

Ảnh hưởng của phụ gia polyme vô cơ kết hợp với xi măng đến các đặc trưng cơ lý của đất A-7-6 ($GI > 20$) sử dụng làm nền đường ô tô

Đào Phúc Lâm^{1*}, Ngô Thanh Hải^{1,2}, Phạm Trung Hiếu¹, Nguyễn Việt Dũng³

¹ Nhóm nghiên cứu Đổi mới sáng tạo và Chuyển đổi số, Trường Đại học Công nghệ GTVT

² Trường Đại học Mỏ - Địa chất

³ Sở Xây dựng tỉnh Phú Thọ

TỪ KHOẢ

Đất A-7-6
Chỉ số nhóm-GI
Phụ gia polime vô cơ
Gia cố xi măng
Sức chịu tải CBR
Độ trương nở
Nền đường ô tô

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày kết quả thực nghiệm về gia cố đất A-7-6 có chỉ số nhóm lớn hơn 20 ($GI > 20$), loại đất có đặc tính trương nở lớn và sức chịu tải thấp, gây nhiều khó khăn cho công tác xây dựng nền đường ô tô. Mục tiêu của nghiên cứu là đánh giá ảnh hưởng của phụ gia polime vô cơ TS kết hợp với xi măng Poóc lăng đến các đặc trưng cơ lý của đất và khả năng sử dụng vật liệu sau gia cố làm nền đường. Các thí nghiệm trong phòng bao gồm giới hạn Atterberg, đầm nén Proctor cải tiến, chỉ số sức chịu tải California (CBR) ngâm nước và độ trương nở được thực hiện đối với đất tự nhiên và các hỗn hợp đất gia cố chứa 5 % xi măng với hàm lượng phụ gia TS thay đổi từ 0,3 % đến 1,1 % theo khối lượng khô của đất. Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ chất kết dính xi măng – TS đã gia cố đáng kể đặc tính làm việc của đất. So với đất tự nhiên, các hỗn hợp gia cố có khối lượng thể tích khô lớn nhất cao hơn, độ ẩm tối ưu thấp hơn, giá trị CBR tăng đáng kể và độ trương nở giảm rõ rệt. Với hàm lượng 0,3 % TS, giá trị CBR ngâm nước tăng từ 3,6 % lên 19,7 %, trong khi độ trương nở giảm xuống còn 2,83 %, đáp ứng yêu cầu đối với vật liệu nền đường đắp theo TCVN 9436:2012. Việc tăng hàm lượng TS tiếp tục làm gia tăng khả năng chịu tải và ổn định thể tích của vật liệu, tuy nhiên tốc độ gia cố có xu hướng giảm dần ở các hàm lượng phụ gia cao. Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ chất kết dính xi măng – TS có tiềm năng lớn trong việc gia cố các loại đất có chất lượng thấp, góp phần tận dụng nguồn vật liệu tại chỗ và giảm nhu cầu thay thế đất trong xây dựng nền đường ô tô.

KEYWORDS

A-7-6 Soil
Group Index - GI
Cement stabilization
California bearing ratio CBR
Swelling potential
Highway subgrade

ABSTRACT

This study presents an experimental investigation on the improvement of A-7-6 soil with a group index greater than 20, which is characterized by high swelling potential and low bearing capacity and therefore poses significant challenges for highway construction. the objective of the study was to evaluate the effects of an inorganic polymer additive (TS) combined with portland cement on the engineering properties of the soil and to assess its potential use as pavement subgrade material. laboratory tests, including atterberg limits, modified proctor compaction, soaked california bearing ratio, and swelling tests, were conducted on natural soil and soil mixtures containing 5% cement and varying contents of the inorganic polymer additive ranging from 0.3% to 1.1% by dry weight of soil. The results showed that the combined cement-ts stabilization system significantly improved the engineering behavior of the soil. compared with the natural soil, the treated mixtures exhibited higher maximum dry density, lower optimum moisture content, substantially increased california bearing ratio values, and markedly reduced swelling potential. with 0.3% ts, the soaked california bearing ratio increased from 3.6% to 19.7%, while the swelling ratio decreased to 2.83%, satisfying the requirements for embankment subgrade materials specified in TCVN 9436:2012 further increases in ts content resulted in additional improvements in bearing capacity and volumetric stability, although the rate of improvement gradually diminished at higher additive contents. the results demonstrate that the cement-ts system has considerable potential for upgrading poor-quality soils and promoting the use of in-situ materials in highway subgrade construction.

1. Đặt vấn đề

Trong xây dựng công trình đường bộ, nền đất là bộ phận chịu tác động trực tiếp của tải trọng xe và điều kiện môi trường, do đó các đặc trưng cơ lý của đất nền có ảnh hưởng quyết định đến khả năng làm

việc cũng như tuổi thọ của kết cấu áo đường. Tuy nhiên, tại nhiều khu vực ở Việt Nam, đặc biệt là vùng trung du, miền núi và Tây Nguyên, đất tại chỗ thường thuộc nhóm đất hạt mịn có tính dẻo cao, sức chịu tải thấp và độ ổn định thể tích kém. Theo hệ thống phân loại AASHTO, các loại đất thuộc nhóm A-7-5 và A-7-6 với chỉ số nhóm (Group Index -

*Liên hệ tác giả: lamdp@utt.edu.vn

Nhận ngày 24/06/2026, sửa xong ngày 13/08/2026, chấp nhận đăng ngày 17/08/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.04.2026.1418>

GI) lớn hơn 20 được xếp vào nhóm đất rất kém, không phù hợp để sử dụng trực tiếp làm nền đường nếu không có biện pháp xử lý hoặc gia cố [1]. Các loại đất này thường có độ trương nở lớn khi gặp nước, cường độ thấp và dễ phát sinh các hư hỏng như lún không đều, nứt và biến dạng mặt đường trong quá trình khai thác [2,3].

Để nâng cao khả năng sử dụng của các loại đất có chất lượng thấp, nhiều giải pháp gia cố đã được nghiên cứu và ứng dụng như sử dụng vôi, xi măng, tro bay, xỉ lò cao hoặc các loại phụ gia hóa học khác. Trong đó, gia cố bằng xi măng được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng gia cố đáng kể cường độ và độ ổn định của đất [4]. Tuy nhiên, việc sử dụng hàm lượng xi măng lớn làm gia tăng chi phí xây dựng cũng như phát thải khí CO₂ trong quá trình sản xuất vật liệu [5]. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu cho thấy đất gia cố xi măng vẫn tồn tại nguy cơ nứt do co ngót và giảm cường độ khi chịu tác động lâu dài của môi trường [6].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu trên thế giới đã tập trung vào việc sử dụng các vật liệu hoạt hóa kiềm, geopolimer và polymer vô cơ nhằm gia cố các tính chất cơ học và thủy lực của đất [7-9,22-26]. Các nghiên cứu cập nhật gần đây cho thấy các hệ chất kết dính polymer, geopolimer và phụ gia phi truyền thống có khả năng cải thiện cường độ, mô đun đàn hồi, chỉ số CBR và tính ổn định thể tích của đất nền, đồng thời góp phần giảm sự phụ thuộc vào các chất kết dính truyền thống [22-26].

Các nghiên cứu của Phummiphan và cộng sự [10], Abdullah và cộng sự [11] hay Teerawattanasuk và Voottipruex [12] đều chỉ ra rằng các sản phẩm tạo thành trong quá trình phản ứng geopolimer hóa có khả năng liên kết các hạt đất, làm giảm độ dẻo, giảm độ trương nở và tăng sức chịu tải CBR. Ngoài ra, Sharma và Kumar [13] đã tổng hợp và đánh giá tiềm năng sử dụng các vật liệu geopolimer nguồn gốc phế thải công nghiệp như một giải pháp thân thiện môi trường để gia cố đất nền.

Ở Việt Nam, các nghiên cứu về gia cố đất chủ yếu tập trung vào sử dụng xi măng, vôi hoặc các phụ gia khoáng, trong khi các nghiên cứu về phụ gia polyme vô cơ đối với đất có chỉ số nhóm lớn hơn 20 còn khá hạn chế. Đây là nhóm đất có chất lượng rất thấp, thường phải đào bỏ hoặc thay thế bằng vật liệu khác, dẫn đến chi phí xây dựng lớn và gây ảnh hưởng đến môi trường. Do đó, việc nghiên cứu khả năng gia cố loại đất này bằng phụ gia polyme vô cơ kết hợp với xi măng có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao, góp phần tận dụng nguồn vật liệu tại chỗ, giảm giá thành xây dựng và nâng cao hiệu quả kinh tế của các dự án giao thông.

Trong nghiên cứu này, đất A-7-6 có chỉ số nhóm GI > 20 được gia cố bằng hệ chất kết dính gồm 5 % xi măng và phụ gia polyme vô cơ TS với hàm lượng thay đổi từ 0,3 % đến 1,1 %. Các thí nghiệm trong phòng được tiến hành nhằm trả lời ba câu hỏi nghiên cứu chính: (i) phụ gia TS ảnh hưởng như thế nào đến đặc tính đầm nén, sức chịu tải CBR và độ trương nở; (ii) mức độ gia cố của các chỉ tiêu cơ lý thay đổi ra sao khi hàm lượng phụ gia tăng; và (iii) liệu vật liệu sau gia cố có đáp ứng yêu cầu kỹ thuật để sử dụng làm nền đường theo TCVN 9436:2012 hay không. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ tiềm năng ứng dụng của phụ gia polyme vô cơ trong xử lý các loại đất có chỉ số nhóm cao phục vụ xây dựng công trình giao thông ở Việt Nam.

2. Vật liệu và thí nghiệm

2.1. Vật liệu

Các vật liệu sử dụng trong nghiên cứu bao gồm đất thí nghiệm, xi măng và phụ gia polyme vô cơ TS (tên thương mại là TS MiKa® VN). Các chỉ tiêu cơ lý ban đầu của đất được xác định theo các tiêu chuẩn hiện hành và kết quả thí nghiệm được trình bày tại Bảng 1. Thành phần hạt của đất được trình bày tại Hình 1. Kết quả cho thấy đất có hàm lượng hạt mịn cao, giới hạn chảy lớn và sức chịu tải thấp. Theo hệ thống phân loại AASHTO M145 [1] (bản tiếng Việt là TCVN 14183:2024 [16]), đất được xếp vào nhóm A-7-6 với chỉ số nhóm GI > 20, thuộc nhóm đất rất kém đối với mục đích xây dựng nền đường ô tô.

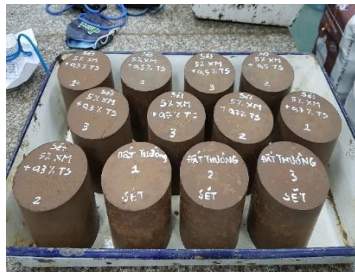
Xi măng sử dụng trong nghiên cứu là xi măng Poóc lăng hỗn hợp PCB40 Bút Sơn, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 6260:2020 [17]. Xi măng được sử dụng với vai trò là chất kết dính chính nhằm tạo cường độ ban đầu cho hỗn hợp đất gia cố.

Phụ gia sử dụng trong nghiên cứu là một loại phụ gia polyme vô cơ dạng lỏng có khối lượng riêng $1,36 \pm 0,03$ g/mL. Theo khuyến cáo của nhà sản xuất, phụ gia được pha loãng với nước theo tỷ lệ thể tích 1:20 trước khi sử dụng và phối hợp với xi măng Poóc lăng PCB40 để gia cố các đặc trưng cơ lý của đất A-7-6 có chỉ số nhóm GI > 20. Về cơ chế, phụ gia TS được kỳ vọng đóng vai trò như tác nhân hoạt hóa, thúc đẩy tương tác giữa khoáng vật sét và các sản phẩm thủy hóa của xi măng, tạo các liên kết dạng polyme vô cơ giữa các hạt đất. Nhờ đó, hỗn hợp có thể tăng cường độ, giảm tính dẻo và hạn chế khả năng trương nở [5,7,8].

Sau khi phối trộn theo thành phần thiết kế, các mẫu thí nghiệm được chế tạo và bảo quản theo quy trình quy định trong các tiêu chuẩn thí nghiệm tương ứng. Đối với thí nghiệm đầm nén Proctor cải tiến, hỗn hợp được ủ trong thời gian 24 giờ nhằm bảo đảm sự phân bố đồng đều của phụ gia và hạn chế thất thoát độ ẩm trước khi tiến hành thí nghiệm. Đối với các thí nghiệm CBR ngâm nước và độ trương nở, mẫu được chế tạo tại độ ẩm tối ưu và khối lượng thể tích khô lớn nhất tương ứng với từng cấp phối, sau đó được dưỡng hộ và ngâm nước theo quy trình quy định trong tiêu chuẩn thí nghiệm trước khi xác định các chỉ tiêu cơ lý.

Bảng 1. Các chỉ tiêu cơ lý chủ yếu của đất tự nhiên.

Chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị
Hàm lượng lọt sàng No.200	%	73
Giới hạn chảy LL	%	60,33
Giới hạn dẻo PL	%	28,24
Chỉ số dẻo PI	%	32,09
Khối lượng riêng G _s	-	2,69
Độ ẩm tối ưu OMC	%	15,59
Khối lượng thể tích khô lớn nhất MDD	g/cm ³	1,767
CBR ngâm nước	%	3,6
Độ trương nở	%	5,63
Phân loại AASHTO	-	A-7-6
Chỉ số nhóm GI	-	29



Hình 2. Chuẩn bị mẫu và thí nghiệm trong phòng: (a) chuẩn bị mẫu đầm nén; (b) xác định độ trương nở; (c) thí nghiệm xác định CBR.

3. Kết quả và thảo luận

Kết quả thực nghiệm được phân tích nhằm đánh giá ảnh hưởng của phụ gia polyme vô cơ TS đến các đặc trưng cơ lý chủ yếu của đất A-7-6 có chỉ số nhóm lớn hơn 20. Các chỉ tiêu được xem xét bao gồm đặc tính đầm nén, sức chịu tải CBR và độ trương nở. Trên cơ sở đó, khả năng ứng dụng của vật liệu sau gia cố trong xây dựng nền đường được đánh giá theo các yêu cầu kỹ thuật hiện hành.

3.1. Đặc tính đầm nén

Kết quả thí nghiệm đầm nén của các mẫu đất A-7-6 ($GI > 20$) được trình bày trong Bảng 4 và Hình 3. So với đất tự nhiên, việc gia cố bằng 5 % xi măng kết hợp với phụ gia polyme vô cơ TS đã làm tăng khối lượng thể tích khô lớn nhất (MDD) và đồng thời làm giảm độ ẩm tối ưu (OMC) của vật liệu.

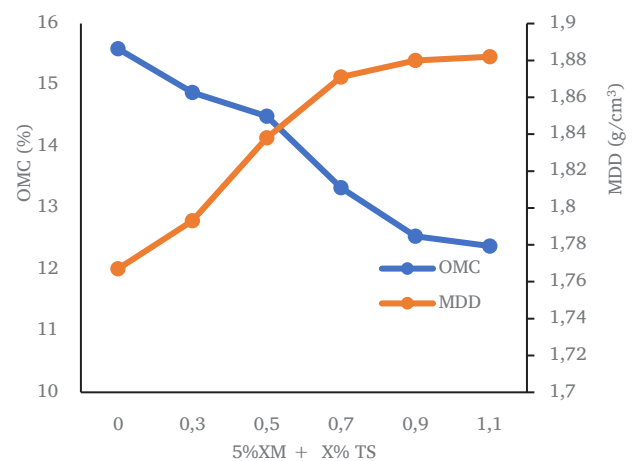
Đối với đất tự nhiên, giá trị MDD đạt khoảng $1,767 \text{ g/cm}^3$ tương ứng với OMC bằng 15,59 %. Khi hàm lượng phụ gia TS tăng từ 0,3 % lên 1,1 %, MDD tăng từ $1,793 \text{ g/cm}^3$ lên $1,882 \text{ g/cm}^3$, trong khi OMC giảm từ 14,88 % xuống còn 12,38 %. So với đất tự nhiên, giá trị MDD tăng khoảng 6,5 % và OMC giảm khoảng 20,6 %.

Bảng 4. Kết quả các đặc trưng đầm nén của đất A-7-6 ($GI > 20$) gia cố bằng xi măng và phụ gia polyme vô cơ TS.

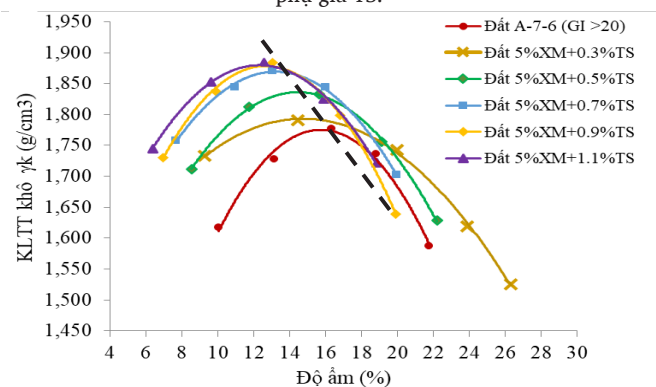
TT	Loại đất	OMC (%)	MDD (g/cm^3)
1	Đất tự nhiên A-7-6 ($GI > 20$)	15,59	1,767
2	Đất 5% XM + 0,3% TS	14,88	1,793
3	Đất 5% XM + 0,5% TS	14,49	1,838
4	Đất 5% XM + 0,7% TS	13,33	1,871
5	Đất 5% XM + 0,9% TS	12,54	1,880
6	Đất 5% XM + 1,1% TS	12,38	1,882

Phân tích các đường cong đầm nén trong Hình 4 cho thấy, sau khi gia cố bằng xi măng và phụ gia TS, các đường cong đầm nén dịch chuyển sang trái và lên trên, đồng thời đỉnh đường cong trở nên rõ ràng hơn. Điều này cho thấy cấu trúc đất đã chuyển dần từ trạng thái phân tán sang trạng thái keo tụ - kết tụ, làm giảm lượng nước hấp phụ xung quanh hạt sét và tăng khả năng đầm chặt của vật liệu. Xu hướng này

cũng đã được ghi nhận trong các nghiên cứu của Horpibulsuk và cộng sự [9], Phummiphan và cộng sự [10], cũng như các nghiên cứu tổng quan gần đây về đất gia cố bằng polymer và geopolymers [22,25].



Hình 3. Sự biến đổi của OMC và MDD của đất theo hàm lượng phụ gia TS.



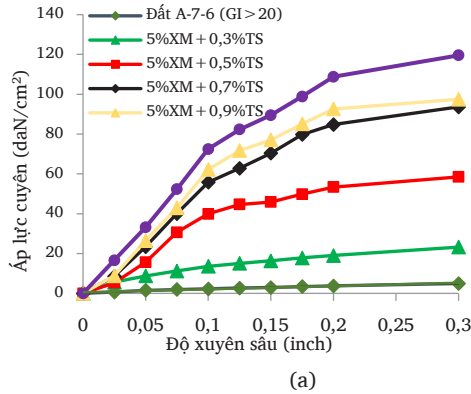
Hình 4. Đường cong đầm chặt của đất A-7-6 ($GI > 20$) và đất được gia cố bằng 5% XM với hàm lượng phụ gia TS thay đổi.

Mặc dù giá trị MDD lớn nhất và OMC nhỏ nhất đạt được tại hàm lượng 1,1 % TS, tốc độ gia tăng MDD có xu hướng giảm rõ rệt khi hàm lượng TS vượt quá 0,7 %. Cụ thể, MDD chỉ tăng từ $1,871 \text{ g/cm}^3$ lên $1,882 \text{ g/cm}^3$ khi hàm lượng TS tăng từ 0,7% lên 1,1%, cho thấy hiệu quả gia cố đặc tính đầm nén dần tiến tới trạng thái bão hòa.

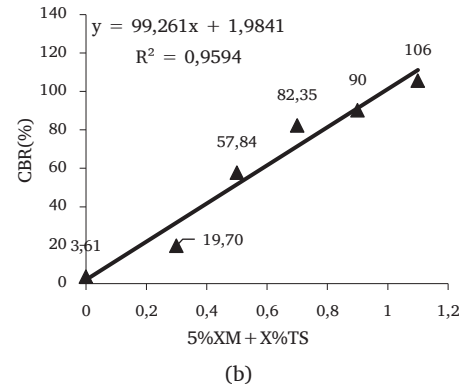
3.2. Sức chịu tải CBR

Kết quả thí nghiệm CBR ngâm nước của các mẫu đất A-7-6 được trình bày trong Bảng 5, Hình 5(a) và Hình 5(b). Đối với đất tự nhiên, giá trị CBR chỉ đạt khoảng 3,61 %, phản ánh khả năng chịu tải thấp và không đáp ứng yêu cầu đối với vật liệu nền đường theo TCVN 9436:2012.

Bảng 5. Chỉ số CBR của đất A-7-6 (GI > 20) và đất được gia cố bằng 5% XM và phụ gia TS.



Mẫu	CBR (%)
Đất tự nhiên A-7-6 (GI > 20)	3,61
5% XM + 0,3% TS	19,70
5% XM + 0,5% TS	57,84
5% XM + 0,7% TS	82,35
5% XM + 0,9% TS	90,20
5% XM + 1,1% TS	105,62



Hình 5. Chỉ số CBR của các loại đất A-7-6 (GI > 20) và đất được gia cố bằng 5% XM với hàm lượng phụ gia TS thay đổi.

Việc gia cố đất bằng 5 % xi măng kết hợp với phụ gia polyme vô cơ TS đã gia cố đáng kể khả năng chịu tải của vật liệu. Giá trị CBR tăng từ 3,61 % đối với đất tự nhiên lên 19,70 %; 57,84 %; 82,35 %; 90,20 % và 105,62 % tương ứng với hàm lượng TS bằng 0,3 %; 0,5 %; 0,7 %; 0,9 % và 1,1 %. So với đất tự nhiên, chỉ số CBR tăng khoảng 5,5 lần tại hàm lượng 0,3 % TS và tăng khoảng 29 lần tại hàm lượng 1,1% TS.

Mối quan hệ giữa hàm lượng phụ gia TS và giá trị CBR trong Hình 5(b) cho thấy CBR có xu hướng tăng gần tuyến tính với hệ số tương quan $R^2 = 0,9594$. Tuy nhiên, tốc độ gia tăng CBR giảm dần khi hàm lượng TS vượt quá 0,7 %. Giá trị CBR tăng từ 82,35 % lên 105,62 % khi hàm lượng TS tăng từ 0,7% lên 1,1%, cho thấy hiệu quả gia cố sức chịu tải của vật liệu bắt đầu tiến tới trạng thái bão hòa. Xu hướng này tương tự kết quả nghiên cứu của Zhang và cộng sự [8], Horpibulsuk và cộng sự [9], Phummiphan và cộng sự [10], Hanandeh và cộng sự [23], Turkane và Chouksey [24] cũng như Mostafa và cộng sự [26] đối với đất nền đường được gia cố bằng các hệ chất kết dính hoặc phụ gia khác nhau.

Sự gia tăng giá trị CBR có thể được lý giải bởi sự hình thành các sản phẩm liên kết thứ cấp giữa khoáng vật sét và các sản phẩm thủy hóa của xi măng dưới tác dụng của môi trường hoạt hóa do phụ gia TS tạo ra, qua đó làm tăng mức độ liên kết giữa các hạt và nâng cao khả năng chống biến dạng của vật liệu [8-10,22,25].

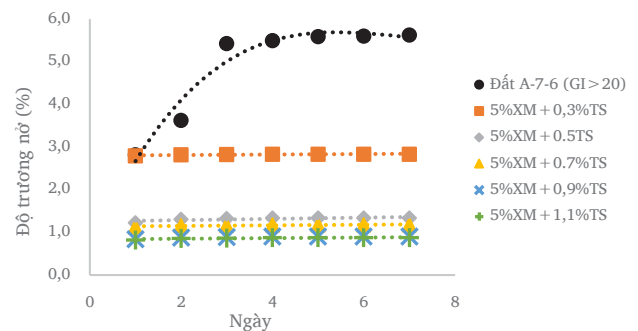
Mặc dù cấp phối 5% XM + 1,1% TS cho giá trị CBR lớn nhất đạt 105,62 %, nhưng ngay tại hàm lượng 0,3 % TS, chỉ số CBR đã đạt 19,7 %, cao gấp khoảng 5,5 lần so với đất tự nhiên và lớn hơn giá trị yêu cầu đối với nền đường theo TCVN 9436:2012.

3.3. Độ trương nở

Kết quả thí nghiệm độ trương nở của các mẫu đất A-7-6 (GI > 20) được trình bày trong Bảng 6, Hình 6 và Hình 7.

Bảng 6. Độ trương nở của đất A-7-6 (GI > 20) và đất được gia cố bằng 5% XM và phụ gia TS

Mẫu	Độ trương nở (%)
Đất tự nhiên A-7-6 (GI > 20)	5,63
5% XM + 0,3% TS	2,83
5% XM + 0,5% TS	1,34
5% XM + 0,7% TS	1,18
5% XM + 0,9% TS	0,90
5% XM + 1,1% TS	0,88

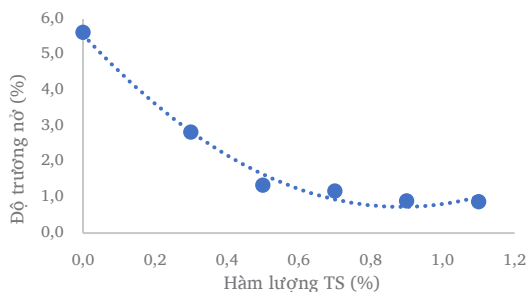


Hình 6. Diễn biến độ trương nở theo thời gian của các loại đất

Phân tích Hình 6 cho thấy, đối với đất tự nhiên, độ trương nở tăng nhanh trong 3 ngày đầu tiên và có xu hướng ổn định sau khoảng 5 ngày ngâm nước, đạt giá trị xấp xỉ 5,6 %. Giá trị này vượt quá giới hạn cho phép đối với vật liệu nền đường theo TCVN 9436:2012, cho thấy đất A-7-6 có tính nhạy nước cao và khả năng thay đổi thể tích đáng kể khi bão hòa.

Việc gia cố đất bằng 5 % xi măng kết hợp với phụ gia polyme vô cơ TS đã làm giảm rõ rệt độ trương nở của vật liệu. Giá trị độ trương nở giảm từ 5,63 % đối với đất tự nhiên xuống còn 2,83 %; 1,34 %; 1,18 %; 0,90 % và 0,88 % tương ứng với hàm lượng TS bằng 0,3 %; 0,5 %; 0,7 %; 0,9 % và 1,1 %. So với đất tự nhiên, độ trương nở giảm xấp xỉ 50 % tại hàm lượng 0,3 % TS và khoảng 84 % khi hàm lượng TS tăng lên 1,1 %.

Quan hệ giữa hàm lượng TS và độ trương nở trong Hình 7 cho thấy độ trương nở giảm nhanh khi hàm lượng phụ gia tăng từ 0 đến 0,5 %, sau đó tốc độ suy giảm có xu hướng chậm lại. Khi hàm lượng TS lớn hơn 0,7 %, giá trị độ trương nở chỉ thay đổi không đáng kể, cho thấy hiệu quả hạn chế trương nở của phụ gia dần đạt trạng thái bão hòa.



Hình 7. Độ trương nở của các loại đất biến đổi theo hàm lượng phụ gia TS.

Sự suy giảm độ trương nở có thể được giải thích bởi sự hình thành các sản phẩm liên kết giữa các khoáng vật sét và sản phẩm thủy hóa của xi măng dưới tác dụng của môi trường hoạt hóa do phụ gia TS tạo ra. Quá trình này làm giảm chiều dày lớp nước hấp phụ xung quanh các hạt sét, tăng mức độ keo tụ và tạo nên cấu trúc vật liệu ổn định hơn, từ đó hạn chế khả năng hấp thụ nước và biến đổi thể tích của đất [8-10,22,24,25].

Mặc dù cấp phối 5% XM + 1,1% TS cho giá trị độ trương nở nhỏ nhất (0,88 %), nhưng ngay tại hàm lượng 0,3 % TS, độ trương nở đã giảm xuống còn 2,83 %, thấp hơn giới hạn 3 % quy định trong TCVN 9436:2012 đối với vật liệu nền đường.

3.4. Đánh giá tổng hợp và khả năng ứng dụng của vật liệu đất A-7-6 (GI > 20) được gia cố

Kết quả nghiên cứu cho thấy việc sử dụng phụ gia polyme vô cơ TS kết hợp với 5 % xi măng đã gia cố đáng kể các đặc trưng cơ lý của đất A-7-6 có chỉ số nhóm GI > 20. So với đất tự nhiên, các cấp phối gia cố đều làm tăng khối lượng thể tích khô lớn nhất, giảm độ ẩm tối ưu, tăng đáng kể sức chịu tải CBR và hạn chế hiệu quả khả năng trương nở

của vật liệu trong điều kiện ngâm nước. Những kết quả này cho thấy hệ chất kết dính xi măng – TS có khả năng chuyển hóa đất A-7-6 từ loại đất có chất lượng kém thành vật liệu có khả năng đáp ứng yêu cầu sử dụng trong xây dựng nền đường.

Các kết quả thực nghiệm cũng cho thấy xu hướng biến đổi của các chỉ tiêu cơ lý không hoàn toàn đồng nhất. Giá trị MDD và CBR tiếp tục tăng khi hàm lượng TS tăng từ 0,3 % lên 1,1 %, trong khi độ trương nở giảm dần theo hàm lượng phụ gia. Tuy nhiên, tốc độ gia cố của các chỉ tiêu đều có xu hướng giảm khi hàm lượng TS lớn hơn khoảng 0,7 %, cho thấy hiệu quả gia cố dần tiến tới trạng thái bão hòa. Điều này có thể liên quan đến việc phản phụ gia bổ sung thêm không còn tham gia hiệu quả vào quá trình hình thành các sản phẩm liên kết thứ cấp trong vật liệu.

Theo quy định của TCVN 9436:2012, vật liệu sử dụng cho nền đường phải đáp ứng đồng thời yêu cầu về sức chịu tải và khả năng ổn định thể tích trong điều kiện làm việc. Kết quả nghiên cứu cho thấy ngay tại hàm lượng 0,3 % TS kết hợp với 5 % xi măng, chỉ số CBR ngâm nước đã đạt khoảng 19,7 %, trong khi độ trương nở giảm xuống còn khoảng 2,83 %, đều đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của tiêu chuẩn đối với vật liệu nền đường. Khi hàm lượng TS tăng từ 0,5 % đến 1,1%, giá trị CBR tiếp tục tăng lên từ 57,84 % đến 105,62 % và độ trương nở giảm xuống dưới 1,5 %, cho thấy vật liệu có khả năng duy trì sức chịu tải và tính ổn định tốt hơn trong các điều kiện khai thác hoặc môi trường ẩm ướt. Vì vậy, xét trên các chỉ tiêu đã nghiên cứu, hệ gia cố xi măng – phụ gia polyme vô cơ TS có tiềm năng áp dụng cho nền đường của nhiều cấp hạng đường khác nhau; tuy nhiên, việc lựa chọn cấp phối cụ thể vẫn cần được xác định trên cơ sở yêu cầu thiết kế của từng dự án và các chỉ tiêu cơ học bổ sung theo quy định hiện hành.

Đối với cấp phối chứa 0,3 % TS, mặc dù giá trị CBR đạt khoảng 19,7 %, thấp hơn các cấp phối có hàm lượng TS lớn hơn, nhưng đã đáp ứng yêu cầu tối thiểu đối với nền đường đắp thông thường. Khi hàm lượng TS tăng từ 0,5 % đến 1,1 %, giá trị CBR tiếp tục tăng mạnh và độ trương nở giảm xuống dưới 1,5 %, cho thấy vật liệu có khả năng sử dụng cho các vị trí nền đường yêu cầu sức chịu tải cao hơn hoặc trong điều kiện bất lợi về độ ẩm. Như vậy, việc sử dụng phụ gia polyme vô cơ TS kết hợp với xi măng không chỉ cải thiện đáng kể các đặc trưng cơ lý của đất A-7-6 mà còn mở rộng khả năng tận dụng loại đất có chỉ số nhóm lớn trong xây dựng nền đường ô tô, góp phần giảm nhu cầu thay thế đất và nâng cao hiệu quả kinh tế trong thi công.

Từ các kết quả thu được có thể thấy tổ hợp 5 % xi măng kết hợp với phụ gia polyme vô cơ TS là giải pháp có tiềm năng đối với việc xử lý các loại đất hạt mịn có chỉ số nhóm cao phục vụ xây dựng nền đường. Việc tận dụng nguồn đất tại chỗ thay thế cho giải pháp đào bỏ và thay đất không những góp phần giảm chi phí vận chuyển vật liệu mà còn mang lại lợi ích về môi trường và phát triển bền vững. Nhận định này phù hợp với xu hướng nghiên cứu gần đây về sử dụng polymer, geopolymers và các phụ gia phi truyền thống nhằm nâng cao chất lượng lớp nền đường và giảm chiều dày kết cấu áo đường [22-26]. Tuy nhiên, để đánh giá đầy đủ hơn khả năng ứng dụng trong điều kiện khai thác thực tế, cần tiếp tục nghiên cứu các đặc trưng cơ học dài hạn như mô đun đàn hồi, độ bền mỏi, khả năng chịu chu kỳ khô - ướt và xây dựng các đoạn thử nghiệm ngoài hiện trường.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã đánh giá ảnh hưởng của phụ gia polyme vô cơ TS kết hợp với 5% xi măng đến các đặc trưng cơ lý của đất A-7-6 có chỉ số nhóm GI > 20 nhằm định hướng ứng dụng làm vật liệu nền đường. Trên cơ sở kết quả thực nghiệm, có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Việc sử dụng phụ gia polyme vô cơ TS kết hợp với 5 % xi măng đã gia cố rõ rệt đặc tính đầm nén của đất A-7-6. Khi hàm lượng TS tăng từ 0,3 % lên 1,1 %, khối lượng thể tích khô lớn nhất tăng từ 1,793 g/cm³ lên 1,882 g/cm³, trong khi độ ẩm tối ưu giảm từ 14,88 % xuống còn 12,38 %. So với đất tự nhiên, MDD tăng khoảng 6,5 % và OMC giảm khoảng 20,6 %.

- Sức chịu tải CBR của đất được gia cố đáng kể sau gia cố. Giá trị CBR tăng từ 3,61 % đối với đất tự nhiên lên 19,70 %; 57,84 %; 82,35 %; 90,20 % và 105,62 % tương ứng với các hàm lượng TS bằng 0,3 %; 0,5 %; 0,7 %; 0,9 % và 1,1 %. Kết quả này cho thấy hệ chất kết dính xi măng – TS có khả năng nâng cao đáng kể khả năng chịu tải của đất A-7-6 trong điều kiện ngâm nước.

- Phụ gia TS có hiệu quả rõ rệt trong việc hạn chế sự biến đổi thể tích của đất. Độ trương nở giảm từ 5,63 % đối với đất tự nhiên xuống còn 2,83 %; 1,34 %; 1,18 %; 0,90 % và 0,88 % tương ứng với các hàm lượng TS bằng 0,3 %; 0,5 %; 0,7 %; 0,9 % và 1,1 %, cho thấy khả năng gia cố đáng kể tính ổn định thể tích của vật liệu trong môi trường bão hòa nước.

- Các kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu quả gia cố các đặc trưng cơ lý có xu hướng giảm dần khi hàm lượng phụ gia TS vượt quá khoảng 0,7 %, biểu hiện thông qua tốc độ tăng MDD và CBR giảm xuống, trong khi độ trương nở thay đổi không đáng kể. Điều này cho thấy hiệu quả gia cố dần đạt trạng thái bão hòa ở các hàm lượng phụ gia cao.

- Ngay tại hàm lượng 0,3 % TS kết hợp với 5 % xi măng, giá trị CBR đạt 19,70 % và độ trương nở giảm xuống còn 2,83 %, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật đối với vật liệu nền đường theo TCVN 9436:2012. Kết quả nghiên cứu cho thấy phụ gia polyme vô cơ TS kết hợp với xi măng là giải pháp có tiềm năng trong việc gia cố các loại đất hạt mịn có chỉ số nhóm cao, góp phần tận dụng nguồn vật liệu tại chỗ và giảm nhu cầu thay thế đất trong xây dựng công trình giao thông.

- Để đánh giá đầy đủ hơn khả năng ứng dụng của loại vật liệu này trong điều kiện thực tế, cần tiếp tục nghiên cứu các đặc trưng cơ học dài hạn như cường độ nén không hạn chế, mô đun đàn hồi, độ bền dưới tác động của chu kỳ khô – ướt và xây dựng các đoạn thử nghiệm ngoài hiện trường.

Tài liệu tham khảo

- [1]. AASHTO M145 (2020), Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.
- [2]. [F.C. Townsend (1985), Geotechnical Characteristics of Residual Soils, Journal of Geotechnical Engineering, 111(1), 77-94.
- [3]. [S. Horpibulsuk, A. Suddeepong, P. Chamket, A. Chinkulkijniwat (2013), Compaction behavior of fine-grained soils, lateritic soils and crushed rocks, Soils and Foundations, 53(1), 166-172.

- [4]. Little D.N., Nair S. (2009), Recommended Practice for Stabilization of Subgrade Soils and Base Materials, NCHRP Report 144.
- [5]. Provis J.L. (2018), Alkali-activated materials, Cement and Concrete Research, 114, 40-48.
- [6]. Puppala A.J. (2016), Advances in Ground Modification with Chemical Additives: From Theory to Practice, Transportation Geotechnics, 9, 123-138.
- [7]. Davidovits J. (1994), High-Alkali Cements for 21st Century Concretes, ACI SP-144, 383-397.
- [8]. Zhang M., Guo H., El-Korchi T., Zhang G., Tao M. (2013), Experimental feasibility study of geopolymers as the next-generation soil stabilizer, Construction and Building Materials, 47, 1468-1478.
- [9]. Horpibulsuk S., Phummiphan I., Sukmak P., Chinkulkijniwat A., Arulrajah A., Shen S.L. (2016), Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer, Road Materials and Pavement Design, 17(4), 877-891.
- [10]. [10] Phummiphan I., Horpibulsuk S., Rachan R., Arulrajah A., Shen S.L., Chindaprasit P. (2018), High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material, Journal of Hazardous Materials, 341, 257-267.
- [11]. Abdullah H.H., Shahin M.A., Sarker P. (2019), Use of Fly-Ash Geopolymer Incorporating Ground Granulated Slag for Stabilisation of Kaolin Clay Cured at Ambient Temperature, Geotechnical and Geological Engineering, 37, 721-740.
- [12]. Teerawattanasuk C., Voottipruex P. (2019), Comparison between cement and fly ash geopolymer for stabilized marginal lateritic soil as road material, International Journal of Pavement Engineering, 20(11), 1264-1274.
- [13]. Sharma K., Kumar A. (2020), Utilization of industrial waste-based geopolymers as a soil stabilizer – A review, Innovative Infrastructure Solutions, 5:52.
- [14]. TCVN 9436:2012, Nền đường ô tô – Thi công và nghiệm thu.
- [15]. TCCS 38:2022/TCĐBVN, Áo đường mềm – Các yêu cầu và chỉ dẫn thiết kế.
- [16]. TCVN 14183:2024, Đất xây dựng – Phân loại đất theo AASHTO.
- [17]. TCVN 6260:2020, Xi măng Poóc lăng hỗn hợp – Yêu cầu kỹ thuật.
- [18]. TCVN 4198:2014, Đất xây dựng – Phương pháp phân tích thành phần hạt trong phòng thí nghiệm.
- [19]. TCVN 4197:2012, Đất xây dựng – Phương pháp xác định giới hạn dẻo và giới hạn chảy trong phòng thí nghiệm.
- [20]. TCVN 12790:2020, Đất, đá đầm dùi trong công trình giao thông – Đầm nén Proctor.
- [21]. TCVN 12792:2020, Đất, đá đầm dùi trong công trình giao thông – Phương pháp xác định chỉ số CBR trong phòng thí nghiệm.
- [22]. Huang J., Kogbara R.B., Hariharan N., Masad E.A., Little D.N. (2021), A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization, Construction and Building Materials, 305, 124685.
- [23]. Hanandeh S., Ardah H., Ardah A.I.S., Abu-Farsakh M. (2022), Prediction of the resilient modulus of stabilized weak subgrade for pavement design structure, Transportation Geotechnics, 37, 100856.
- [24]. Turkane S.D., Chouksey S.K. (2023), Design of flexible pavement thickness using stabilized high plastic soil by means of fly ash-based geopolymer, International Journal of Pavement Engineering, 24(1), 2044035.
- [25]. Nagaraju T.V., Mantena S., Gobinath R., Bonthu S., Alisha S.S. (2023), Geopolymer-stabilized soils: influencing factors, strength development mechanism and sustainability, Journal of Taibah University for Science, 17(1), 2248651.
- [26]. Mostafa A.E.A., Eisa M., Ibrahim M.F. (2024), Effect of stabilizing subgrade layer using various additives on the flexible pavement design, Innovative Infrastructure Solutions, 9, 147.