

Độ bền xói ngập của đất gia cường xi măng và sợi rơm

Phan Thành Chiến^{1*}

¹Khoa Xây dựng, Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật TP.HCM

TỪ KHOÁ

Xói ngập
Ứng suất cắt cực hạn
Hệ số xói
Đất gia cường
Sợi rơm

TÓM TẮT

Bộ thí nghiệm xói tia nước ngập đã được phát triển nhằm nghiên cứu quá trình xói của đất gia cường xi măng và sợi rơm. Các mẫu đất gia cường với độ ẩm ban đầu 40 %, hàm lượng xi măng từ 5 đến 15 kg/m³ và hàm lượng sợi rơm từ 15 đến 30 kg/m³ đã được khảo sát. Sự phát triển độ sâu xói theo thời gian thực được đo đạc, và độ sâu xói cân bằng sau đó được dự đoán thông qua phân tích số liệu thí nghiệm. Kết quả cho thấy ứng suất cắt cực hạn và hệ số xói của đất gia cường bị chi phối mạnh bởi hàm lượng xi măng và sợi rơm. Độ sâu hố xói giảm đáng kể khi tăng hàm lượng xi măng hoặc sợi rơm, trong đó gia cường bằng xi măng cho hiệu quả giảm xói rõ rệt hơn so với cùng một hàm lượng sợi. Đất gia cường thể hiện nhiều cơ chế xói khác nhau, bao gồm xói bề mặt, xói dạng khối và xói dạng phiến mỏng, với xói dạng khối là cơ chế chiếm ưu thế. Đồng thời, ứng suất cắt cực hạn tăng và hệ số xói giảm khi tăng hàm lượng vật liệu gia cường. Ngoài ra, mối quan hệ thực nghiệm dạng hàm lũy thừa giữa hệ số xói và ứng suất cắt cực hạn đã được thiết lập với hệ số tương quan cao ($R^2 = 0.94$). Kết quả nghiên cứu cho thấy đất gia cường xi măng và sợi rơm có khả năng kháng xói cao, là giải pháp bền vững và hiệu quả cho các công trình đất chịu tác động của dòng chảy.

KEYWORDS

Submerged jet erosion
Critical shear stress
Erodibility coefficient
Reinforced soil
Rice straw fibers

ABSTRACT

A submerged jet erosion test apparatus was developed to investigate the erosion behavior of cement-rice straw fiber-reinforced soils. Reinforced soil specimens with an initial water content of 40 %, cement contents ranging from 5 to 15 kg/m³, and rice straw fiber contents from 15 to 30 kg/m³ were examined. The scour depth was continuously measured, and the equilibrium scour depth was subsequently estimated through data analysis. The results indicate that both the critical shear stress and the erodibility coefficient of the reinforced soils are strongly governed by the cement and fiber contents. Scour depth decreases significantly with increasing cement or fiber content, with cement reinforcement providing a more pronounced reduction than an equivalent amount of fiber. The reinforced soils exhibited multiple erosion mechanisms, including surface erosion, mass erosion, and flake erosion, among which mass erosion was the dominant mode. Concurrently, the critical shear stress increased, while the erodibility coefficient decreased with increasing reinforcement content. In addition, an empirical power-law relationship between the erodibility coefficient and the critical shear stress was established with a high correlation coefficient ($R^2 = 0.94$). The results demonstrate that cement-rice straw fiber-reinforced soils exhibit high resistance to hydraulic erosion, offering a sustainable and effective solution for earth structures subjected to flowing water.

1. Giới thiệu

Quá trình xói là một trong những nguyên nhân chính gây mất ổn định và sạt lở bờ sông. Quá trình này bao gồm sự phá vỡ cấu trúc, tách rời, vận chuyển và tái phân bố các hạt đất dưới tác động của dòng nước chảy, gió và trọng lực [1]. Tại Đồng bằng sông Cửu Long, hiện tượng xói lở bờ sông diễn ra đặc biệt nghiêm trọng. Mặc dù Chính phủ Việt Nam đã triển khai nhiều chương trình quy mô lớn nhằm giảm thiểu và thích ứng với xói lở, tổn thất bờ sông vẫn còn đáng kể, cho thấy sự cần thiết phải phát triển các phương pháp hiệu quả hơn trong quản lý và kiểm soát xói lở [2-4].

Cơ chế xói lở bờ sông xảy ra khi các yếu tố ngoại lực như áp lực dòng chảy và trọng lượng bản thân tác động vào khối đất vượt quá sức

kháng cắt của vật liệu [5]. Mức độ xói lở chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố, bao gồm đặc tính đất, lưu lượng dòng chảy, hình học bờ, và điều kiện nước ngầm. Đất cát thường bị xói thấp do độ thấm lớn, trong khi đất sét thường có khả năng chống lại việc xói tách rời hạt đất cao hơn. Ngược lại, đất bùn được xem là dễ bị xói mòn nhất, do các hạt bùn dễ bị tách rời và vận chuyển dưới tác động của dòng chảy [6]. Độ ẩm của đất cũng là một yếu tố chi phối tính xói lở, vì độ ẩm cao làm giảm khả năng kháng cắt của khối đất.

Thí nghiệm xói tia nước ngập đã được sử dụng rộng rãi từ những năm 1950 để đánh giá khả năng chống xói lở của khối đất bờ sông [7-10]. Khả năng chống xói lở này được xác định thông qua 2 thông số chính là hệ số xói k_d và ứng suất cắt cực hạn τ_c . Đối với đất dính, xói lở là quá trình phức tạp ảnh hưởng đồng thời bởi tính chất cơ học của

*Liên hệ tác giả: chienpt@hcmute.edu.vn

Nhận ngày 11/02/2026, sửa xong ngày 09/04/2026, chấp nhận đăng ngày 10/04/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2026.1251>

bản thân khối đất và tia nước tác động vào khối đất này. Theo Hanson [8], cường độ xói lở được thể hiện theo phương trình (1).

$$\varepsilon_r = k_d (\tau - \tau_c) \quad (1)$$

trong đó ε_r là tốc độ xói (cm/s), k_d là hệ số xói (cm^3/Ns), τ là ứng suất cắt tác dụng lên bề mặt đất (Pa), và τ_c là ứng suất cắt cực hạn của bản thân khối đất (Pa). Hai thông số k_d và τ_c phụ thuộc vào đặc tính cơ học của khối đất như tỷ lệ sét/bùn, loại đất, thành phần hạt, và độ ẩm đất [11-13].

Hiểu rõ cơ chế xói lở của đất dưới điều kiện tia nước ngập là hết sức cần thiết để đánh giá tính ổn định của các công trình sử dụng vật liệu đất dưới ảnh hưởng của các điều kiện thủy lực dòng chảy như đập đất, đê, kênh dẫn và các công trình chỉnh trị sông khác. Các nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng độ sâu xói ngập tỷ lệ thuận với hàm logarit thời gian tác động của dòng tia [8, 14-16]. Trong khi đó, ứng suất cắt lớn nhất do tia nước này gây ra không xuất hiện ngay trên trục tia mà tại vị trí lệch tâm một khoảng nhỏ theo phương bán kính [17]. Huang [18] đã chứng minh được rằng sự xói mòn có tương quan chặt chẽ với khối lượng riêng của khối đất, qua đó làm nổi bật vai trò chi phối của các đặc trưng vật lý của đất đối với cơ chế và cường độ xói.

Trong những năm gần đây, việc sử dụng sợi rơm kết hợp với xi măng ngày càng thu hút sự quan tâm như một giải pháp bền vững nhằm cải thiện các tính chất cơ học của đất yếu và bùn nạo vét [19]. Sợi rơm giúp giảm vết nứt, giảm tính giòn, gia tăng cường độ kháng nén và cắt, và tăng độ bền [20].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về xói tia nước ngập cho các loại đất không dính như đất cát, cũng như trong đất sét, rất ít nghiên cứu tập trung vào đặc trưng xói của đất gia cường bằng hỗn hợp xi măng và vật liệu sợi tự nhiên. Do đó, nghiên cứu này nhằm tập trung khảo sát đặc trưng xói của đất gia cường bằng sợi rơm kết hợp với xi măng thông qua thí nghiệm xói tia nước ngập, trong đó tỷ lệ phối trộn các thành phần vật liệu đất được thay đổi thay vì điều chỉnh các điều kiện thủy lực dòng chảy. Từ đó, các mối quan hệ thực nghiệm được xây dựng nhằm dự báo hệ số xói ngập và ứng suất cắt cực hạn của hỗn hợp đất gia cường.

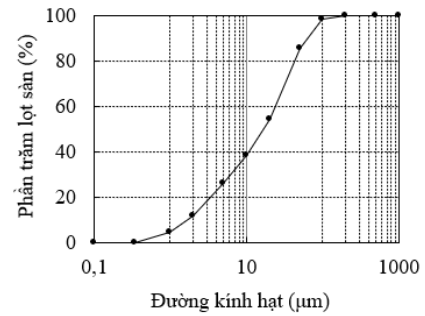
2. Vật liệu

2.1. Xi măng

Xi măng Portland loại I theo tiêu chuẩn ASTM C150 [21] được sử dụng. Trong nghiên cứu, hàm lượng xi măng và hàm lượng sợi được xác định theo đơn vị kg trên một đơn vị thể tích (kg/m^3) đất ẩm.

2.2. Đất

Đất sử dụng trong nghiên cứu này là loại đất bùn lấy từ lòng kênh nội đồng thuộc khu vực xã Tân Thuận Bình, tỉnh Đồng Tháp. Đất bùn sau khi thu thập được loại bỏ các rễ cây và thành phần hữu cơ, sấy khô và nghiền nhỏ. Đường phân bố thành phần hạt và các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của đất lần lượt được trình bày trong Hình 1 và Bảng 1.



Hình 1. Đường phân bố thành phần hạt đất thí nghiệm.

Bảng 1. Tính chất cơ lý đất thí nghiệm.

Tính chất	Giá trị
D_{50} (μm)	17.2
Độ ẩm tối ưu (%)	31.7
Khối lượng riêng khô, ρ_s (kg/m^3)	2467
Giới hạn chảy, LL (%)	46.1
Giới hạn dẻo, PL (%)	29.4
Chỉ số dẻo, PI (%)	16.7

2.3. Sợi rơm

Rơm rạ được thu thập từ nguồn vật liệu địa phương. Do rơm rạ tự nhiên có chiều dài lớn và đường kính không đồng đều, vật liệu này không thể sử dụng trực tiếp cho mục đích gia cường đất; vì vậy, một quy trình tiền xử lý đã được áp dụng để tạo ra sợi rơm phù hợp. Phương pháp xé tơ tạo sợi trong điều kiện ngập nước được sử dụng, bao gồm các bước sau: rơm rạ thô được cắt ngắn thành các đoạn có chiều dài xấp xỉ 3 cm, sau đó ngâm trong nước ở 20 °C trong 24 giờ; tiếp theo, rơm được xé tơ bằng tác động cơ học của máy xay trong điều kiện ngập nước để thu được sợi rơm. Các sợi rơm này tiếp tục được sấy khô ở 100 °C trong 24 giờ, sau đó để nguội ở nhiệt độ phòng trong 24 giờ trước khi sử dụng. Các đặc trưng vật lý của sợi rơm thu được sau khi xé tơ được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Đặc tính của sợi rơm.

Tính chất	Giá trị
Khả năng hút ẩm (%)	300
Độ ẩm ban đầu (%)	5
Chiều dài (mm)	13.2 ± 6.3
Độ dày (mm)	0.23 ± 0.14
Cường độ chịu kéo đứt (Mpa)	$4.2 \sim 246.2$

3. Chương trình thí nghiệm

3.1. Tạo mẫu

Sợi rơm và xi măng được trộn vào đất ẩm với các điều kiện thí nghiệm được thiết lập như Bảng 3. Đất với độ ẩm 40 % được sử dụng

dựa trên kết quả phân tích tính chất cơ lý (Bảng 1) và xem xét độ ẩm tự nhiên của đất sét khu vực Đồng bằng sông Cửu Long (dao động trong khoảng 21.5 % tới 97.4 % [22]). Trong nghiên cứu, độ ẩm 40 % lớn hơn độ ẩm tối ưu, nằm trong khoảng giới hạn dẻo và giới hạn chảy của đất thí nghiệm nhằm giúp tăng cường sự phân bố của sợi rơm trong ma trận đất và cung cấp đủ nước cho quá trình thủy hóa hoàn toàn của xi măng. Sau đó, hỗn hợp đất được dưỡng hộ trong túi kín chống bay hơi trong vòng 3 ngày ở nhiệt độ 20 °C.

Sau 3 ngày, mẫu đất thí nghiệm được tạo dạng trụ tròn với đường kính 21.6 cm và chiều cao 8 cm. Quá trình đầm nén tạo mẫu được thực hiện theo 4 lớp, mỗi lớp được đầm 20 chày bằng chày đầm có khối lượng 1,5 kg với chiều cao rơi tự do 20 cm, nhằm đảm bảo năng lượng đầm nén đồng nhất cho tất cả các mẫu. Phương pháp tạo mẫu này tuân theo hướng dẫn của Hiệp hội xi măng Nhật bản (Japan Cement Association JCAS L-01:2006) [20]. Để đảm bảo độ tin cậy của kết quả, mỗi tỷ lệ trộn được tạo với 3 mẫu.

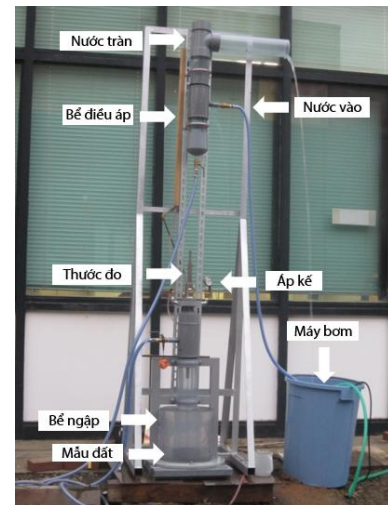
Mẫu sau khi đầm nén tiếp tục được dưỡng hộ trong túi kín ở nhiệt độ 20°C trong 7 ngày nhằm đảm bảo quá trình đông kết và phát triển cường độ. Thời gian dưỡng hộ 7 ngày được lựa chọn dựa trên tiêu chuẩn ASTM D1633 [23] và quá trình phát triển thủy hóa của xi măng đối với ứng xử giai đoạn sớm của đất gia cường. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng phần lớn quá trình thủy hóa xi măng diễn ra trong 7 ngày đầu tiên, trong đó các sản phẩm thủy hóa chủ yếu như gel C-S-H và C-A-H được hình thành nhanh chóng, làm tăng đáng kể liên kết giữa các hạt đất và cường độ cơ học của vật liệu [24]. Trong giai đoạn này, đất gia cường có thể đạt khoảng từ 60 tới 80 % cường độ cuối cùng [25], cho thấy cấu trúc đã đủ ổn định để chống lại các tác động xói lở dòng chảy có thể có từ bên ngoài. Thời gian dưỡng hộ 7 ngày cũng được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu về gia cường đất như một mốc đánh giá đặc trưng cho trạng thái làm việc ban đầu [26], đặc biệt trong điều kiện thực tế khi vật liệu có thể chịu tác động thủy lực ngay sau thi công.

Bảng 3. Điều kiện thí nghiệm.

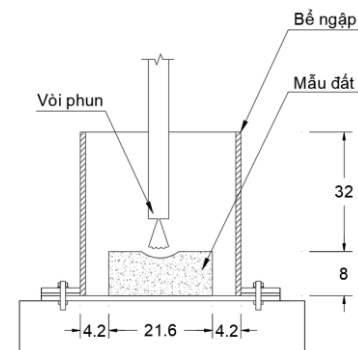
STT	Độ ẩm ban đầu W (%)	Hàm lượng xi măng C (kg/m ³)	Hàm lượng sợi rơm RS (kg/m ³)
1	40	0	0, 15, 30
2		5	0, 15, 30
3		10	0, 15, 30
4		15	0, 15, 30

3.2. Thiết bị thí nghiệm xói ngập

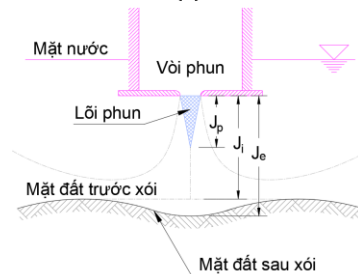
Bộ dụng cụ thí nghiệm được thiết kế nhằm khảo sát sự phát triển xói bề mặt vật liệu dưới tác dụng của dòng tia trong điều kiện ngập nước theo tiêu chuẩn ASTM D5852 [10] như Hình 2.



(a)



(b)



(c)

Hình 2. Dụng cụ thí nghiệm xói ngập: (a) hình ảnh thực tế, (b) mô hình thí nghiệm, (c) thông số tia nước ngập.

Hệ thống bao gồm vòi phun, bể điều áp, bể ngập, bơm cấp nước và hệ thống đo nhằm đảm bảo lưu lượng ổn định trong suốt quá trình thí nghiệm. Một đoạn ống trong suốt được bố trí để tạo vòi phun và kiểm soát hiện tượng tích tụ bọt khí, qua đó đảm bảo tính ổn định của tia phun. Tại tâm đáy ống, vòi phun tròn có đường kính $d_0 = 4$ mm được lắp đặt để tạo tia nước. Trong tất cả các thí nghiệm, vận tốc tia phun tại lỗ vòi được giả thiết là ổn định với vận tốc tính toán là $U_0 = 6.86$ m/s tương ứng với cột nước tác dụng $h = 2.4$ m. Tia nước được thiết kế phun vuông góc với bề mặt mẫu đất trong điều kiện ngập nước hoàn toàn. Độ sâu xói được xác định dọc theo trục trung tâm của tia nước. Các phép đo được thực hiện tại các thời điểm định trước trong

suốt quá trình xói, nhằm theo dõi sự phát triển của hố xói theo thời gian. Đối với mỗi thí nghiệm, số lượng phép đo được khuyến nghị nằm trong khoảng từ 6 đến 12 lần giá trị độ sâu xói để đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu và phục vụ cho việc xác định ứng suất cắt cực hạn τ_c và hệ số xói mòn k_d .

Khi độ sâu xói tăng theo thời gian, ứng suất cắt τ tác dụng lên bề mặt mẫu đất giảm dần do năng lượng của tia nước bị tiêu tán ngày càng nhiều trong quá trình truyền tới bề mặt mẫu. Tốc độ xói ε , giảm dần, và tiệm cận về 0 khi ứng suất cắt tiến gần đến giá trị ứng suất cắt cực hạn τ_c , khi đó hố xói đạt trạng thái cân bằng với chiều sâu J_e [27]. Thời gian cần thiết để đạt đến độ sâu xói cân bằng J_e có thể rất lớn và khó xác định tùy thuộc vào tính chất của đất. Các nghiên cứu về xói ngập trong đất cát cho thấy quá trình xói vẫn tiếp tục diễn ra ngay cả sau 14 tháng thí nghiệm [28]. Để tính toán độ sâu xói cân bằng, mối quan hệ giữa độ sâu xói J và thời gian t được giả thiết tuân theo hàm logarit. Các giá trị τ_c và k_d được xác định thông qua việc ngoại suy đường cong giữa độ sâu xói đo được và thời gian, đồng thời tối thiểu hóa sai số giữa thời gian thực đo và thời gian tính toán [29].

Phương trình (2) tới (5) trình bày mối tương quan giữa các điều kiện thủy lực dòng chảy với độ sâu xói.

$$\tau_i = \tau_0 \left(J_p / J_i \right)^2 \quad (2)$$

$$J_p = C_d d_0 \quad (3)$$

$$\tau_0 = C_f \rho U_0^2 \quad (4)$$

$$U_0 = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

trong đó τ_i là ứng suất ban đầu (Pa), τ_0 là ứng suất cực đại tia phun (Pa), $J_p = 6d_0$ là độ sâu lõi phun tính từ miệng vòi phun mà tại đó vận tốc tia tại trục trung tâm vẫn còn bằng với vận tốc tại miệng vòi phun (m), J_i là khoảng cách ban đầu từ lỗ phun tới bề mặt mẫu đất (m), $C_d = 6.3$ là hằng số khuếch tán tia phun, $d_0 = 4$ mm là đường kính lỗ phun, $C_f = 0.00416$ là hệ số ma sát, $\rho = 1000$ kg/m³ là khối lượng riêng nước, $U_0 = 6.86$ m/s là vận tốc tia phun tại lỗ vòi, $h = 2.4$ m là cột nước tác dụng, và $g = 9.81$ m/s² là gia tốc trọng trường.

Dưới tác dụng của tia nước, bề mặt mẫu đất bắt đầu bị xói ngay khi bắt đầu thí nghiệm, quá trình xói phát triển cho đến khi đạt tới độ sâu cân bằng J_e . Việc phân tích kết quả trong thí nghiệm được xây dựng dựa trên các giả thiết: (1) độ sâu cân bằng J_e là độ sâu hố xói tại đó ứng suất tác dụng lên bề mặt biên không còn đủ lớn để gây ra xói, (2) tốc độ thay đổi độ sâu xói theo thời gian trước khi đạt trạng thái cân bằng là hàm của ứng suất cắt lớn nhất tại bề mặt biên và hệ số xói mòn k_d [7-9]. Quy trình xác định ứng suất cắt cực hạn τ_c và hệ số xói k_d được thực hiện theo 2 bước sau.

3.2.1. Bước 1

Giá trị τ_c được xác định dựa vào độ sâu xói cân bằng J_e . Tuy nhiên, thời gian để đạt được trạng thái cân bằng này thường rất lâu. Vì vậy, J_e được ước tính từ dữ liệu thực nghiệm biểu diễn mối quan hệ giữa độ sâu xói và thời gian. Blaisdell và cộng sự [28] đã đề xuất một hàm hyperbol dùng để ước lượng độ sâu xói cân bằng. Dạng tổng quát

của hàm này được trình bày từ phương trình (6) đến phương trình (8).

$$x = \left[(f - f_0)^2 - A^2 \right]^{0.5} \quad (6)$$

$$f = \log(J/d_0) - \log(U_0 t/d_0) = \log(J/(U_0 t)) \quad (7)$$

$$f_0 = \log(J_e/d_0) \quad (8)$$

$$\tau_c = \tau_0 \left(\frac{J_p}{J_e} \right)^2 \quad (9)$$

trong đó A là giá trị bán trục ngang và bán trục liên hợp của đường hyperbol, t thời gian xói thực đo (s), và J là độ sâu xói tính từ lỗ phun tới mặt xói (m).

Tổng sai lệch giữa giá trị thực nghiệm và giá trị tính toán của x được tối thiểu hóa thông qua quá trình thử và sai nhằm xác định các tham số A và f_0 , với giá trị khởi đoán ban đầu là $A = 1$ và $f_0 = 1$. Trong nghiên cứu này, việc xác định các tham số được thực hiện bằng chương trình bảng tính spreadsheet kết hợp với lập trình Python. Sau khi xác định được các giá trị A và f_0 , độ sâu xói cân bằng J_e được xác định. Sau đó, giá ứng suất cắt tới hạn τ_c được tính toán bằng phương trình (9).

3.2.2. Bước 2

Giá trị hệ số xói k_d được xác định thông qua τ_0 , J_i và phương trình (10).

$$t_m = T_r \left[0.5 \ln \left(\frac{1+J^*}{1-J^*} \right) - J^* - 0.5 \ln \left(\frac{1+J_i^*}{1-J_i^*} \right) + J_i^* \right] \quad (10)$$

$$k_d = \frac{J_e}{T_r \tau_c} \quad (11)$$

trong đó t_m là thời gian xói theo tính toán (s), $T_r = J_e/(k_d \tau_c)$ là thời gian tham chiếu, $J^* = J/J_e$, và $J_i^* = J_i/J_e$ là các đại lượng độ sâu xói không thứ nguyên.

Hệ số xói k_d được xác định thông qua phương pháp thử và sai nhằm tối thiểu hóa tổng sai lệch giữa giá trị thời gian đo thực tế t và giá trị thời gian tính toán t_m . Sau khi xác định được giá trị T_r , hệ số k_d được tính toán bằng cách áp dụng phương trình (11).

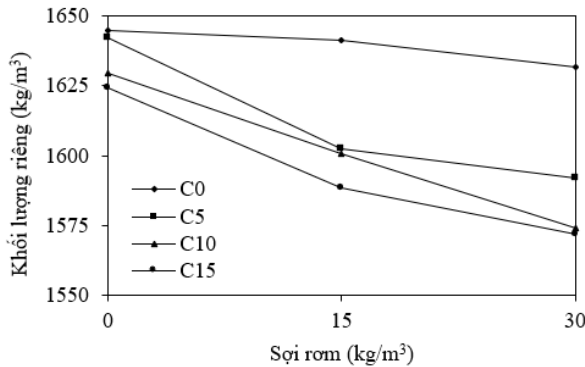
4. Kết quả

4.1. Khối lượng riêng đất gia cường

Kết quả Hình 3 cho thấy khối lượng riêng giảm rõ rệt khi tăng hàm lượng sợi rơm cho tất cả các cấp phối xi măng. Nguyên nhân chủ yếu là do sợi rơm có khối lượng riêng thấp hơn đáng kể so với đất nền. Ảnh hưởng của hàm lượng xi măng đến khối lượng riêng nhìn chung không đáng kể trong trường hợp không có sợi, tuy nhiên khi kết hợp với sợi rơm, sự thay đổi cấu trúc vi mô của hệ vật liệu làm xu hướng giảm khối lượng riêng trở nên rõ rệt hơn.

Về mặt lý thuyết, sự giảm khối lượng riêng thường đi kèm với sự gia tăng hệ số rỗng, từ đó làm giảm liên kết giữa các hạt và tăng tính thấm, dẫn đến khả năng bị xói lở cao hơn dưới tác động của dòng chảy [30]. Tuy nhiên, kết quả thí nghiệm độ sâu xói (Hình 4) lại cho thấy xu hướng ngược lại: độ sâu xói giảm đáng kể khi tăng hàm lượng xi măng và sợi rơm. Điều này cho thấy khối lượng riêng không phải là yếu tố

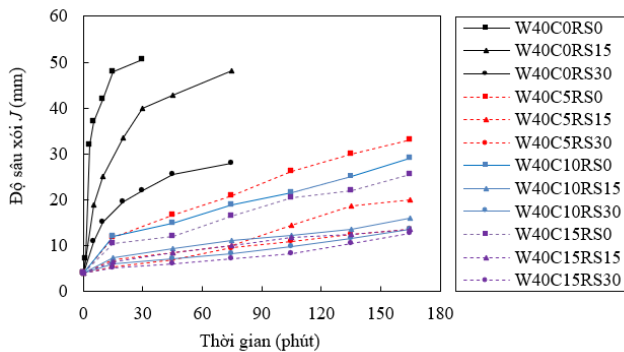
chi phối chính đối với hành vi xói lở của đất gia cường trong nghiên cứu này.



Hình 3. Khối lượng riêng đất gia cường (kg/m³).

4.2. Sự phát triển độ sâu xói

Hình 4 là kết quả đo độ sâu xói J (mm) theo thời gian của các mẫu đất thí nghiệm. Kết quả thí nghiệm cho thấy tốc độ phát triển của độ sâu xói có giá trị lớn nhất ở giai đoạn đầu thí nghiệm và giảm dần theo thời gian. Dạng biến thiên này của độ sâu xói có xu hướng như phương trình đường parabol. Giá trị J giảm dần theo thời gian khi vật liệu được gia cường thêm xi măng và sợi rơm cho thấy cho thấy sự cải thiện rõ rệt về khả năng kháng xói của đất nhờ vào tác động hiệp đồng giữa 2 loại vật liệu gia cường này.

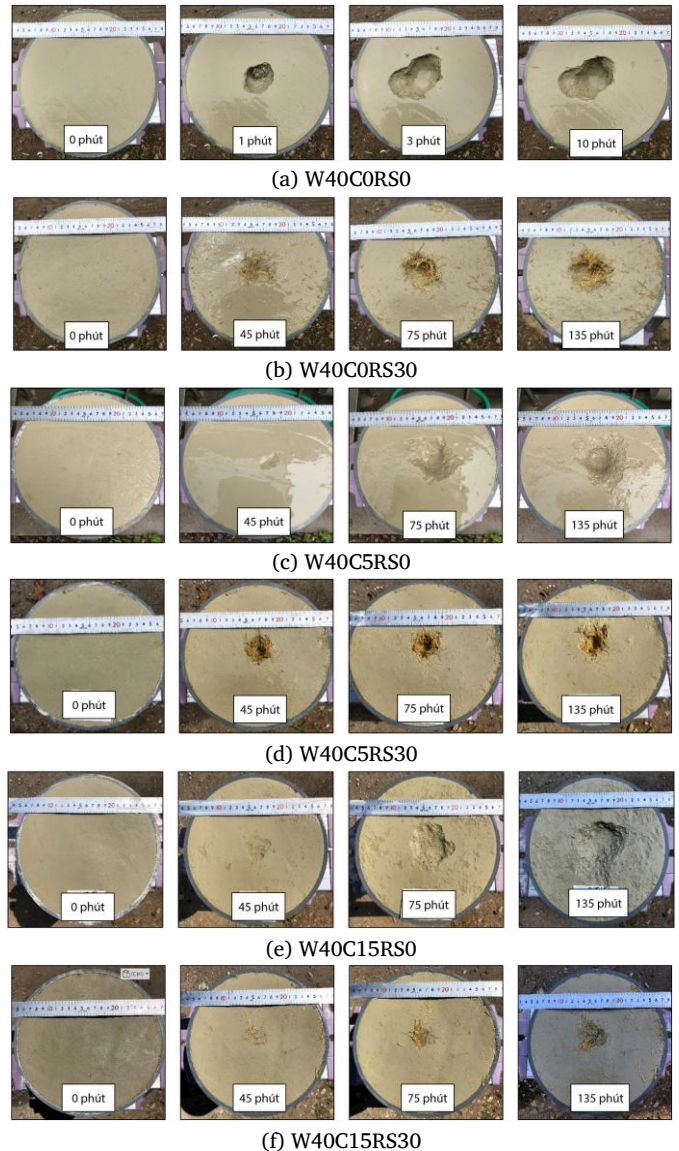


Hình 4. Sự phát triển độ sâu xói theo thời gian.

Đối với mẫu đất không gia cường (W40C0RS0), độ sâu xói J tăng rất nhanh theo hàm lũy thừa, đạt độ sâu hơn 50 mm trong thời gian ngắn. Điều này cho thấy đất chưa gia cường có sức kháng chống cắt dòng tia rất thấp. Khi bổ sung xi măng, cả tốc độ xói ban đầu và độ sâu xói cuối cùng đều giảm mạnh. Cơ chế này được giải thích là do sự hình thành của các gel silicat canxi hydrat (C-S-H) tạo ra các liên kết hóa học bền vững giữa các hạt đất, từ đó làm tăng đáng kể giá trị ứng suất cắt cực hạn của khối đất. Khi hàm lượng xi măng tăng dần từ 5 đến 15 kg/m³, biểu đồ xói chuyển dịch từ dạng đường cong dốc sang dạng tuyến tính ổn định hơn, cho thấy khối đất đất sau khi gia cố bằng xi

măng đã kiểm soát hiệu quả năng lượng động học của dòng tia. Vai trò của sợi rơm thể hiện rõ nét thông qua cơ chế gia cường cơ học thứ cấp. Trong cùng một hàm lượng xi măng, độ sâu xói luôn tỷ lệ nghịch với hàm lượng sợi. Sợi rơm đóng vai trò như một mạng lưới "cầu nối", liên kết các cụm hạt đất đã được xi măng hóa lại với nhau, tạo ra hiệu ứng đan xen giúp giữ chặt các khối hạt đất.

4.3. Cơ chế xói



Hình 5. Hình ảnh sự phát triển hố xói theo thời gian.

Các nghiên cứu trước đây chỉ ra rằng đối với đất cát thì cơ chế xói phổ biến nhất là xói bề mặt hoặc xói dạng khối [31]. Đối với dạng xói này, nước trong bể thí nghiệm nhanh chóng đục chỉ sau vài phút, và một vùng lõm nhẵn mịn hình thành trên bề mặt mẫu. Đối với các loại đất sét có mức độ cố kết cao hơn, quá trình xói có thể xảy ra thông qua sự bong tách các mảnh mỏng từ bề mặt. Dạng xói này xảy ra khi

chỉ có các phiến mỏng bị bóc tách khỏi bề mặt đất. Các phiến xói thường có dạng gần tròn, đường kính điển hình từ 1~3 mm và chiều dày nhỏ hơn 0.5 mm. Kết quả cuối cùng của xói dạng phiến là sự hình thành một hố xói dạng tròn tập trung quanh trục trung tâm của tia nước [32].

Kết quả Hình 5 cho thấy đất gia cường không bị xói theo một cơ chế duy nhất mà thể hiện nhiều hình thái hố xói khác nhau, phụ thuộc vào tỷ lệ phối trộn hàm lượng xi măng và sợi rơm. Đối với mẫu đất không gia cường Hình 5a (W40C0RS0), hố xói hình thành rất nhanh và mở rộng đáng kể chỉ sau 1 phút. Cơ chế chủ đạo ở đây là sự tách rời các hạt đất rời rạc khi ứng suất cắt của dòng tia τ vượt quá ứng suất cắt tới hạn τ_c của mẫu đất. Hố xói có xu hướng mở rộng theo chiều ngang và sâu do thiếu lực liên kết giữa các hạt. Dạng xói được xác định là xói bề mặt.

4.3.1. Ảnh hưởng của sợi rơm

Khi sợi rơm được gia cường với hàm lượng tăng từ 15 kg/m³ tới 30 kg/m³, thể tích hố xói của các mẫu giảm rõ rệt. Các Hình 5b, d, và f (W40C0RS30, W40C5RS30, và W40C15RS30) cho thấy sự hiện diện của sợi rơm trong khối đất tạo ra một sự khác biệt lớn về hình thái hố xói. Các sợi rơm đan xen tạo thành cầu nối liên kết các khối đất, khi dòng nước cố gắng bóc tách các mảng đất, sợi rơm đóng vai trò là các thanh neo giữ các khối đất lại với nhau. Ở các mẫu có sợi (RS30), hố xói thường có dạng hẹp bề mặt và sâu thay vì mở rộng bề mặt (như thấy ở Hình 5b và d). Các sợi lộ ra tại tâm hố xói tạo thành một lớp bảo vệ cục bộ, làm tiêu tán một phần năng lượng dòng tia và ngăn chặn sự phá hủy dây chuyền của các cấu trúc đất xung quanh. Dạng xói được xác định là xói dạng khối.

4.3.2. Ảnh hưởng của xi măng

Khi bổ sung xi măng (các mẫu Hình 5c W40C5RS0 và 5e W40C15RS0), diện tích bề mặt và độ sâu hố xói giảm đi rõ rệt. Các sản phẩm thủy hóa của xi măng (C-S-H) tạo ra mạng lưới liên kết cứng giữa các hạt đất. Điều này làm tăng lực dính kết và nâng cao ngưỡng ứng suất cắt tới hạn của đất gia cường. Trong mẫu Hình 5e (W40C15RS0), bề mặt đất giữ được độ phẳng lâu hơn, hố xói chỉ xuất hiện cục bộ tại tâm dòng tia và phát triển chậm. Dạng xói được xác định là xói dạng phiến.

4.3.3. Ảnh hưởng của xi măng và sợi rơm

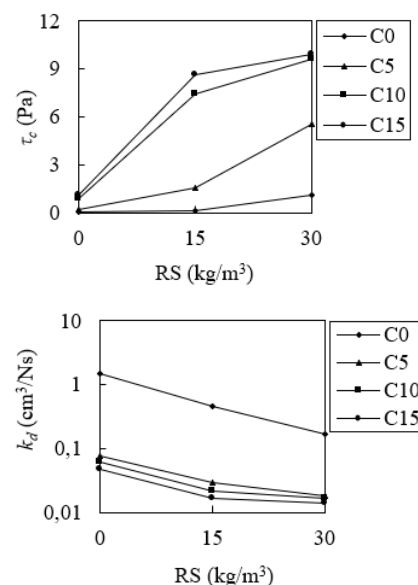
Ở điều kiện hàm lượng xi măng và sợi rơm cao nhất như Hình 5f (W40C15RS30), hố xói được phân loại theo xói dạng phiến. Tại điều kiện này bề mặt gần như không biến dạng đáng kể sau 135 phút và độ sâu hố xói nhỏ nhất. Đây là kết quả của tác động hiệp đồng: xi măng tạo gel liên kết các hạt đất nhỏ thành các cụm hạt, trong khi sợi rơm liên kết các cụm hạt này thành một khối thống nhất đồng thời sợi rơm giúp tăng một phần ứng suất kháng cắt, kết quả khối đất gia cường xi măng và sợi rơm có khả năng chịu đựng ứng suất cắt thủy lực cực hạn lớn hơn. Dạng xói được xác định trong trường hợp này là xói dạng phiến.

Nhìn chung, các dạng xói phát triển theo trình tự: xói bề mặt, xói dạng khối, và cuối cùng là xói dạng phiến. Trong đó, xói dạng khối là dạng xói chiếm ưu thế. Điều này được xác nhận với các kết quả nghiên cứu trước đây [31, 33].

4.4. Ứng suất cắt cực hạn và hệ số xói

Hình 6 trình bày sự biến thiên của giá trị ứng suất cắt cực hạn τ_c và hệ số xói k_d theo hàm lượng xi măng C và sợi rơm RS . Kết quả cho thấy τ_c tăng dần trong khi k_d giảm khi hàm lượng xi măng hoặc hàm lượng sợi tăng trong toàn bộ kết quả thí nghiệm, tuy nhiên tốc độ thay đổi phụ thuộc vào sự kết hợp giữa 2 loại vật liệu này.

Ở điều kiện không sử dụng xi măng (C0), sự gia tăng τ_c khi bổ sung sợi rơm là không đáng kể, với giá trị $\tau_c \approx 1$ Pa ngay cả khi RS đạt 30 kg/m³. Điều này dẫn đến độ dốc đường hệ số xói k_d lớn nhất. Ngược lại, đối với các mẫu có gia cường xi măng ($C \geq 5$ kg/m³), τ_c tăng rõ rệt theo hàm lượng sợi rơm, đặc biệt khi RS tăng từ 0 lên 15 kg/m³. Ở các hàm lượng xi măng cao hơn (C10 và C15), τ_c tăng nhanh ở vùng hàm lượng RS thấp nhưng có xu hướng bão hòa khi RS vượt quá 15 kg/m³. Giá trị biến thiên k_d cũng giảm tương ứng với sự thay đổi này. Với cùng một hàm lượng sợi rơm, việc tăng hàm lượng xi măng dẫn đến sự gia tăng đáng kể của τ_c , trong đó mức cải thiện lớn nhất khi hàm lượng xi măng tăng từ 5 lên 10 kg/m³.

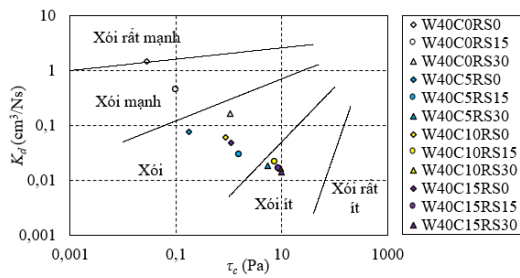


Hình 6. Kết quả ứng suất cực hạn τ_c và hệ số xói k_d

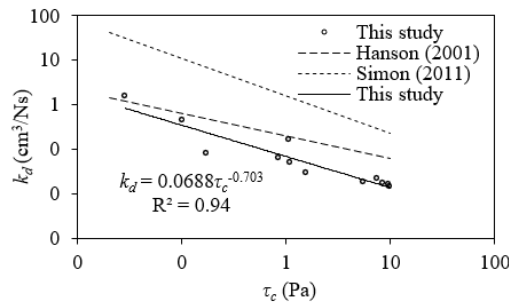
Nhìn chung, khả năng kháng xói của đất gia cường chịu sự chi phối đồng thời bởi ứng suất cắt cực hạn τ_c và hệ số xói k_d , phản ánh hai giai đoạn khác nhau của quá trình xói: khởi phát xói và tốc độ phát triển xói. Trong 2 loại vật liệu gia cường thì xi măng đóng vai trò chi phối trong việc hình thành ma trận liên kết bền vững giữa các hạt đất, từ đó làm tăng sức kháng cắt và hạn chế sự tách rời hạt dưới tác động của tia nước. Tuy nhiên, khi hàm lượng xi măng hoặc sợi đạt đến một ngưỡng nhất

định, hiệu quả cải thiện của từng thành phần có xu hướng giảm dần, phản ánh hiện tượng bão hòa cơ học của hàm lượng gia cường.

Hình 7 trình bày kết quả phân nhóm mức độ xói của các mẫu đất dựa trên giá trị ứng suất cắt cực hạn τ_c và hệ số xói k_d . Theo Hanson [34], mức độ xói được phân thành 5 cấp độ, từ “xói rất mạnh” đến “xói rất ít”. Kết quả cho thấy sự xói của các mẫu đất biến thiên trong một khoảng rất rộng khi được gia cường xi măng và sợi rơm. Mẫu dễ xói nhất là đất không gia cường, với $\tau_c \approx 0.03$ Pa và $k_d \approx 1.49$ cm³/Ns. Ở điều kiện này, mẫu bị xói rất nhanh ngay cả dưới ứng suất tác dụng thấp và trong thời gian thí nghiệm ngắn. Phần lớn các điều kiện thí nghiệm còn lại được phân loại trong khoảng từ “xói mạnh” đến “xói rất ít”. Việc gia cường xi măng và sợi rơm làm tăng cường độ và mức độ liên kết của các hạt đất, phân tán ứng suất và hạn chế chuyển vị cục bộ của các hạt đất, từ đó làm tăng khả năng kháng xói của hỗn hợp đất gia cường.



Hình 7. Phân nhóm mức độ xói.



Hình 8. Phương trình thực nghiệm tương quan ứng suất cực hạn và hệ số xói.

Hình 8 trình bày kết quả ứng suất cực hạn τ_c và hệ số xói k_d của thí nghiệm và các nghiên cứu liên quan. Hàm tương quan thực nghiệm giữa τ_c và k_d cũng được phát triển như phương trình (12) với hệ số tương quan cao $R^2 = 0.94$ cho thấy quan hệ thực nghiệm này có độ tin cậy lớn và phản ánh nhất quán cơ chế xói của đất gia cường xi măng và sợi rơm.

$$k_d = 0.0688\tau_c^{-0.703} \quad (12)$$

Kết quả này phù hợp với nghiên cứu trước đây của Hanson [34] và Simon [35]. Tuy nhiên, tại cùng một giá trị τ_c , các mẫu đất trong nghiên cứu này thường có giá trị k_d thấp hơn so với dữ liệu của Hanson (2001) và đặc biệt thấp hơn đáng kể so với Simon (2011). Sự khác biệt này có thể được giải thích bởi đặc điểm vật liệu và cơ chế gia cường. Hanson (2001) và Simon (2011) chủ yếu tập trung vào đất tự nhiên hoặc đất sét có kết, trong khi nghiên cứu này sử dụng đất gia cường.

Sự kết hợp của xi măng và sợi rơm làm tăng cường độ liên kết, ứng suất cắt và khả năng kháng xói tổng thể so với đất không gia cường giúp khẳng định việc gia cường đồng thời xi măng và sợi rơm đem lại hiệu quả cao trong khả năng kháng xói trong điều kiện tia nước ngập.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã khảo sát sự phát triển xói của đất gia cường xi măng và sợi rơm bằng thí nghiệm tia nước ngập. Kết quả cho thấy cả ứng suất cắt cực hạn τ_c và hệ số xói k_d đều bị chi phối mạnh bởi tác dụng đồng thời của hàm lượng xi măng và hàm lượng sợi gia cường. Sau đây là một số kết quả chính của nghiên cứu:

- Khối lượng riêng của đất gia cường giảm mạnh khi bổ sung sợi rơm. Xi măng ảnh hưởng đến khối lượng riêng nhìn chung không đáng kể trong trường hợp không có sợi, tuy nhiên khi kết hợp với sợi rơm, khối lượng riêng giảm rõ rệt. Nhìn chung, khối lượng riêng không phải là yếu tố chi phối chính đối với hành vi xói lở của đất gia cường trong nghiên cứu này.
- Độ sâu hố xói giảm khi tăng hàm lượng xi măng hoặc sợi rơm. So với sợi rơm, xi măng đóng vai trò chi phối trong việc gia tăng khả năng kháng xói của đất gia cường.
- Đất gia cường không xói theo một cơ chế duy nhất mà thể hiện nhiều dạng xói khác nhau, phụ thuộc vào hàm lượng xi măng và sợi rơm được thêm vào. Các dạng xói quan sát được bao gồm xói bề mặt, xói dạng khối và cuối cùng xói mòn dạng phiến mỏng, trong đó xói dạng khối là dạng xói chiếm ưu thế.
- Phương trình thực nghiệm dạng hàm lũy thừa đã được phát triển, trong đó k_d được ước tính như một hàm của τ_c , với hệ số tương quan cao $R^2 = 0.94$.

Kết quả nghiên cứu cho thấy đất gia cường bằng xi măng kết hợp sợi rơm tăng cường khả năng kháng xói đáng kể dưới tác động của tia nước ngập, làm cho vật liệu này trở thành một lựa chọn tiềm năng cho các công trình đất chịu tác dụng xói của dòng nước. Bên cạnh đó, việc sử dụng sợi tự nhiên, sẵn có và thân thiện môi trường không chỉ cải thiện hiệu quả kỹ thuật mà còn góp phần giảm phát thải và chi phí vật liệu, phù hợp với xu hướng phát triển bền vững hiện nay.

Mặc dù nghiên cứu đã cung cấp các kết quả thực nghiệm có giá trị, tuy nhiên các thí nghiệm đều được thực hiện trong điều kiện phòng thí nghiệm với một tia ngập và giả định dòng chảy là ổn định, điều này chưa phản ánh đầy đủ ảnh hưởng của tác động thủy lực phức tạp ngoài thực địa, như dòng chảy không ổn định. Mọi quan hệ thực nghiệm giữa τ_c và k_d được thiết lập dựa trên phạm vi cấp phối và điều kiện thí nghiệm nhất định, cần được kiểm chứng thêm cho các loại đất khác nhau.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được Trường Đại học Công nghệ Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh hỗ trợ thực hiện.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Zhang, G. H., Chen, J. Q., Shi, H. B., Wang, X. K., and Fang, Y. J., "Experimental study on influence of vertical submerged jet on sediment scour effect," *Port and Waterway Engineering*, Article no. 12, 17-24, 2022.
- [2]. A.F.Timan, "Mekong delta plan. Long-term vision and strategy for a safe, prosperous and sustainable delta," 2013.
- [3]. Cox, P., "Mekong delta transport infrastructure development project," Mekong development research institute 2019.
- [4]. Van, P. D. T., Popescu, I., van Griensven, A., Solomatine, D. P., Trung, N. H., and Green, A., "A study of the climate change impacts on fluvial flood propagation in the Vietnamese Mekong Delta," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 16, no. 12, 4637-4649, 2012. <https://doi.org/10.5194/hess-16-4637-2012>
- [5]. Pagonis, G., Gkias, G., Koutalakis, P., Iakovoglou, V., and Zaimes, G. N., "Assessing stream bank erosion with a visual assessment protocol in streams around Drama city, Greece," *Land*, vol. 14, no. 10, 1963, 2025. <https://doi.org/10.3390/land14101963>
- [6]. Nguyen, G. H. T., "Evaluating soil erodibility parameters with mini-jet under various soil moisture conditions," 2014.
- [7]. Hanson, G. J. and Cook, K. R., "Development of excess shear stress parameters for circular jet testing," *ASAE Annual International Meeting*, Minnesota, USA, 1997: American Society of Agricultural Engineers (ASAE)
- [8]. Hanson, G. J., "Surface erodibility of earthen channels at high stresses part II - developing an in situ testing device," *Transactions of the ASAE*, vol. 33, 132, 1990. <https://doi.org/10.13031/2013.31306>
- [9]. Hanson, G. J. and Cook, K. R., "Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ," *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 20, 455-462, 2004. <https://doi.org/10.13031/2013.16492>
- [10]. ASTM. D5852: Standard test method for erodibility determination of soil in the field or in the laboratory by the jet index method, 2007. <https://doi.org/10.1520/D5852-00R07>
- [11]. Attom, M. F. et al., "Prediction of internal erosion parameters of clay soils using initial physical properties," vol. 16, no. 2, 232, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16020232>
- [12]. Daly, E. R., Fox, G., Al-Madhhachi, A.-S., and Miller, R., "A scour depth approach for deriving erodibility parameters from Jet Erosion Tests," *Transactions of the ASABE*, vol. 56, 1343-1351, 2013. <https://doi.org/10.13031/trans.56.10350>
- [13]. R. Stein, O. and D. Nett, D., "Impinging jet calibration of excess shear sediment detachment parameters," *Transactions of the ASAE*, vol. 40, 1573-1580, 1997. <https://doi.org/10.13031/2013.21421>
- [14]. Moore, W. L. and Masch, F. D. J., "Experiments on the scour resistance of cohesive sediments," *Journal of Geophysical Research*, vol. 67, 1437-1446, 1962. <https://doi.org/10.1029/JZ067i004p01437>
- [15]. Hollick, M., "Towards a routine test for the assessment of the critical tractive forces of cohesive soils," *Transactions of the ASAE*, vol. 19, 1076, 1976. <https://doi.org/10.13031/2013.36179>
- [16]. Akin, A. A., Nguyen, G., and Sheshukov, A. Y., "Infiltration-based variability of soil erodibility parameters evaluated with the jet erosion test," vol. 16, no. 7, 981, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16070981>
- [17]. Beltaos, S. and Rajaratnam, N., "Impinging circular turbulent jets," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 100, 1313-1328, 1974. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0004072>
- [18]. Huang, J., "Experimental study of the scouring of cohesive deposits in salt water," *International Journal of Sediment Research*, vol. 8, 67-83, 1993.
- [19]. Albadrani, M. A., "Sustainable stabilization of soft clay using rice straw fibers: Mechanical and consolidation behavior," *Results in Engineering*, vol. 28, 108169, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108169>
- [20]. Chien, P. T., Satomi, T., and Takahashi, H., "Study on strength characteristics of rice straw fiber-cement-reinforced sludge," *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources*, vol. 23, 147-151, 2018. <https://doi.org/10.5188/ijsmr.23.147>
- [21]. ASTM. C150: Standard specification for portland cement, 2024. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-24
- [22]. Mi, N. V. A., Thongchart, S., and Mairaing, W., "Geological and geotechnical properties of mekong delta clay as comparison with bangkok clay," *International Journal of GEOMATE*, vol. 24, no. 101, 22-32, 2023. <https://doi.org/10.21660/2023.101.3601>
- [23]. ASTM. D2163: Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders, 2017. <https://doi.org/10.1520/D1633-17>
- [24]. Niu, D., Zhang, S., Wang, Y., Hong, M., and Li, Z., "Effect of temperature on the strength, hydration products and microstructure of shotcrete blended with supplementary cementitious materials," *Construction and Building Materials*, vol. 264, 120234, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120234>
- [25]. Chaiyaput, S., Arwaedo, N., Kingnoi, N., Nghia-Nguyen, T., and Ayawanna, J., "Effect of curing conditions on the strength of soil cement," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, e01082, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01082>
- [26]. Wahab, N. A. et al., "Strength and durability of cement-treated lateritic soil," vol. 13, no. 11, 6430, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13116430>
- [27]. Mazurek, K. A., *Scour of clay by jets*. University of Alberta, 2001.
- [28]. Blaisdell, F. W., Hebaus, G. G., and Anderson, C. L., "Ultimate dimensions of local scour," *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 107, 327-337, 1981. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005630>
- [29]. Bankhead, N., Simon, A., and Thomas, R. E., "Experiments, model development and bank stability simulations to assess bank erosion," *SN Applied Science*, 2013. <https://doi.org/10.1089/bsp.2012.0085>
- [30]. Gao, Y., Li, Z., Sun, D. a., and Yu, H., "A simple method for predicting the hydraulic properties of unsaturated soils with different void ratios," *Soil and Tillage Research*, vol. 209, 104913, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104913>
- [31]. Mazurek, K. A., Rajaratnam, N., and Sego, D. C., "Scour of cohesive soil by submerged circular turbulent impinging jets," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 127, 598-606, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:7\(598\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:7(598))
- [32]. Mitchell, J. K. and Soga, K., *Fundamentals of soil behavior*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2005, p. 592.
- [33]. Palermo, M., Di Nardi, J., Bombardelli, F. A., and Pagliara, S., "Scour due to circular jets in cohesive soils: Physical evidence from three-dimensional laboratory tests," *Physics of Fluids*, vol. 36, no. 9, 2024. <https://doi.org/10.1063/5.0228218>
- [34]. Hanson, G. J. and Simon, A., "Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA," *Hydrological Processes*, vol. 15, 23-38, 2001. <https://doi.org/10.1002/hyp.149>
- [35]. Simon, A., Pollen-Bankhead, N., and Thomas, R. E., "Development and application of a deterministic bank stability and toe erosion model for stream restoration," in *Stream Restoration in Dynamic Fluvial Systems*, ed, 2011.