân bố đáng kể tải trọng đến các phần khác nhau của mẫu đầm thí nghiệm.

Tương tự, Kunchariyakun và cộng sự [12] nghiên cứu ảnh hưởng của việc thay thế cát và bổ sung vật liệu thân thiện (biochar) đến tính chất cơ học và vi cấu trúc của đất sét yếu gia cường bằng xi măng thủy lực hỗn hợp (blended hydraulic cement). Kết quả cho thấy cường độ nén nở hông (UCS) tăng đáng kể khi hàm lượng cát đạt khoảng 50 %, nhờ cải thiện cấu trúc hạt và tăng nội ma sát, trong khi biochar ở mức tối ưu (khoảng 10 %) giúp tăng sản phẩm thủy hóa và liên kết giữa các hạt. Ngoài ra, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng sự kết hợp giữa cơ chế cơ học (do cát tạo khung chịu lực) và cơ chế hóa học (do xi măng và biochar) tạo ra hiệu quả gia cường tối ưu. Yang và cộng sự [13] đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng xi măng, hàm lượng sợi và độ dài sợi PPF đến cường độ nén một trục nở hông và cường độ 3 trục của đất. Khi hàm lượng sợi tăng lên, số lượng và độ rộng các vết nứt giảm đáng kể và sự phá hoại chuyển từ phá hoại giòn sang phá hoại dẻo.

Các nghiên cứu trong nước cũng cho thấy hiệu quả của việc gia cường đất bằng xi măng, cát và sợi. Bích và cộng sự [14] cho thấy tỉ lệ 4 % sợi lưới là tối ưu để gia tăng cường độ hỗn hợp xi măng – đất – cát. Đồng thời, việc thêm sợi lưới làm ứng xử của hỗn hợp đất chuyển từ giòn sang dẻo hơn. Hùng và cộng sự [15] thí nghiệm gia cường hỗn hợp đất bao gồm 70 % cát và 30 % bụi và sét bằng sợi PP với chiều dài

và hàm lượng khác nhau. Kết quả cho thấy cường độ cắt trực tiếp và cường độ nén ba trục CU đạt giá trị lớn nhất tại 1 % hàm lượng sợi và chiều dài sợi là 15 mm đến 20 mm.

Như vậy, các nghiên cứu trước cho thấy hiệu quả của việc sử dụng cát, xi măng và sợi để cải thiện các tính chất của đất sét yếu. Tuy nhiên, việc đánh giá tác động đồng thời của các phương pháp còn hạn chế, đặc biệt là đối với đất vùng Đồng bằng sông Cửu Long. Do đó, nghiên cứu này tập trung đánh giá hiệu quả hiệu ứng gia cường cộng hưởng của sợi polypropylene, cát và xi măng đến ứng xử nén một trục nở hông của đất sét vùng Đồng bằng sông Cửu Long.

2. Chương trình thí nghiệm

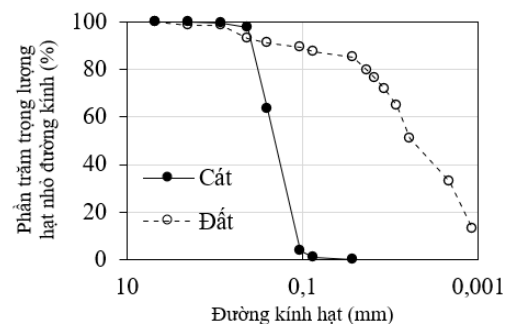
2.1. Vật liệu thí nghiệm

2.1.1. Đất

Đất trong thí nghiệm được lấy từ lòng sông Tỉnh Bến Tre. Đất được phân loại MH dựa trên hệ thống phân loại USCS. Bảng 1 thể hiện các tính chất của đất và Hình 1 thể hiện thành phần hạt của đất.

Bảng 1. Tính chất của đất.

Tính chất của đất	Giá trị
Giới hạn dẻo, PL (%)	44,9
Giới hạn nhão, LL (%)	91,5
Chỉ số dẻo, PI (%)	46,6
Tỷ trọng riêng hạt, G_s	2,75
Dung trọng tự nhiên, γ (kN/m ³)	16,13
Hệ số rỗng, e	1,587
Độ bão hoà (%)	96,6
Độ ẩm tối ưu OMC (%)	31,5
Dung trọng khô lớn nhất γ_{k-max} (kN/m ³)	13,21



Hình 1. Biểu đồ thành phần hạt.

2.1.2. Sợi polypropylene

Sợi polypropylene (PP) được sử dụng trong thí nghiệm do có độ bền chịu kéo cao (42 cN/Tex) và khả năng kháng ăn mòn, kháng kiềm và hoá chất tốt. Sợi có đường kính 0.016 mm. Chiều dài sợi được sử dụng trong thí nghiệm này là 12 mm (Hình 2).



Hình 2. Sợi polypropylene.

2.1.3. Cát

Cát được dùng thí nghiệm này là cát sạch, được xếp loại SP theo hệ thống UCSC. Thành phần hạt được thể hiện trong Hình 1.

2.1.4. Xi măng

Xi măng sử dụng trong nghiên cứu là xi măng Portland thông thường PC40, có khối lượng riêng $3,0 \text{ g/cm}^3$. Các đặc tính vật lý của xi măng bao gồm diện tích bề mặt riêng $2.800 \text{ cm}^2/\text{g}$ (xác định theo phương pháp Blaine) và độ mịn với lượng sót sàng 10 %. Thời gian đông kết ban đầu và thời gian đông kết cuối cùng lần lượt là 185 phút và 480 phút. Cường độ nén yêu cầu đạt tối thiểu 21 MPa sau 3 ngày và 40 MPa sau 28 ngày bảo dưỡng.

2.2. Quá trình thí nghiệm

2.2.1. Tạo mẫu thí nghiệm

Đất nạo vét từ lòng sông được lọc để loại bỏ các rác thải như lá cây, rễ cây, vỏ chai nhựa.... Sau đó, đất được phơi khô, nghiền mịn. Đất sau khi rây qua sàng 0,5 mm được sấy ở nhiệt độ 100°C để loại bỏ nước tự do trong đất. Sau đó, đất khô này được trộn với nước, cát, xi măng và sợi PP theo các tỷ lệ các nhau. Để sợi không bị vón cục trong quá trình trộn, sợi được làm ẩm với một lượng nước được kiểm soát và trộn vào trong hỗn hợp đất, cát và xi măng. Sau đó, hỗn hợp này được nhào kỹ để đạt được hỗn hợp đồng nhất với các sợi phân bố đều hỗn hợp đất. Có thể thêm nước vào hỗn hợp để đạt được độ ẩm mong muốn (31,5 %). Hệ số đầm chặt của đất được dùng trong thí nghiệm này là 0,85. Đường kính và chiều cao các mẫu lần lượt là 50 mm và 100 mm.

Các hàm lượng sợi, cát và xi măng được lựa chọn dựa trên các nghiên cứu trước. Trong đó hàm lượng sợi PP từ 0,5 % cho hiệu quả gia cường [9] và hàm lượng xi măng, cát khoảng 5 % được sử dụng phổ biến trong đất gia cố xi măng [10, 16]. Tuy nhiên, nghiên cứu này không nhằm xác định cấp phối tối ưu tuyệt đối mà chỉ để đánh giá tác động đồng thời của phương pháp gia cường. Do đó, hàm lượng gia cường theo khối lượng khô của đất được lựa chọn lần lượt là 0,5 % cho sợi, 5 % cho cát và 5 % cho xi măng. Các trường hợp gia cường được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Các trường hợp gia cường.

Tên	Thành phần hỗn hợp
D	Đất
D.0,5%PP	Đất + 0,5 % sợi PP
D.5%CA	Đất + 5 % cát
D.5%XM	Đất + 5 % xi măng
D.0,5%PP.5%CA	Đất + 0,5 % PP + 5 % cát
D.0,5%PP.5%XM	Đất + 0,5 % PP + 5 % xi măng
D.0,5%PP.5%CA.5%XM	Đất + 0,5 % PP + 5 % cát + 5 % xi măng

Trong mỗi trường hợp, có ít nhất 2 mẫu thí nghiệm được tạo và sai số cho 2 mẫu này không quá 5 % để bảo đảm tính chính xác của kết quả. Sau khi tạo, các mẫu được đặt trong tủ dưỡng ẩm 28 ngày trước khi được thí nghiệm nén một trục nở hông UCS.

2.2.2. Thí nghiệm nén một trục nở hông UCS

Các mẫu thí nghiệm được thí nghiệm nén một trục nở hông với tốc độ nén 1 mm/phút theo ASTM D2166/2166M-16 [17] và thời gian mẫu bị phá hoại không quá 15 phút. Trong suốt quá trình thí nghiệm áp lực nén và biến dạng dọc trục được ghi nhận.

3. Kết quả thí nghiệm

3.1. Gia tăng cường độ UCS của đất gia cường

Chỉ số gia tăng cường độ SI được sử dụng để đánh giá sự ảnh hưởng của việc gia cường riêng lẻ và kết hợp của PP, cát và xi măng đến cường độ nén một trục nở hông của đất gia cường. Chỉ số SI được xác định như sau:

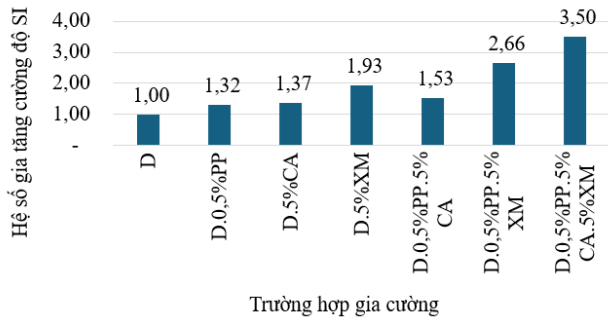
$$SI = \frac{UCS_{\text{gia-cuong}}}{UCS_{\text{không-gia-cuong}}} \quad (1)$$

Trong đó: $UCS_{\text{gia-cuong}}$, $UCS_{\text{không-gia-cuong}}$: lần lượt là ứng suất nén dọc trục lớn nhất của mẫu đất được gia cường và không gia cường.

Hình 3 thể hiện giá trị của chỉ số gia tăng cường độ của các mẫu đất và đất gia cường. Kết quả cho thấy việc gia cường riêng lẻ hay kết hợp đều làm tăng đáng kể cường độ nén một trục không nở hông khi tất cả các hệ số SI lớn hơn 1. Khả năng cải thiện cường độ tăng dần theo thứ tự sợi PP, cát, xi măng và sự kết hợp các phương pháp gia cường.

Khi đất được trộn với sợi PP, cường độ UCS của hỗn hợp gia tăng 1,32 lần. Sự gia tăng này phù hợp với các nghiên cứu trước đây [4]. Estabragh và cộng sự [18] cho thấy, 0,5 % sợi PP làm tăng cường độ đất lên 1,2 lần từ 282 kPa. Tương tự, Yazici và cộng sự [4] khi làm thí nghiệm với đất CL, giá trị UCS tăng lên 1,33 lần khi hàm lượng sợi là 0,8 %. Sự gia tăng cường độ là do hiệu ứng nhíp cầu giữa sợi và đất khi sợi được phân bố ngẫu nhiên trong đất. Cai và cộng sự [19] giải thích rằng, khi mẫu đất chịu tải và bắt đầu xuất hiện các vết nứt vi mô, sợi PP sẽ bắc cầu qua các vết nứt này và liên kết các hạt đất với nhau để chống lại sự giãn nở ngang của mẫu bằng cách huy động ma sát bề

mặt, cài vào nhau và hấp thụ ứng suất kéo, ngăn mẫu bị nở hông và làm chậm sự giãn nở của chúng một cách hiệu quả [6, 18]. Lực dính biểu kiến tăng lên nhờ ma sát và sự khóa ngàm giữa bề mặt sợi và các hạt đất [13].



Hình 3. Hệ số gia tăng cường độ SI.

Tương tự, việc bổ sung 5 % cát làm cường độ UCS tăng lên 1,37 lần so với đất và cao hơn khi đất gia cường bằng sợi PP. Sự gia tăng này phù hợp với các nghiên cứu trước. Budianto và cộng sự [16] cho thấy việc thêm 5 % cát làm cho giá trị tăng lên khoảng 1,17 lần ở 28 ngày tuổi. Việc gia tăng cường độ là do việc thêm cát giúp cải thiện thành phần hạt, tạo ra khung cứng trong đất [21]. Các hạt cát này đóng vai trò như vật liệu làm đầy, làm hỗn hợp trở nên đặc chắc và chịu tải tốt hơn. Nói cách khác, các hạt cát đóng vai trò như khung cốt liệu khô, tạo ra góc ma sát trong lớn hơn, từ đó, gia tăng sức kháng cắt của đất [22].

Việc thêm xi măng vào trong đất làm cường độ UCS gia tăng 1,93 lần, cao nhất so với gia cường bằng 0,5 % sợi và khi gia cường 5 % cát. Giá trị này tương đồng với Tang và cộng sự [23]. Tác giả cho thấy cường độ đất tăng khoảng 1,9 lần khi đất được trộn 5 % xi măng sau 28 ngày. Tuy nhiên, không giống như sự hoà trộn cơ học của sợi hay cát, quá trình gia cường bằng xi măng là kết quả của chuỗi phản ứng phản ứng hóa - lý. Quá trình này chia làm hai giai đoạn cốt lõi: thủy hóa sơ cấp của xi măng và phản ứng pozzolanic thứ cấp giữa các sản phẩm thủy hóa với khoáng sét. Kết quả của các quá trình này các sản phẩm liên kết như gel C-S-H, tạo thành các liên kết cứng giữa các hạt đất [18]. Các liên kết này ngăn cản sự dịch chuyển của các hạt đất, hạn chế sự nở hông và từ đó làm gia tăng cường độ nén của mẫu [23].

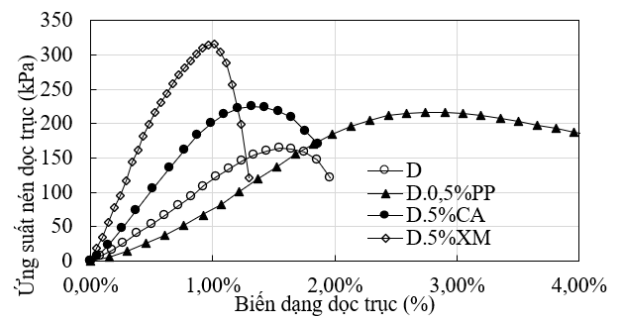
Về sự gia tăng cường độ khi kết hợp sợi và cát hay sợi và xi măng đều cho cường độ UCS cao hơn lần lượt là 1,53 và 2,66 so với khi không gia cường (Hình 3). Trong hỗn hợp sợi - cát, cát đóng vai trò như khung cốt liệu cứng làm tăng đáng kể góc ma sát trong của đất. Khi cát kết hợp với khả năng chịu kéo của mạng lưới sợi hoạt động như cốt thép vĩ mô, hệ vật liệu hình thành cơ chế chịu tải hiệu quả hơn, từ đó làm tăng cường độ tổng thể. Tương tự, đối với hỗn hợp sợi - xi măng, các sản phẩm thủy hóa của xi măng bám dính lên bề mặt sợi, làm tăng lực liên kết tại vùng tiếp xúc giữa sợi và hạt đất [23]. Do đó, sợi không chỉ tham gia gia cường nền đất mà còn trở thành một phần của mạng lưới liên kết trong vật liệu, góp phần nâng cao đáng kể khả năng chịu lực của hỗn hợp.

Hiệu quả gia cường lớn nhất được ghi nhận ở trường hợp kết hợp đồng thời sợi, cát và xi măng, với cường độ UCS tăng tới 3,5 lần so với mẫu không gia cường. Trong hệ vật liệu này, sợi polypropylene (PP) không chỉ gia cường cho nền đất mà còn tăng cường khả năng chịu lực của khung liên kết xi măng - cát vốn có tính giòn cao, giúp vật liệu chịu được ứng suất lớn hơn và cải thiện độ bền sau phá hoại [23]. Kết quả nghiên cứu phù hợp với các công bố trước đây. Tang và cộng sự [23] cho thấy thêm 0,05 % sợi vào đất có 5 % xi măng làm tăng cường độ lên 2,55 lần. Tương tự, Park [10] ghi nhận cường độ đất cát tăng khoảng 3,5 lần khi bổ sung đồng thời 2 % xi măng và 1 % sợi PVA. Nhìn chung, sự kết hợp giữa cát, xi măng và sợi tạo ra hiệu ứng cộng hưởng rõ rệt, trong đó cát góp phần tối ưu hóa cấu trúc hạt, xi măng hình thành các liên kết hóa học bền vững, còn sợi cung cấp cơ chế gia cường dẻo dai và khả năng khống chế phát triển vết nứt. Sự tương tác giữa ba thành phần này là nguyên nhân chính dẫn đến sự cải thiện vượt trội về cường độ của vật liệu.

3.2. Đặc tính phá hoại của các mẫu đất gia cường

Đặc tính phá hoại của đất gia cường được đánh giá định lượng thông qua hai thông số: hình dạng đường cong sau đỉnh và chỉ số biến dạng (DI). Trong đó, DI được xác định bằng tỷ lệ giữa biến dạng tại thời điểm phá hủy của mẫu gia cường $\epsilon_{gia-cuong}$ (%) so với mẫu đất không gia cường $\epsilon_{không-gia-cuong}$ (%) theo công thức:

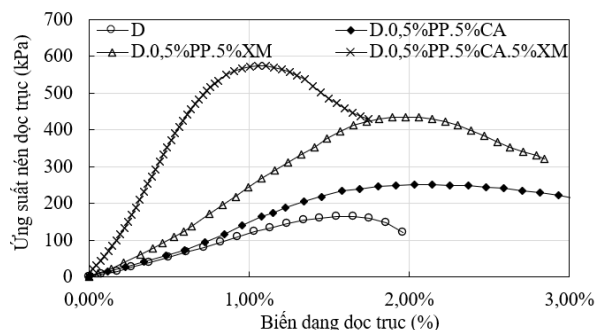
$$DI = \frac{\epsilon_{gia-cuong}}{\epsilon_{không-gia-cuong}} \quad (2)$$



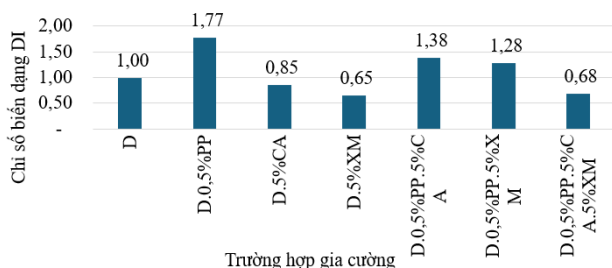
Hình 4. Ứng suất nén theo biến dạng dọc trục của các mẫu đất và đất gia cường đơn lẻ.

Đường cong ứng suất - biến dạng của các trường hợp đất và đất gia cường đơn lẻ bằng cát hoặc xi măng được thể hiện ở Hình 4 và đất gia cường đồng thời bằng sợi, cát và xi măng được thể hiện ở Hình 5. Về đặc tính phá hủy của đất không gia cường, đường cong ứng suất - biến dạng có độ dốc thấp, sau khi đạt đỉnh, ứng suất giảm dần, thể hiện đặc tính của một nền đất yếu. Sự xuất hiện của các chất gia cường đã làm thay đổi sâu sắc cả về cường độ chịu lực đỉnh, độ cứng ban đầu lẫn đặc tính phá hủy. Về độ cứng ban đầu, các mẫu đất khi được gia cường bằng cát hay xi măng đều thể hiện độ cứng ban đầu lớn trường hợp không được gia cường. Điều này được thể hiện thông qua độ dốc ban

đầu của các đường cong ứng suất và biến dạng của các mẫu gia cường lớn hơn với các mẫu không gia cường. Và ngược lại, độ cứng ban đầu của các trường hợp gia cường bằng sợi PP nhỏ hơn khi không có gia cường bằng sợi. Độ lớn của độ dốc ban đầu được thể hiện thông qua mô đun cát tuyến, sẽ được phân tích ở phần sau.



Hình 5. Ứng suất nén theo biến dạng dọc trục của các mẫu đất và đất gia cường đồng thời sợi, cát và xi măng.



Hình 6. Chỉ số biến dạng DI.

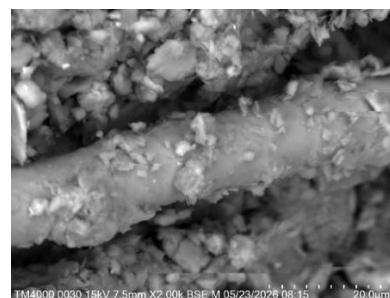
Hình 6 thể hiện giá trị chỉ số biến dạng DI của các trường hợp đất gia cường. Kết quả cho thấy có 2 xu hướng phá hủy khi gia cường đất: xu hướng giòn hoá do gia cường cát và xi măng và xu hướng dẻo hoá do tác dụng của sợi PP.

Chỉ số biến dạng DI của đất được gia cường cát và gia cường xi măng lần lượt là 0,85 và 0,65; đều nhỏ hơn 1, thể hiện mẫu bị phá hoại sớm hơn so với trường hợp không gia cường. Các đường cong ứng suất - biến dạng của mẫu gia cường bằng cát hay xi măng dịch chuyển sang trái. Đường cong này tăng nhanh trước khi đạt đỉnh và sau khi đạt đỉnh hạ xuống nhanh. Đặc biệt, trong hỗn hợp xi măng đất, quá trình thủy hóa hình thành các cầu nối tinh thể C-S-H biến đất nền thành một liên kết đá cứng dính kết cao nhưng rất "nhạy cảm" với biến dạng, dẫn tới phá hủy giòn tức thì ở mức biến dạng nhỏ, trong thí nghiệm này biến dạng là 1,01 % với 5 % xi măng. Như vậy, việc thêm cát hay xi măng làm cho đất trở nên "giòn" hơn và đất trộn xi măng sẽ "giòn" hơn so với cát (ở cùng mức tỉ lệ 5 %). Các nghiên cứu trước như Yang và cộng sự [13] và Vallejo và cộng sự [22] xác nhận rằng việc thay thế cát làm hạn chế đáng kể khả năng biến dạng so với đất sét. Tác giả Jamsawang và cộng sự [11], Park [10] và Tang và cộng sự [23] cho rằng biến dạng của xi măng đất tại đỉnh ứng suất rất nhỏ, thường chỉ trong khoảng

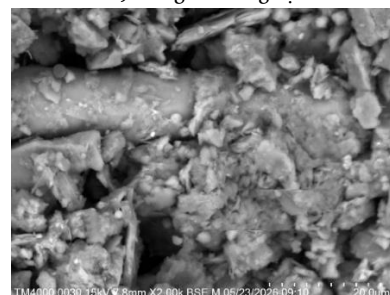
0,5 % đến 0,75 %, thấp hơn nhiều so với đất tự nhiên, thể hiện tính giòn hoá của cát và xi măng.

Ngược lại, việc gia cường 0,5 % sợi PP vào trong đất hay các hỗn hợp của đất đều làm cho chỉ số DI tăng lên và đường cong ứng suất - biến dạng dịch chuyển sang phải. Bên cạnh đó, khi so với các mẫu không có sợi, các đường cong khi có sợi gia tăng cường độ chậm trước khi đạt đỉnh và hạ xuống chậm sau khi đạt đỉnh và duy trì mức ứng suất nhất định (Hình 5). Cụ thể, việc bổ sung 0,5 % sợi PP vào đất giúp biến dạng tại đỉnh kéo giãn từ 1,55 % lên đến 2,74 %. Tương tự, DI của hỗn hợp đất - cát, đất - xi măng lần lượt là 0,85 và 0,65, nhưng khi gia cường thêm 0,5 %PP chỉ số này gia tăng lên 1,38 và 1,28 (lớn hơn 1). Đặc biệt, gia cường kết hợp sợi, cát và xi măng làm cho mẫu cứng hơn và bị phá hoại giòn so với đất khi DI của hỗn hợp là 0,68. Tuy nhiên, giá trị này vẫn lớn hơn so với DI của trường hợp D.5 %XM nhờ có sự phân bố ngẫu nhiên của sợi. Bên cạnh đó, đường cong ứng suất sau đỉnh của trường hợp D.0.5 %PP.5 %CA.5 %XM (Hình 5) vẫn duy trì được cường độ dư nhất định chứ không hạ xuống tức thì như mẫu đất chỉ gia cường xi măng.

Như vậy sợi PP đã phát huy vai trò cứu vãn độ dẻo dai cho cấu trúc bị giòn hóa. Nhờ hiệu ứng liên kết bắc cầu của mạng lưới sợi được phân bố ngẫu nhiên, hỗn hợp đất - sợi có khả năng trì hoãn sự mở rộng của các vết nứt, hấp thụ năng lượng biến dạng nhiều trước khi kết cấu bị phá hủy hoàn toàn. Như vậy, việc bổ sung thêm 0,5 % sợi PP đã chuyển đổi ứng xử của đất và đất đã xử lý sang trạng thái dẻo hơn. Kết quả này trùng khớp với các nghiên cứu trước [2, 11]. Yang và cộng sự [13] cho rằng việc thêm sợi sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình chuyển đổi từ phá hủy giòn sang phá hủy dẻo, cho phép các mẫu vật chịu được biến dạng lớn hơn trước khi đạt đến cường độ cực đại.



a) Đất gia cường sợi



b) Hỗn hợp đất – cát – xi măng gia cường sợi

Hình 7. Kết quả chụp SEM.

Hình 7 thể hiện kết quả chụp SEM của trường hợp gia cường sợi cho đất và đất xử lý. Khi đất gia cường sợi PP, các hạt đất chủ yếu liên kết với sợi thông qua ma sát bề mặt và sự khóa cơ học giữa các hạt đất với sợi (Hình 7a). Khi bổ sung cát và xi măng, các sản phẩm thủy hóa hình thành xung quanh sợi và liên kết các hạt đất, cát với sợi PP thành một mạng lưới không gian liên tục (Hình 7b). Sợi PP đóng vai trò như các phần tử bắc cầu nối các vùng vật liệu lân cận, tạo ra hiệu ứng cầu nối, góp phần truyền tải ứng suất, hạn chế sự phát triển của vi khe nứt và nâng cao độ dẻo của vật liệu sau phá hoại.

3.3. Ảnh hưởng sợi PP, cát và xi măng đến mô đun cát tuyến của đất gia cường

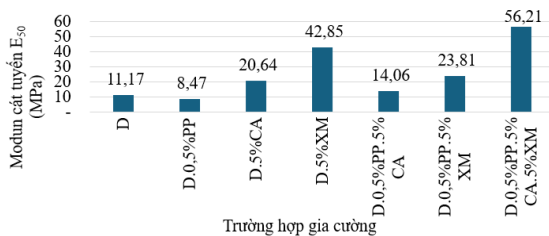
Mô đun cát tuyến E_{50} được sử dụng để đánh giá độ cứng và khả năng chống biến dạng của đất không gia cường và gia cường khi chịu tải trọng. E_{50} được xác định theo công thức:

$$E_{50} = \frac{\sigma_{50}}{\varepsilon_{50}} \quad (3)$$

Trong đó:

σ_{50} (kPa): là giá trị ứng suất bằng 50 % giá trị đỉnh.

ε_{50} (%): là giá trị biến dạng dọc trục tương ứng với ứng suất σ_{50} .



Hình 8. Mô đun cát tuyến E_{50} .

Hình 8 thể hiện giá trị của E_{50} của các trường hợp đất không gia cường và gia cường. Khi gia cường đơn lẻ 5 % cát hoặc 5 % xi măng, độ cứng E_{50} tăng lên đáng kể (lần lượt tăng lên 1,85 lần và 3,84 lần so với đất không gia cường). Việc gia tăng này một lần nữa thể hiện mẫu cứng hơn do quá trình lấp đầy các lỗ rỗng để tạo thành khung chịu của cát, cũng như hình thành các liên kết hoá học của xi măng. Các nghiên cứu trước cũng cho thấy xu hướng tăng E_{50} khi gia cường cát và xi măng. Kunchariyakun và cộng sự [12] cho thấy, khi thay thế đất bằng 1 phần cát, tại biến dạng 0,6 %, mô đun cát tuyến tăng từ 7 MPa lên đến 87,5 MPa.

Ngược lại, việc thêm sợi PP vào đất hay hỗn hợp đất - cát và đất xi măng, giá trị E_{50} đều giảm. Trong các tổ hợp đất - PP - cát và đất - PP - xi măng, giá trị E_{50} lần lượt là 14,06 và 23,81 MPa, đều cao hơn đất nhưng thấp hơn đáng kể so với khi chỉ dùng cát hoặc xi măng đơn lẻ. Điều này khẳng định sợi PP có xu hướng kéo giảm độ cứng tổng thể của ma trận độ cứng. Các nghiên cứu trước cũng chỉ ra rằng sợi làm thay đổi ứng xử của vật liệu từ giòn sang dẻo, dẫn đến việc giảm độ dốc ban đầu của đường cong ứng suất - biến dạng [22, 23]. Tang và cộng sự [23] khẳng định việc thêm sợi gia cường làm cải thiện cường độ nhưng đồng thời làm giảm độ cứng của đất. Yazici và cộng sự [4]

ghi nhận mô đun đàn hồi định nghĩa tại các mức biến dạng khác nhau đều giảm khi hàm lượng sợi PP tăng. Khi kết hợp cả ba thành phần (sợi - cát - xi măng) giá trị E_{50} đạt cao nhất (56,21 MPa), cho thấy khi có cát tạo khung và xi măng liên kết, ma trận trở nên cực kỳ cứng. Nghiên cứu của Park [10] về cát xi măng gia cường sợi PVA cho thấy khi có sự kết hợp tối ưu giữa tác nhân liên kết hóa học như xi măng và khung hạt cứng (cát), hỗn hợp đạt được cả cường độ và mô đun đàn hồi cao nhất, bất chấp tính dẻo của sợi.

4. Kết luận

Các thí nghiệm nén một trục nở hông UCS được thực hiện cho thấy khả năng cải thiện cường độ đất của sợi polypropylene (PP), cát và xi măng khi gia cường riêng lẻ hoặc đồng thời. Dựa vào các kết quả, các kết luận chính bao gồm:

- Việc bổ sung sợi PP vào trong đất làm gia tăng cường độ của đất và làm đất chuyển sang biến dạng dẻo hơn với biến dạng tại đỉnh lớn hơn khi so với đất không có sợi PP. Sự cải thiện là do sợi được phân bố ngẫu nhiên, đóng vai trò như cốt liệu chịu kéo, liên kết các hạt đất với nhau để chống lại sự giãn nở ngang (hiệu ứng nhíp cầu) và làm gia tăng cường độ và biến dạng.

- Cát hoạt động như khung cốt liệu khô, không chỉ lấp đầy các khoảng trống mà còn làm cải thiện đáng kể khả năng chịu lực của đất. Biến dạng tại cường độ đỉnh nhỏ hơn khi so với trường hợp không có cát.

- Việc thêm xi măng vào trong đất làm cải thiện đáng kể khả năng chịu lực của hỗn hợp đất. Tuy nhiên, cũng giống như cát, việc thêm xi măng làm cho hỗn hợp chuyển sang phá hoại giòn.

- Mô đun cát tuyến E_{50} của các mẫu đất gia cường sợi giảm so với khi không có sợi do hỗn hợp trở nên dẻo hoá. Ngược lại, việc thêm cát hay xi măng làm cho E_{50} tăng nhanh do hỗn hợp trở nên cứng và giòn hơn.

- Với cùng hàm lượng, cường độ và mô đun cát tuyến hỗn hợp đất - xi măng cao hơn so với cường độ hỗn hợp đất - cát, và ngược lại cho biến dạng tại cường độ đỉnh.

- Sự kết hợp các chất gia cường vừa mang lại sự cải thiện về cả cường độ và hạn chế sự phá hoại sớm khi có sự xuất hiện của sợi. Đặc biệt, khi đất được gia cường bằng sợi, cát và xi măng, cường độ UCS và E_{50} đạt giá trị lớn nhất trong các trường hợp nghiên cứu.

Kết quả của nghiên cứu này mở ra một giải pháp xử lý nền tại chỗ hiệu quả cao áp dụng cho các vùng đất sét yếu ven sông. Việc tích hợp thêm hàm lượng nhỏ cát thô, sợi PP và hàm lượng nhỏ xi măng không chỉ nâng cao đáng kể cường độ đất nền mà còn hướng tới xu hướng phát triển vật liệu xây dựng xanh, thân thiện với môi trường nhờ tận dụng và giảm thiểu rác thải nhựa.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này là sản phẩm thuộc đề tài mã số T2025-253 do Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh tài trợ kinh phí thực hiện.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Zhang, M.; Zhu, X.; Yu, G.; Yan, J.; Wang, X.; Chen, M.; Wang, W. Permeability of Muddy Clay and Settlement Simulation. *Ocean Engineering* 2015, 104, 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.05.031>.
- [2]. Taha, M. M. M.; Feng, C. P.; Ahmed, S. H. S. Influence of Polypropylene Fibre (PF) Reinforcement on Mechanical Properties of Clay Soil. *Advances in Polymer Technology* 2020, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9512839>.
- [3]. Puppala, A. J.; Musenda, C. Effects of Fiber Reinforcement on Strength and Volume Change in Expansive Soils. *Transportation Research Record* 2001, 1 (1736), 134–140. <https://doi.org/10.3141/1736-17>.
- [4]. Yazici, M. F.; Keskin, N. A Review on Soil Reinforcement Technology by Using Natural and Synthetic Fibers. *Journal of Science and Technology* 2021, 14 (2), 631–663. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.874339>.
- [5]. Chen, C. W.; Loehr, J. E. Undrained and Drained Triaxial Tests of Fiber-Reinforced Sand. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering - Geosynthetics Asia 2008: Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics 2008*, 114–120. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69313-0_25.
- [6]. Murray, J. J.; Frost, J. D.; Wang, Y. Behavior of a Sandy Silt Reinforced with Discontinuous Recycled Fiber Inclusions. *Transportation Research Record* 2000, No. 1714, 9–17. <https://doi.org/10.3141/1714-02>.
- [7]. Malekzadeh, M.; Bilsel, H. Effect of Polypropylene Fiber on Mechanical Behaviour of Expansive Soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 2012, 17 A (Abduljawwad 1993), 55–63.
- [8]. Yetimoglu, T.; Salbas, O. A Study on Shear Strength of Sands Reinforced with Randomly Distributed Discrete Fibers. *Geotextiles and Geomembranes* 2003, 21 (2), 103–110. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00003-7).
- [9]. Hung, N. S. Experimental Study on Behaviour of Clayey Sand Reinforced by Polypropylene Fibre. In *The International Conference Series on Geotechnics, Civil Engineering and Structures (CIGOS); 2022; pp 1055–1063*.
- [10]. Park, S. S. Unconfined Compressive Strength and Ductility of Fiber-Reinforced Cemented Sand. *Construction and Building Materials* 2011, 25 (2), 1134–1138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.017>.
- [11]. Jamsawang, P.; Voottipruex, P.; Horpibulsuk, S. Flexural Strength Characteristics of Compacted Cement-Polypropylene Fiber Sand. *Journal of Materials in Civil Engineering* 2015, 27 (9), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001205](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001205).
- [12]. Kunchariyakun, K.; Sukmak, P.; Sukmak, G. Mechanical and Microstructural Properties of Cement-Stabilized Soft Clay Improved by Sand Replacement and Biochar Additive for Subgrade Applications. *Developments in the Built Environment* 2024, 20 (August), 100552. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100552>.
- [13]. Yang, X.; Liang, S.; Hou, Z.; Feng, D.; Xiao, Y.; Zhou, S. Experimental Study on Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Cemented Silt Soil. *Applied Sciences* 2022, 12 (16).
- [14]. Bích, L. T.; Vinh, N. S.; Huy, N. Q.; Trúc, P. T. T.; Chương, C. T. Nghiên Cứu Cường Độ Của Đất Cát Trộn Xi Măng Gia Cường Sợi Tái Chế Từ Rác Thái Lưới Đánh Cá. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng* 2026, 20 (IV), 110–119.
- [15]. Hung, N. S.; Huyen, T. T. P.; Duong, N. N. A. Nghiên Cứu Khả Năng Đầm Chặt và Kháng Cát Của Đất Gia Cường Bằng Sợi PP. *Tạp chí Xây dựng* 2024, 06, 156–160.
- [16]. Budianto, E.; Pamuttu, D. L.; Tatai, S.; Passalli, D. A.; Hairulla, H. Analysis of Unconfined Compressive Strength in Clay Mixed with Sand. 2021, 10009, 3–6.
- [17]. D2166/2166M-16, A. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. West Conshohocken, PA: ASTM International i, 1–7. <https://doi.org/10.1520/D2166>.
- [18]. Estabragh, A.; Ranjbari, S.; Javadi, A. Properties of Clay Soil and Soil Cement Reinforced with Polypropylene Fibers. *ACI Materials Journal* 2018, 0–48.
- [19]. Cai, Y.; Shi, B.; Ng, C. W. W.; Tang, C. Effect of Polypropylene Fibre and Lime Admixture on Engineering Properties of Clayey Soil. 2006, 87, 230–240. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.007>.
- [20]. Khattak, M. J.; Alrashidi, M. Durability and Mechanistic Characteristics of Fiber Reinforced Soil-Cement Mixtures. *International Journal of Pavement Engineering* 2006, 7 (1), 53–62. <https://doi.org/10.1080/10298430500489207>.
- [21]. Joel, G.; Kuma, B.; Elijah, T. Influence of Compaction Variables and Grain Size Composition on Unconfined Compressive Strength Model of Sand-Clay Mixtures. *NAU Journal of Civil Engineering* 2025, 4 (1), 25–31.
- [22]. Vallejo, L. E.; Mawby, R. Porosity Influence on the Shear Strength of Granular Material-Clay Mixtures. *Engineering Geology* 2000, 58 (2), 125–136. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00051-X).
- [23]. Tang, C.; Shi, B.; Gao, W.; Chen, F.; Cai, Y. Strength and Mechanical Behavior of Short Polypropylene Fiber Reinforced and Cement Stabilized Clayey Soil. *Geotextiles and Geomembranes* 2007, 25 (3), 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2006.11.002>.
- [24]. Plé, O.; Lê, T. N. H. Effect of Polypropylene Fiber-Reinforcement on the Mechanical Behavior of Silty Clay. *Geotextiles and Geomembranes* 2012, 32, 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2011.11.004>.