

ĐẶC ĐIỂM CƯỜNG ĐỘ ĐẤT YẾU GIA CỐ BẰNG CÁC LOẠI TRO XỈ KHÁC NHAU

Nguyễn Thị Phương Linh^a, Nguyễn Văn Nam^b, Ngô Thanh Phong^b,
Trần Thanh Danh^a, Nguyễn Bá Phú^{b,*}

^aKhoa Xây dựng, Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh,
số 35 - 37 đường Hồ Hảo Hớn, phường Cầu Ông Lãnh, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

^bKhoa Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Công Nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh,
số 12 Nguyễn Văn Bảo, phường Hạnh Thông, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

Nhận ngày 26/02/2025, Sửa xong 30/5/2025, Chấp nhận đăng 29/7/2025

Tóm tắt

Hiện nay ngành xây dựng đang đối mặt với vấn đề thiếu cát để sử dụng làm vật liệu san lấp nền. Trong khi đó, việc xử lý lượng tro xỉ dư thừa từ các nhà máy nhiệt điện lại hết sức cấp bách. Do đó việc nghiên cứu tái sử dụng đất bùn yếu kết hợp với các loại tro xỉ nói chung trở thành hướng nghiên cứu cấp bách hiện nay ở trong và ngoài nước. Nghiên cứu này khảo sát đặc điểm cường độ đất yếu có gia cố bằng xỉ măng và các loại tro xỉ khác nhau như tro bay, tro đáy, và xỉ (slag), từ đó xác định khả năng áp dụng các loại vật liệu trong xây dựng. Một số thí nghiệm nén một trục không hạn chế nở hông (UCS) được thực hiện với các mẫu vật liệu hỗn hợp. Các mẫu nén UCS được thực hiện tại độ ẩm tối ưu sau khi thực hiện thí nghiệm đầm chặt. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng cường độ nén của các mẫu đều tăng theo thời gian bảo dưỡng. Cường độ nén mẫu hỗn hợp đất yếu và xỉ măng cho kết quả tốt hơn các mẫu khác. Sự phát triển cường độ của hỗn hợp đất và xỉ mặc dù chậm hơn hỗn hợp đất và tro đáy (hoặc tro bay) nhưng cho cường độ lớn hơn ở thời gian bảo dưỡng mẫu dài hơn (ví dụ 14 ngày).

Từ khóa: tro bay; tro đáy; xỉ; đất yếu; xây dựng bền vững.

UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH CHARACTERISTICS OF SOFT SOIL REINFORCEMENT BY DIFFERENT TYPES OF ASH/SLAG

Abstract

Currently, the construction industry is facing a shortage of sand for use in concrete and backfill materials. At the same time, addressing the disposal of ash (fly ash, bottom ash, and slag) from thermal power plants is crucial to minimizing environmental impacts. Therefore, the study of reusing soft mud (or dredged soil) combined with various types of ash and slag has become an urgent research direction both domestically and internationally. This study investigates the strength characteristics of soft soil reinforced with different types of ash and slag to determine their applicability in construction. Several unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted using mixed material samples, including soft soil combined with fly ash, bottom ash, slag, and cement. These compression tests were carried out at the optimum moisture content following compaction tests. The obtained results show that the compressive strength of the samples increases with curing time. The mixture of soft soil and cement yielded the highest strength compared to other samples. Although the strength development of the soil and slag mixture was slower than that of the soil and bottom (or fly ash) mixtures, it achieved greater strength after longer curing periods (e.g., 14 days).

Keywords: fly ash; bottom ash; slag; soft soil; sustainable construction.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(3V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(3V)-09) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: nguyenbaphu@juh.edu.vn (Phú, N. B.)

1. Giới thiệu

Do sự phát triển kinh tế cùng với quá trình gia tăng dân số đòi hỏi nhu cầu xây dựng các công trình dân dụng và công nghiệp hay cơ sở hạ tầng giữa các vùng miền tăng cao. Do đó nhu cầu sử dụng vật liệu trở nên rất lớn, đặc biệt là vật liệu sử dụng trong san lấp và chế tạo bê tông. Cho đến nay, cát vẫn là vật liệu chính và được sử dụng thường xuyên trong các hạng mục xây dựng (ví dụ như công tác san lấp, bê tông, vật liệu đắp nền đường). Những năm gần đây do sự đẩy mạnh các công trình xây dựng cơ sở hạ tầng (như hệ thống đường cao tốc) dẫn đến tình trạng thiếu trầm trọng nguồn cát. Theo số liệu thống kê trên Tạp chí Xây dựng Việt Nam [1], nhu cầu sử dụng cát hàng năm lên đến 575 triệu m^3 , tuy nhiên công suất khai thác cát trên cả nước chỉ đạt 4,58 triệu m^3 . Con số này chỉ đáp ứng 1,5% nhu cầu sử dụng cát hàng năm để phục vụ cho các công trình xây dựng [1]. Điều này có thể làm chậm đáng kể đến tiến độ các công trình xây dựng và ảnh hưởng đến giá thành công trình cũng như tác động đến môi trường khi lượng cát được khai thác quá mức. Trước sự khó khăn này, việc nghiên cứu những vật liệu mới nhằm thay thế nguồn cát tự nhiên trở nên cấp bách trong lĩnh vực xây dựng ở trong và ngoài nước.

Những năm gần đây, việc tái sử dụng các loại đất yếu (đất bùn, đất nạo vét) để thay thế cát trong xây dựng được nghiên cứu nhiều ở trong và ngoài nước [2, 3]. Việc tái sử dụng đất nạo vét thường được nghiên cứu khi cho kết hợp với các loại vật liệu phế thải khác như tro bay (fly ash), tro đáy (bottom ash) hoặc xỉ (slag). Những vật liệu hỗn hợp này thường được nghiên cứu sử dụng cho các công tác san lấp hoặc đất đắp nền đường [4]. Đất nạo vét thường là các loại đất bùn yếu phân bố ở khu vực ven kênh rạch và sông hoặc biển. Một số trường hợp do yêu cầu xây dựng trong công tác móng, một lượng lớn đất bùn được yêu cầu nạo vét để thay thế bằng đất tốt hơn. Đất yếu cũng cần nạo vét nhằm đảm bảo yêu cầu giao thông đường thủy hay nhu cầu cấp và tiêu nước ở các khu vực như đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL). Do đó, khối lượng đất nạo vét hàng năm thải ra môi trường rất lớn, có thể lớn đến vài chục triệu m^3 [5]. Phần lớn các loại đất yếu nạo vét được xem như loại vật liệu phế thải và bỏ đi. Điều này ảnh hưởng đáng kể đến môi trường xung quanh. Ví dụ, các loại đất nạo vét phế thải nếu đổ xuống biển sẽ gây ảnh hưởng đến môi trường sống cho các loại cá, tảo hoặc sự phát triển cho các loài thủy sinh khác.

Hiện nay việc tái sử dụng các loại tro và xỉ cũng trở nên cấp bách do lượng tro xỉ thải ra môi trường ngày một tăng trên mỗi quốc gia. Hiện tại ở Việt Nam có hơn 13 triệu tấn tro, xỉ được thải từ các nhà máy nhiệt điện [6]. Có thể lấy ví dụ lượng tro bay tăng đáng kể từ 2005 đến năm 2020, xem Bảng 1 [7]. Với khối lượng tro xỉ thải ra hàng năm lớn, môi trường sống có thể chịu ảnh hưởng đáng kể. Điều này là vấn đề cấp bách cần được nghiên cứu xử lý và tận dụng các loại phế thải trong xây dựng.

Bảng 1. Tro bay từ các nhà máy nhiệt điện từ năm 2005 đến năm 2020 [7]

TT	Năm	Lượng tro bay (triệu tấn)
1	2005	1,3–1,52
2	2010	3,82–4,46
3	2015	5,61–6,55
4	2020	6,51–7,60

Một số nghiên cứu trước đây [8–11] cho thấy rằng cơ chế tăng cường độ của hỗn hợp đất yếu và xỉ măng hoặc các loại tro xỉ dựa trên quá trình phản ứng hóa học giữa xỉ măng (hoặc tro xỉ) và nước, và tương tác giữa xỉ măng (hoặc tro xỉ) và cũng như các thành phần khoáng trong đất. Quá trình này có thể chia thành ba giai đoạn chính như sau:

(1) Quá trình thủy hóa: Khi xi măng (hoặc tro/xi) được trộn với nước, phản ứng thủy hóa bắt đầu diễn ra. Các sản phẩm chính của quá trình này bao gồm các khoáng chất như calcium silicate hydrate (C-S-H), calcium aluminate hydrate (C-A-H), và calcium hydroxide (Ca(OH)_2). Những khoáng chất này đóng vai trò chính trong việc tạo ra các liên kết rắn giữa các hạt trong hỗn hợp, giúp cải thiện độ bền và độ ổn định của vật liệu hỗn hợp.

(2) Tăng cường khả năng liên kết giữa các hạt đất: Các sản phẩm của quá trình thủy hóa (đặc biệt là C-S-H) lấp đầy các lỗ rỗng và khe hở giữa các hạt đất, tạo ra một mạng lưới vững chắc. Mạng lưới này giúp các hạt đất kết dính chặt chẽ hơn với nhau, giảm thiểu khả năng trượt hoặc tách rời giữa các hạt khi chịu nén hoặc kéo từ các tác động bên ngoài. Độ bền của đất do đó tăng lên, cùng với khả năng chịu tải trọng.

(3) Sự cải thiện tính chất cơ học của hỗn hợp: Sự hình thành các sản phẩm phản ứng (như C-S-H) và việc lấp đầy các lỗ rỗng giữa các hạt đất làm giảm độ rỗng tổng thể, tăng mật độ của hỗn hợp đất và xi măng (hoặc tro xi). Điều này dẫn đến sự gia tăng đáng kể về sức chịu tải, độ bền nén và khả năng chống cắt. Đồng thời, độ co ngót và độ biến dạng cũng giảm, giúp tăng độ ổn định tổng thể của nền đất. Cơ chế này giúp cải thiện hiệu quả các đặc tính cơ học của đất yếu, biến nó thành vật liệu có khả năng chịu tải trọng tốt hơn, đặc biệt trong các ứng dụng xây dựng như làm móng, đường, và công trình kỹ thuật. Các yếu tố có thể ảnh hưởng đến quá trình tăng cường độ của hỗn hợp đất yếu và xi măng (hoặc tro xi) như (i) Hàm lượng hạt sét, tỷ lệ lỗ rỗng, và tính thấm của đất sẽ ảnh hưởng đến tốc độ phản ứng và mức độ cải thiện cường độ; (ii) Hàm lượng xi măng càng cao thì cường độ của hỗn hợp càng lớn, nhưng cần phải tính toán hợp lý để tránh lãng phí khi áp dụng; (iii) Điều kiện môi trường như nhiệt độ và độ ẩm ảnh hưởng đến tốc độ phản ứng thủy hóa và sự phát triển của độ bền theo thời gian.

Để so sánh khả năng tái sử dụng cho các loại vật liệu tro (và xi) trong công nghiệp xây dựng, mục tiêu chính của bài báo là tiến hành khảo sát và so sánh đặc điểm cường độ nén của các hỗn hợp đất yếu kết hợp với một số loại vật liệu khác như tro bay, tro đáy, xi (slag) và xi măng. Một số thí nghiệm nén không nở hông (Unconfined Compressive Strength - USC) được thực hiện cho các mẫu nén ở các độ ẩm tối ưu từ thí nghiệm đầm chặt đất. Trong nghiên cứu này, hàm lượng gia cố đất yếu (tỷ số khối lượng tro (xi) trên khối lượng đất yếu) được cố định ở giá trị 10%. Trước khi tiến hành thí nghiệm UCS, các mẫu được bảo dưỡng ở các thời gian bảo dưỡng (TGBD) lần lượt 1 ngày, 7 ngày và 14 ngày.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng

Trong nghiên cứu này, đất bùn yếu được nạo vét ở khu vực sông Sài Gòn tại công trình xây dựng cải tạo Xa lộ Hà Nội, thuộc Quận 2, thành phố Thủ Đức, thành phố Hồ Chí Minh. Các mẫu đất sau khi xác định các chỉ tiêu cơ lý cơ bản (được trình bày như Bảng 2), tiến hành phơi và sấy khô để chuẩn bị trộn mẫu và tiến hành thí nghiệm đầm chặt.

Bảng 2. Các chỉ tiêu cơ lý đất bùn yếu thu thập từ hiện trường

Các chỉ tiêu	Giá trị
Trọng lượng riêng (γ , kN/m^3)	15,6
Độ ẩm (w , %)	67,38
Hệ số rỗng (e_0)	1,79
Tỷ trọng riêng (G_s)	2,6

Xi (slag) trong nghiên cứu này được sử dụng là xỉ hạt lò cao nghiền mịn S95 thuộc nhà sản xuất là Công ty Cổ phần Thép Hòa Phát Dung Quất. Đặc điểm xỉ lò cao hạt mịn S95 tuân thủ theo TCVN 11586:2016 [12] và có các chỉ tiêu cơ lý và thành phần hóa học như Bảng 3.

Bảng 3. Các chỉ tiêu cơ lý và thành phần hóa học xỉ sử dụng

Các chỉ tiêu	Giá trị
Khối lượng riêng (g/cm^3)	2,85
Độ ẩm (%)	1,0
Hàm lượng SiO_2 (%)	32,9
Hàm lượng Al_2O_3 (%)	14,8
Hàm lượng CaO (%)	35,4
Hàm lượng MgO (%)	2,3
Hàm lượng SO_3 (%)	1,3

Tro bay sử dụng trong nghiên cứu này được thu thập từ nhà máy nhiệt điện Duyên Hải 1 thuộc tỉnh Trà Vinh. Xi măng sử dụng là xi măng Holcim. Bảng 4 trình bày thành phần hóa học của xi măng và tro bay sử dụng trong nghiên cứu. Các mẫu vật liệu được sử dụng để tạo vật liệu hỗn hợp như Hình 1.

Bảng 4. Thành phần hóa học xi măng và tro bay sử dụng trong nghiên cứu

Các chỉ tiêu	Giá trị	
	Xi măng	Tro bay
Khối lượng riêng (g/cm^3)	3,06	2,22
Hàm lượng SiO_2 (%)	23,5	59,2
Hàm lượng Fe_2O_3 (%)	3,7	6,1
Hàm lượng Al_2O_3 (%)	6,0	26,7
Hàm lượng CaO (%)	59,9	1,1
Hàm lượng MgO (%)	2,0	0,9
Hàm lượng SO_3 (%)	0,4	0,1
Thành phần khác (%)	1,1	3,9



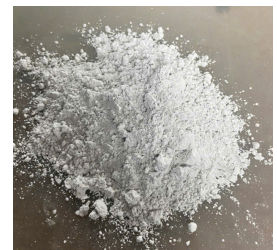
(a) Mẫu đất



(b) Mẫu tro đáy



(c) Mẫu tro bay



(d) Mẫu xi

Hình 1. Các mẫu vật liệu dùng trong nghiên cứu

2.2. Thiết bị thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, thí nghiệm được thực hiện khảo sát đặc điểm nén mẫu một trục không hạn chế nở hông theo TCVN 9438:2012 [13]. TCVN 9438:2012 được xây dựng trên cơ sở tham khảo

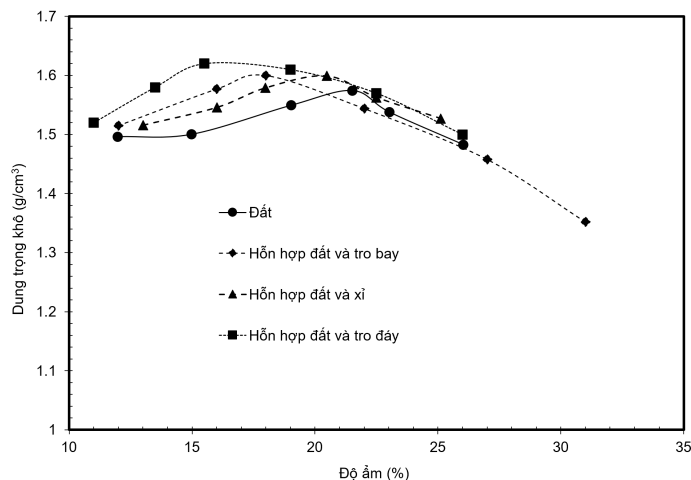
tiêu chuẩn ASTM D 2166-06 [14] của Hoa Kỳ (Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil). Cường độ nén mẫu một trục không hạn chế nở hông (q_u) là thông số cơ bản nhằm đánh giá cường độ kháng nén trong điều kiện nở hông. Với ưu điểm thí nghiệm được xác định nhanh, nên thí nghiệm UCS xác định q_u thường được sử dụng trong thiết kế công trình. Trong nghiên cứu này, các mẫu nén UCS được thực hiện tại độ ẩm tối ưu của các mẫu hỗn hợp. Độ ẩm tối ưu được xác định từ thí nghiệm đầm chặt theo TCVN 12790:2020 [15]. Thí nghiệm nén một trục nở hông được thực hiện trên máy nén 3 trục hãng UTEST (xem Hình 2) tại phòng thí nghiệm công trình thuộc Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công Nghiệp TP. Hồ Chí Minh.



Hình 2. Máy nén 3 trục hãng UTEST sử dụng cho thí nghiệm nén UCS

2.3. Quá trình thí nghiệm

Nghiên cứu này khảo sát đặc điểm cường độ của đất yếu trộn với xi măng và các loại vật liệu phế thải khác nhau như tro đáy, tro bay và xỉ. Hàm lượng vật liệu phế thải trong vật liệu hỗn hợp được chọn với tỷ số theo phần trăm khối lượng của đất yếu là 10%. Theo các nghiên cứu trước đây [16, 17], tỷ lệ thích hợp trộn xi măng/vật liệu phế thải thường thay đổi trong khoảng 7% đến 15% trọng lượng khô của đất cần được xử lý. Do đó trong nghiên cứu này, tỷ lệ 10% được chọn nhằm làm căn cứ so sánh cường độ của các hỗn hợp. Ở đây lưu ý phần trăm khối lượng được tính theo tỷ số khối lượng của xi măng (hoặc tro xỉ) đối với khối lượng đất yếu ($a = \frac{m_{tro}}{m_{soil}} \cdot 100\%$). Trong nghiên cứu này, thí nghiệm UCS được thực hiện tại độ ẩm tối ưu mỗi vật liệu hỗn hợp trộn lần lượt với xi măng, tro đáy, tro bay và xỉ. Độ ẩm tối ưu thu được từ thí nghiệm đầm chặt theo phương pháp đầm nén tiêu chuẩn [15]. Ở độ ẩm này, nước trong đất ở dạng nước liên kết tại dung trọng khô lớn nhất. Các độ ẩm tối ưu của các vật liệu hỗn hợp của đất yếu trộn với tro đáy, tro bay và xỉ lần lượt là 15,5%, 18%, 20,5%.



Hình 3. Đường cong đầm chặt các loại hỗn hợp đất và các loại tro xỉ khác nhau

Trong khi đó độ ẩm tối ưu của đất không gia cố là 21,8%. Nhìn chung độ ẩm tối ưu của hỗn hợp đất yếu và xi lớn hơn so với các loại hỗn hợp khác. Điều này cho thấy xi có tính hấp thụ nước tốt hơn so với các tro khác (tro bay và tro đáy). Các đường cong đầm chặt thu được từ thí nghiệm đầm chặt được thể hiện như Hình 3.



Hình 4. Hình ảnh mẫu đúc trong thí nghiệm UCS

Sau khi đầm chặt để thu được các độ ẩm tối ưu, tiến hành tạo mẫu theo đúng kích thước của khuôn nén UCS. Trong nghiên cứu này, kích thước mẫu nén UCS có chiều cao gấp đôi kích thước đường kính mẫu, ở đây đường kính mẫu 5 cm và chiều cao mẫu 10 cm. Các mẫu nén UCS sau khi hoàn thành quá trình đầm chặt được cân, để kiểm tra lại dung trọng khô nhằm đảm bảo không sai khác quá 1% so với dung trọng khô lớn nhất từ thí nghiệm đầm chặt (như Hình 3). Các mẫu sau khi đầm chặt tạo mẫu được bảo dưỡng tránh bị mất nước ở nhiệt độ phòng (nhiệt độ khoảng 25 °C) và được nén ở thời gian bảo dưỡng (TGBD) lần lượt 1, 7 và 14 ngày tuổi. Theo nghiên cứu của Nguyễn Sỹ Hùng và Vương Hoàng Thạch [16], cường độ hỗn hợp đất và xi măng tại thời điểm 14 ngày đạt khoảng 90-94% so với cường độ tại 28 ngày. Do đó trong nghiên cứu này, cường độ của các mẫu được đánh giá tại thời điểm 14 ngày. Trong thực tế, đối với thi công đầm đất cho nền san lấp (hay nền đường), thông thường các lớp phía trên được thi công ngay sau khi kết thúc quá trình thi công đầm chặt của lớp dưới [17]. Do đó thời gian dưỡng 14 ngày có thể xem như đảm bảo cường độ cho hỗn hợp đất và tro xi. Thực tế, thời gian bảo dưỡng này cho phép không làm gián đoạn thời gian thi công công trình. Hình 4 thể hiện các mẫu được đúc xong và bọc nilon chuẩn bị bảo dưỡng.

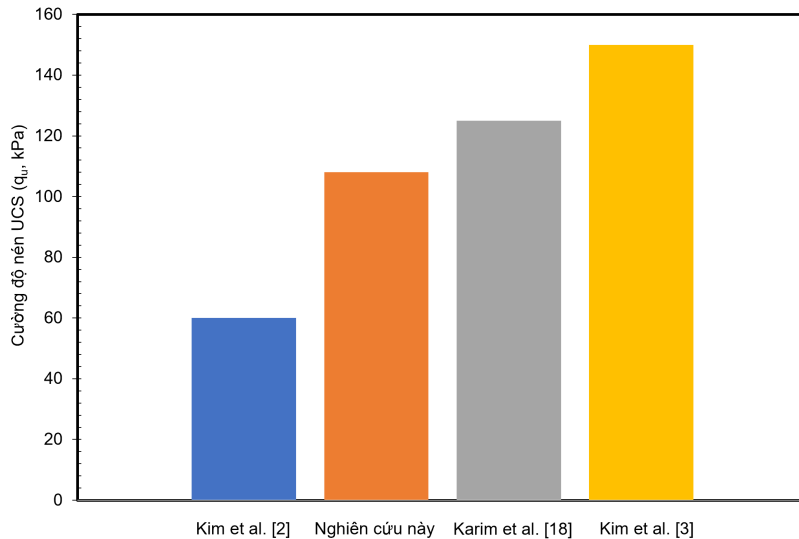


Hình 5. Hình ảnh minh họa mẫu bị phá hoại trong thí nghiệm UCS

Sau thời gian bảo dưỡng mẫu (1, 7 và 14 ngày), tiến hành lắp mẫu vào buồng nén và nén mẫu đến khi phá hoại. Tốc độ nén được cài đặt ở tốc độ là 2 mm/phút cho tất cả các mẫu nén. Hình ảnh mẫu phá hoại được thể hiện như Hình 5. Nhìn chung, dạng phá hoại mẫu trong thí nghiệm nén không hạn chế nở hông phụ thuộc vào nhiều yếu tố như: loại đất, độ ẩm tối ưu, độ chặt, và các yếu tố liên quan đến cấu trúc hạt và điều kiện thí nghiệm. Dựa vào hình dạng phá hoại mẫu trong nghiên cứu này, cho thấy mẫu bị phá hoại theo dạng phá hoại do trượt cắt dọc theo một mặt phẳng yếu hình thành trong mẫu.

3. Kết quả nghiên cứu

Cường độ nén UCS của đất nạo vét phụ thuộc nhiều vào các yếu tố như loại đất, hàm lượng nước, mức độ cố kết, hoặc mức độ đầm chặt. Trong trường hợp đất yếu chứa nhiều hàm lượng hữu cơ và hàm lượng nước lớn sẽ cho tính nén lớn. Thông thường đối với đất nạo vét trước khi đầm chặt, cường độ UCS thường nhỏ hơn 25 kPa [16, 17]. Tuy nhiên đối với đất nạo vét được đầm chặt, cường độ UCS ở độ ẩm tối ưu thường từ 70 đến 200, tùy thuộc loại đất. Hình 6 so sánh cường độ nén UCS của đất không gia cường tại độ ẩm tối ưu của nghiên cứu hiện tại và các nghiên cứu trước đây [2, 3, 18].



Hình 6. Cường độ nén UCS của đất không gia cường tại độ ẩm tối ưu theo các nghiên cứu khác nhau

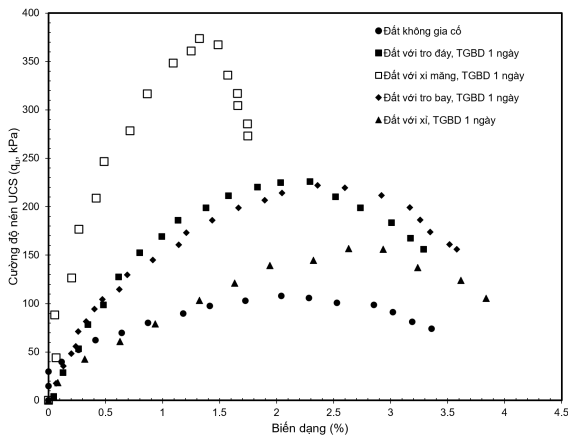
Hình 7 diễn tả kết quả nén UCS các mẫu sau các thời gian lần lượt 1 ngày, 7 ngày và 14 ngày. Kết quả nén mẫu cho thấy rằng tất cả các mẫu có cường độ tăng theo thời gian bảo dưỡng (TGBD). Kết quả nhìn chung phù hợp với các nghiên cứu trước đây [19, 20]. Mẫu hỗn hợp đất và xi măng cho kết quả lớn nhất so với các mẫu còn lại. Kết quả này cho thấy hỗn hợp đất và xi măng tạo ra cường độ tốt nhất so với các loại hỗn hợp đất và các tro xỉ khác. Điều này chứng tỏ xi măng có khả năng cải thiện tính chất cơ học tốt nhất so với các loại tro xỉ khác sử dụng trong nghiên cứu này. Các sản phẩm hóa học (ví dụ như C-S-H và C-A-H) từ quá trình thủy hóa xi măng đóng vai trò chính trong việc tạo ra liên kết rắn giữa các hạt, từ đó gia tăng đáng kể về cường độ nén và khả năng chống cắt của mẫu.

Đối với mẫu hỗn hợp đất và tro đáy, cường độ nén UCS nhỏ hơn cường độ mẫu đất và xi măng nhưng lớn hơn các mẫu hỗn hợp khác trong khoảng TGBD ban đầu (từ 1). Tuy nhiên, kết quả nén từ 7 ngày trở lên cho thấy cường độ nén mẫu nhỏ hơn cường độ của mẫu hỗn hợp đất và xi, và mẫu đất và xi măng. Nhìn chung, cường độ nén q_u của hỗn hợp đất và tro đáy luôn lớn hơn cường độ đất và tro bay và đất không gia cố. Kết quả còn cho thấy biến dạng tại thời điểm phá hoại của hỗn hợp mẫu đất và tro bay luôn nhỏ hơn các mẫu còn lại. Kết quả này có thể giải thích rằng hỗn hợp đất và tro đáy có hàm lượng hạt thô (từ tro đáy) hơn các hỗn hợp còn lại. Một số nghiên cứu trước đây [2–4] cho thấy rằng đối với đất không dính như cát, sỏi, hoặc các vật liệu có kết cấu rời rạc, biến dạng tại lúc phá hoại thường nhỏ hơn. Các loại đất này thường có tính chất giòn, tức là mẫu sẽ bị phá hủy nhanh chóng sau khi đạt cường độ cực đại với một lượng biến dạng nhỏ.

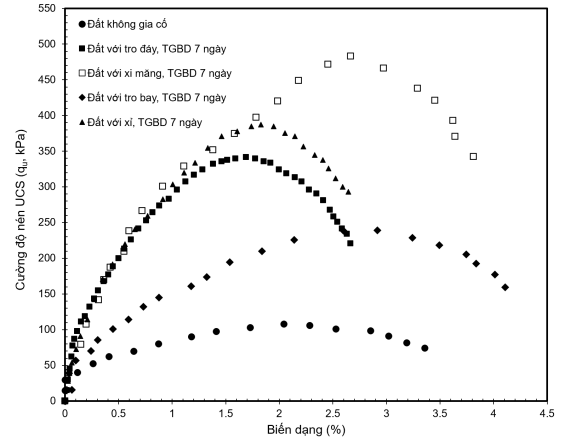
Tương tự cho kết quả nén mẫu hỗn hợp đất và tro bay, cường độ nén mẫu luôn nhỏ hơn cường độ hỗn hợp đất và tro đáy (và hỗn hợp đất và xi măng) trong các TGBD. Tro đáy có cấu trúc hạt lớn và

góc cạnh hơn, điều này có thể giúp cải thiện tính liên kết cơ học giữa các hạt trong hỗn hợp đất. Cấu trúc hạt của tro đáy tạo ra nhiều điểm tiếp xúc và ma sát hơn, giúp tăng cường độ nén của hỗn hợp.

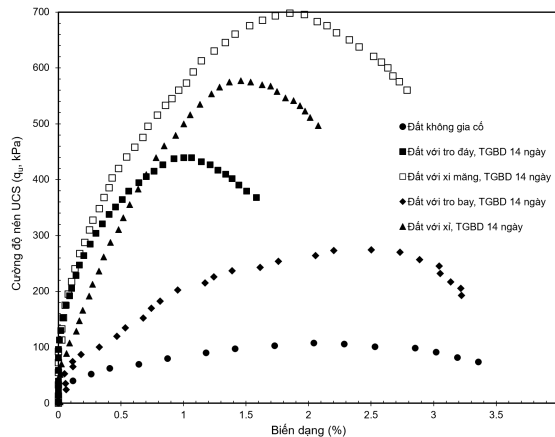
Đối với hỗn hợp đất và xỉ, kết quả nén nở hông cho thấy rằng cường độ của mẫu phát triển chậm hơn so với các hỗn hợp khác (ngoại trừ so với xỉ măng). Cụ thể, cường độ nén của mẫu đất và xỉ ở các thời điểm TGBD mẫu 1 ngày đều nhỏ hơn mẫu hỗn hợp tro đáy và tro bay. Tuy nhiên, đến TGBD mẫu lúc 7 ngày trở lên, cường độ nén tăng và xu hướng tăng nhanh như mẫu hỗn hợp đất và xỉ măng. Một số nghiên cứu trước đây [8–11] cho thấy rằng tro bay và tro đáy có cấu trúc hạt mịn và đặc tính khoáng chất dễ phản ứng hơn, cho phép chúng nhanh chóng tham gia vào quá trình kết tinh và tạo liên kết, dẫn đến việc phát triển cường độ nhanh hơn. Trong khi đó, xỉ thường có cấu trúc tinh thể hóa cao hơn so với tro bay, làm cho nó ít phản ứng hơn ở điều kiện bình thường. Cấu trúc này cần nhiều thời gian hơn để phân hủy và tham gia vào quá trình phản ứng, làm chậm quá trình phát triển cường độ.



(a) Thời gian bảo dưỡng (TGBD) 1 ngày



(b) Thời gian bảo dưỡng (TGBD) 7 ngày

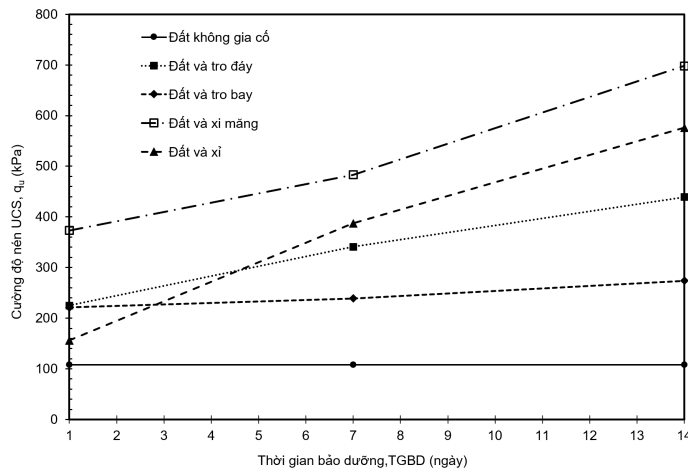


(c) Thời gian bảo dưỡng (TGBD) 14 ngày

Hình 7. Cường độ nén UCS các mẫu thí nghiệm

Sự phát triển cường độ của các mẫu theo thời gian bảo dưỡng có thể đánh giá từ Hình 8. Kết quả nén UCS của các mẫu đều tăng theo TGBD (1 ngày, 7 ngày và 14 ngày) (ngoại trừ cường độ nén của đất không gia cường). Kết quả cho thấy rằng cường độ nén hỗn hợp đất và xỉ tăng chậm trong giai đoạn đầu (từ ngày thứ nhất), tuy nhiên tăng nhanh sau đó và mức độ tăng tương đương cường độ nén

của mẫu đất và xi măng tại cùng thời điểm TGBD. Cụ thể, trong khoảng từ ngày thứ 7 đến ngày thứ 14, cường độ nén của hỗn hợp đất và xi măng tăng 215 kPa, trong khi mức tăng tương ứng của hỗn hợp đất và xi là 189 kPa.



Hình 8. Mối quan hệ giữa cường độ nén UCS và TGBD cho các mẫu

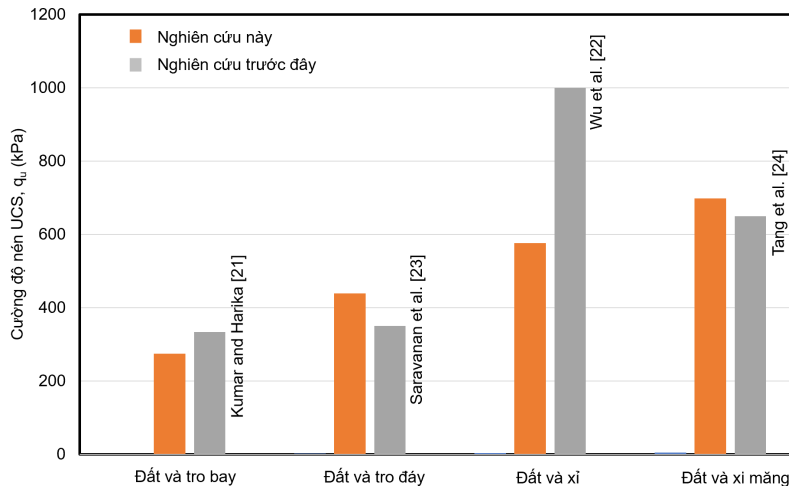
Nhìn chung sự phát triển cường độ của hỗn hợp đất và tro xi phụ thuộc vào nhiều yếu tố như loại đất sử dụng (hàm lượng hạt sét, hàm lượng hữu cơ), tỷ số gia cường theo khối lượng giữa tro xi/đất và thời gian bảo dưỡng mẫu. Mối quan hệ giữa cường độ nén nỏ hông UCS theo hàm lượng tro xi gia cố và TGBD dài hơn (như 28 ngày, 90 ngày) sẽ được tiếp tục thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

Hình 9 trình bày cường độ nén UCS của các mẫu vật liệu theo các nghiên cứu khác nhau [21–24] tại thời điểm bảo dưỡng 14 ngày. Kết quả cho thấy rằng, mặc dù cường độ của hỗn hợp đất và xi thấp hơn so với hỗn hợp đất và xi măng, nhưng vẫn cao hơn so với hỗn hợp đất và các loại tro (tro đáy và tro bay). Nhìn chung, kết quả từ nghiên cứu này phù hợp với các nghiên cứu trước đây, ngoại trừ trường hợp cường độ của hỗn hợp đất và xi trong nghiên cứu của Wu và cs. [22] cao hơn đáng kể. Theo Wu và cs. [24], các khoáng vật nguyên sinh (như SiO_2 , CaO , Al_2O_3) chiếm phần lớn trong thành phần khoáng của đất trương nở được nghiên cứu bởi Wu và cs. [22], tạo điều kiện thuận lợi cho tỷ lệ kết hợp tối ưu (AASS) trong quá trình phát triển cường độ của hỗn hợp đất trương nở và xi.

4. Kết luận

Việc tái sử dụng các loại vật liệu phế thải như tro xi để kết hợp với đất yếu (như đất nạo vét) nhằm tạo vật liệu mới thay thế vật liệu cát trong xây dựng là nhu cầu cấp bách và là một hướng phát triển bền vững trong xây dựng. Nghiên cứu này tiến hành một số thí nghiệm nén nỏ hông nhằm khảo sát và so sánh cường độ nén của các hỗn hợp đất và các loại tro xi khác nhau (tro đáy, tro bay, xi lò cao) và xi măng. Từ các kết quả thí nghiệm, một số kết luận được rút ra như sau:

- Cường độ nén các mẫu đều tăng theo thời gian bảo dưỡng, trong đó cường độ nén của mẫu hỗn hợp đất và xi măng cho kết quả lớn hơn so với các mẫu hỗn hợp còn lại.
- Cường độ của hỗn hợp đất và xi (slag) phát triển chậm hơn so với đất và tro đáy hay tro bay. Điều này có thể do sự khác biệt về tính chất hóa học và quá trình phản ứng giữa các loại vật liệu này.
- Cường độ nén nỏ hông của mẫu hỗn hợp đất và xi cho kết quả tốt hơn khi TGBD kéo dài (ví dụ như từ 7 ngày). Do đó việc kết hợp sử dụng vật liệu xi và đất yếu nạo vét có tính khả thi trong việc tạo hỗn hợp vật liệu mới để đảm bảo yêu cầu kỹ thuật nhằm thay thế vật liệu cát trong xây dựng như công tác san lấp nền.



Hình 9. Cường độ nén UCS của các mẫu vật liệu theo các nghiên cứu khác nhau

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ thiết bị của trường Đại học Công Nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh. Nhóm tác giả cũng xin cảm ơn những Phản biện đã có những góp ý quý báu, cải thiện đáng kể nội dung của bài báo.

Tài liệu tham khảo

- [1] Tạp chí điện tử Xây dựng (2020). *Giải “con khắt” cát xây dựng*. Truy cập ngày 27/09/2024.
- [2] Kim, Y. T., Kim, H. J., Lee, G. H. (2008). *Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net*. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(6):512–518.
- [3] Kim, Y. T., Lee, C., Park, H. I. (2011). *Experimental study on engineering characteristics of composite geomaterial for recycling dredged soil and bottom ash*. *Marine Georesources and Geotechnology*, 29(1): 1–15.
- [4] Kim, B., Prezzi, M., Salgado, R. (2005). *Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(7):914–924.
- [5] P., N. Q. (2022). Nghiên cứu cứng hóa đất bùn nạo vét bằng xỉ măng và phụ gia khoáng. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, (3):60–67.
- [6] Tạp chí điện tử VnEconomy (2024). *Hơn 13 triệu tấn tro, xỉ thải từ các nhà máy nhiệt điện, xử lý thế nào?* Truy cập ngày 27/9/2024.
- [7] Cổng thông tin điện tử Bộ Xây dựng (2024). *Tái chế và sử dụng tro xỉ ở các nhà máy nhiệt điện chạy than ở Việt Nam*. Truy cập ngày 27/9/2024.
- [8] Ahmaruzzaman, M. (2010). *A review on the utilization of fly ash*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3):327–363.
- [9] Edil, T. B., Acosta, H. A., Benson, C. H. (2006). *Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2):283–294.
- [10] Hasnat, A., Ahmed, S. T., Mustafa, T., Chowdhury, M. S., Prince, S. M. (2020). *Improvement of bearing capacity of clay soil using fly ash*. *AIUB Journal of Science and Engineering (AJSE)*, 19(2):55–62.
- [11] Karim, H., Samueel, Z., Jassem, A. (2020). *Influence of fly ash addition on behavior of soft clayey soil*. *Engineering and Technology Journal*, 38(5):698–706.
- [12] TCVN 11586:2016. *Xỉ hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [13] TCVN 9438:2012. *Đất xây dựng - Phương pháp xác định độ bền nén một trục nở hông*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [14] ASTM D2166-06 (2010). *Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil*. Philadelphia.

- [15] TCVN 12790:2020. *Đất, đá dăm dùng trong công trình giao thông - Đầm nén Proctor*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [16] Hùng, N. S., Thạch, V. H. (2019). [Gia cường nền đất yếu có cát san lấp bằng cọc xi măng - đất](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 13(4V):159–168.
- [17] Đức, N. M., Thắng, L. A., Khải, N. Q. (2019). [Nghiên cứu chỉ số CBR của đất bùn lòng sông đầm chặt gia cường hỗn hợp xi măng – cát](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 13(5V): 112–123.
- [18] Karim, H., Samueel, Z., Jassem, A. (2020). [Influence of fly ash addition on behavior of soft clayey soil](#). *Engineering and Technology Journal*, 38(5):698–706.
- [19] Vũ, B.-T., Nguyễn, T. H., Quách, H.-H. (2018). Thí nghiệm cường độ đất gia cố xi măng cho nền đường khu công nghệ cao Hòa Lạc. *Địa kỹ thuật*, (4):32–39.
- [20] Đỗ, H. Đ., Nguyễn, T.-N. (2021). Thí nghiệm đặc tính cường độ vật liệu đất yếu trộn xi măng và tro bay áp dụng xử lý nền đất yếu theo phương pháp gia cố toàn khối. *Giao thông Vận tải*, (5):95–99.
- [21] Kumar, P., Harika, S. (2021). [Stabilization of expansive subgrade soil by using fly ash](#). *Materials Today: Proceedings*, 45(7):6558–6562.
- [22] Wu, J., Liu, Q., Deng, Y., Yu, X., Feng, Q., Yan, C. (2019). [Expansive soil modified by waste steel slag and its application in subbase layer of highways](#). *Soils and Foundations*, 59(4):955–965.
- [23] Saravanan, S., Manikanta, S., Venkatsubramanian, C., Muthu, D. (2017). Effect of bottom ash on the soil. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(2):117–127.
- [24] Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., Cai, Y. (2007). [Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil](#). *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3):194–202.