



EVALUATION OF SURFACE EROSION PROPERTY OF SOIL USING LABORATORY EXPERIMENTS

Nguyen Anh Dan*, Nguyen Viet Thanh

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 18/02/2024

Revised: 17/05/2024

Accepted: 11/06/2024

Published online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.15>

* *Corresponding author*

Email: nadan@utc.edu.vn

Abstract. Nowadays, many methods can be used to predict and investigate the erosion properties of soil. The test method in the laboratory using the Erosion Function Apparatus (EFA) has been used in several countries in the world. The method allows us to investigate soil erosion rate with respect to flow velocity. This paper reported the method to evaluate erosion characteristics of marine clay using the EFA on the samples taken from the site or made in the laboratory. Firstly, the structure and function of the apparatus were generally introduced. After that, the paper presents the experimental process and theory of result analysis. Based on that research, some study cases with clay and sand were conducted. Research results indicated that the bi-directional flow caused greater erosion than uni-directional flow; Soil erosion rate increased slowly in the early stages and increases sharply after reaching the critical velocity; Based on the erosion classification chart proposed by Briaud, the experimental soil samples were classified as medium erosion level.

Keywords: Soil erosion, erosion function apparatus, erosion rate, erosion classification, critical velocity

@ 2024 University of Transport and Communications



ĐÁNH GIÁ ĐẶC ĐIỂM XÓI MẶT CỦA ĐẤT SỬ DỤNG THÍ NGHIỆM TRONG PHÒNG

Nguyễn Anh Dân*, Nguyễn Việt Thanh

Trường Đại học Giao thông Vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 18/02/2024

Ngày nhận bài sửa: 17/05/2024

Ngày chấp nhận đăng: 11/06/2024

Ngày xuất bản Online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.15>

* Tác giả liên hệ

Email: nadan@utc.edu.vn

Tóm tắt. Hiện nay, có rất nhiều phương pháp có thể dự báo và đánh giá khả năng xói mòn của đất. Trong đó, phương pháp thí nghiệm trong phòng sử dụng máy EFA (Erosion Function Apparatus) đã và đang được áp dụng ở nhiều nước trên thế giới. Phương pháp này cho phép khảo sát tốc độ xói của đất phụ thuộc vào vận tốc dòng chảy trên các mẫu đất được lấy từ hiện trường hoặc chế tạo trong phòng. Bài báo này trình bày phương pháp thí nghiệm đánh giá đặc điểm xói mòn của đất sét dưới đáy sông bằng cách sử dụng máy EFA. Trước hết, cấu tạo và chức năng của thiết bị được giới thiệu tổng quát. Sau đó, bài báo trình bày quy trình thí nghiệm và cách phân tích đánh giá kết quả. Trên cơ sở đó, trường hợp nghiên cứu cụ thể với đất sét cô kết đã được tác giả thực hiện và phân tích. Kết quả nghiên cứu cho thấy dòng chảy hai chiều gây ra xói lớn hơn dòng chảy một chiều; tốc độ xói của đất tăng chậm ở giai đoạn đầu và tăng mạnh sau khi đạt đến vận tốc tới hạn; dựa trên biểu đồ phân loại xói đề xuất bởi Briaud, mẫu đất thí nghiệm được phân loại thuộc cấp độ xói trung bình.

Từ khóa: Xói của đất, thí nghiệm EFA, tốc độ xói, phân loại xói, vận tốc tới hạn

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

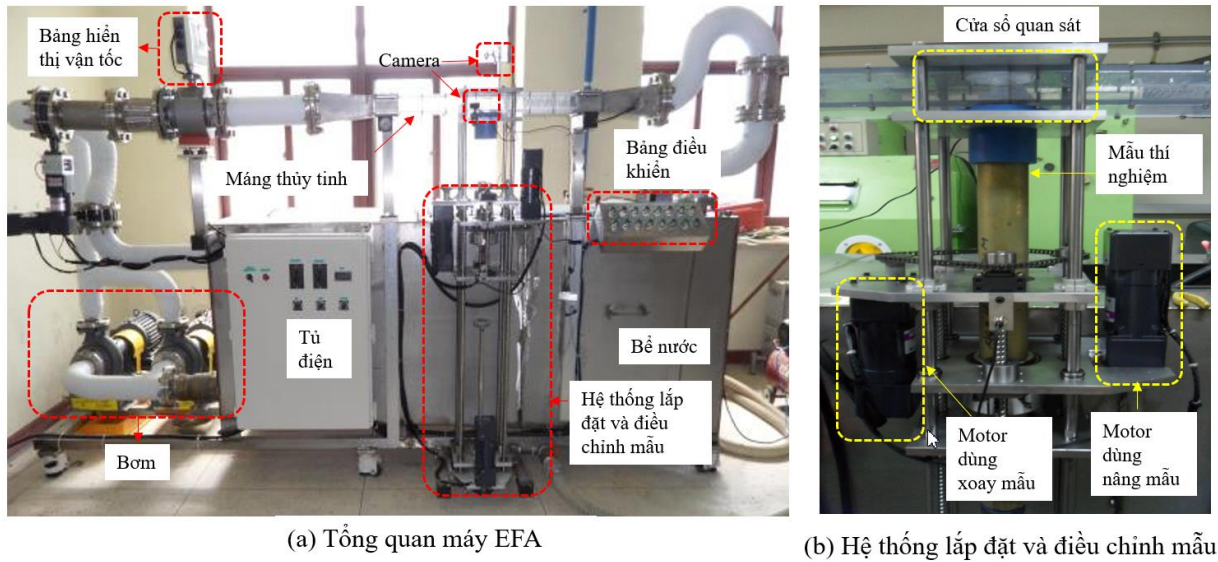
Đối với các công trình xây dựng trên sông, biển như cầu, cảng, đê, đập thì hiện tượng xói mặt rất cần được quan tâm vì nó có thể gây ảnh hưởng lớn đến nền móng, khả năng chịu lực và ổn định của các kết cấu này. Do đó, cần có những nghiên cứu để dự báo và đánh giá tính

chất, đặc điểm xói mòn ở các công trình này từ đó đưa ra những giải pháp thiết kế và chống xói mòn hợp lý. Cho đến nay, ở trong và ngoài nước cũng đã có một số tác giả nghiên cứu về vấn đề này với nhiều phương pháp khác nhau như phương pháp tính toán giải tích, quan trắc đo đạc, mô hình số, thí nghiệm trong phòng. Tiêu biểu có thể kể đến như: Vũ Đình Cường và cộng sự đã ứng dụng công nghệ viễn thám và GIS nghiên cứu diễn biến xói lở vùng bờ biển cửa sông tỉnh Thừa Thiên Huế. Các biến động dọc bờ biển Thừa Thiên Huế theo thời gian đã được phân tích đánh giá trên nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh Landsat đa thời gian và xử lý bằng phần mềm phân tích bờ biển DSAS. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đã xác định được những đoạn bờ biển bị xói lở nghiêm trọng trên bờ biển [1]. Lê Thanh Chương và Nguyễn Bình Dương đã sử dụng mô hình toán để nghiên cứu nguyên nhân xói lở bờ biển đông bán đảo Cà Mau bằng mô hình toán. Các tác giả đã sử dụng mô hình MIKE 21 để xem xét quá trình diễn biến vận chuyển bùn cát, thay đổi hình thái bãi vùng nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu đã phân nào làm sáng tỏ nguyên nhân và cơ chế gây ra tình trạng xói lở bờ biển đông bán đảo Cà Mau [2]. Phạm Thị Hương nghiên cứu xác định tốc độ xói của mẫu đất dính sử dụng thí nghiệm trên máng kính thủy lực. Bài báo đã thể hiện kết quả thí nghiệm cho loại đất có hàm lượng sét cao, xác định được vận tốc xói của đất với các giá trị vận tốc dòng chảy. Xây dựng được các đường thực nghiệm biểu diễn vận tốc xói của loại đất thí nghiệm, từ đó xác định được các hằng số xói [3]. Briaud và cộng sự đã nghiên cứu phát triển hệ thống máy EFA và thực hiện các thí nghiệm trong phòng để dự báo tốc độ xói của đất xung quanh trụ cầu [4], [5]. Tương tự, Wang và cộng sự đã xem xét và đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến tốc độ xói mòn đất dính thông qua thử nghiệm EFA [6].

Đối với phương pháp thí nghiệm trong phòng, có một số các thiết bị thí nghiệm đã được nghiên cứu và phát triển để khảo sát khả năng chống xói của đất. Nguyên tắc chung của các thiết bị này là tạo ra dòng chảy trên mẫu đất thí nghiệm với các vận tốc khác nhau, trên cơ sở đó có thể kiểm tra mối quan hệ giữa tốc độ xói của đất và ứng suất cắt gây ra bởi dòng chảy. Tiêu biểu các thiết bị này có thể kể đến như thiết bị đầu tiên có dạng ống xoay hình trụ được nghiên cứu bởi Moore and Masch [7]. Hệ thống máy EFA được phát triển bởi Briaud thuộc đại học Texas có thể khảo sát các mẫu đất dưới tác dụng của dòng chảy một chiều [8]. Sau đó, Kim và cộng sự [9] đã cải tiến để thí nghiệm các mẫu cho cả dòng chảy một chiều và hai chiều. Phương pháp thí nghiệm trong phòng có một số ưu điểm đó là kích thước mẫu không quá lớn; có thể thực hiện nhiều kịch bản khác nhau về độ lớn và hướng dòng chảy trên nhiều mẫu thí nghiệm; có thể quan sát trực quan hiện tượng cũng như định lượng tốc độ xói của đất [10]. Nghiên cứu này trình bày phương pháp thí nghiệm xác định đặc trưng xói của đất bằng thí nghiệm EFA. Trước tiên, bài báo sẽ giới thiệu tổng quan về thiết bị, quy trình thí nghiệm và phương pháp xử lý kết quả. Sau đó, trường hợp nghiên cứu cụ thể với đất bùn nạo vét dưới đáy sông sẽ được thực hiện và phân tích.

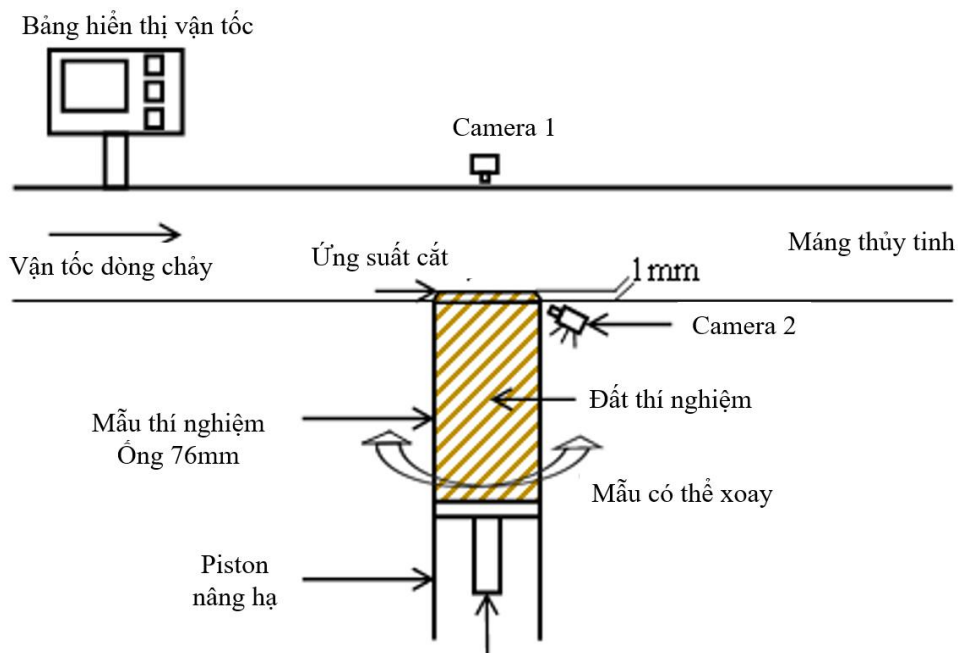
2. THIẾT BỊ THÍ NGHIỆM

Tổng thể cấu tạo của máy EFA đang được sử dụng tại Đại học quốc gia (ĐHQG) Chonnam, Hàn quốc (cũng là máy sử dụng cho nghiên cứu này) được thể hiện trên Hình 1 [11]. Về cơ bản máy bao gồm có: bể nước, hệ thống máy bơm, máng thủy tinh, hệ thống lắp đặt và điều chỉnh mẫu, hệ thống điều khiển vận tốc dòng chảy, hệ thống ghi dữ liệu bao gồm các camera được kết nối với máy tính.



Hình 1. Tổng thể cấu tạo máy EFA tại ĐHQG Chonnam [11].

Hình 2 cho thấy sơ đồ nguyên lý thí nghiệm của máy EFA. Sau khi chế tạo mẫu trong ống thép có đường kính 76 mm, mẫu đất được đặt vào máy thông qua hệ thống lắp đặt và điều chỉnh mẫu. Hệ thống này cho phép cố định mẫu (trường hợp thí nghiệm với dòng chảy một chiều) hoặc xoay mẫu (trường hợp thí nghiệm với dòng chảy hai chiều). Mẫu đất được đẩy nhô lên khỏi mặt phẳng máng thủy tinh 1mm. Dòng chảy được tạo ra trong máng thủy tinh nhờ hệ thống bơm và tốc độ dòng chảy được kiểm soát thông qua trình điều khiển của máy. Thí nghiệm thường được thực hiện trong 60 phút (nếu 1mm mẫu thí nghiệm đẩy lên chưa bị xói hết) hoặc dừng lại khi 1mm đã bị xói hết. Kết quả thí nghiệm ghi lại lượng đất đã bị xói trong khoảng thời gian nhất định, từ đó có thể đánh giá được tốc độ xói và đặc điểm xói của đất.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý thí nghiệm xói trên máy EFA [9].

3. QUY TRÌNH THÍ NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

3.1 Quy trình thí nghiệm

Quy trình và điều kiện thí nghiệm trên máy EFA sử dụng trong nghiên cứu này tuân theo đề xuất của Briaud [8] cho dòng chảy một chiều, Kim và cộng sự [9] cho dòng chảy hai chiều như sau:

- (1) Lắp đặt mẫu đất (được chế tạo trong ống kim loại) vào đáy của máng thủy tinh. Bơm nước ngâm mẫu trong 1h để đất bão hòa,
- (2) Điều chỉnh vận tốc dòng chảy ở mức thấp nhất (thường 0,3m/s cho sét và 0,1m/s cho cát),
- (3) Đẩy mẫu nhô cao 1mm so với mặt đáy của máng thủy tinh,
- (4) Quan sát và ghi lại độ xói của mẫu đất trong 60 phút (nếu 1 mm đất chưa bị xói hết) hoặc tiếp tục đẩy mẫu đất lên 1mm (nếu 1mm trước bị xói hết) cùng với ghi lại thời gian thí nghiệm.

Trường hợp thí nghiệm với dòng chảy hai chiều thì cứ 15 phút lại xoay mẫu một lần.

- (5) Thực hiện thí nghiệm nhiều lần với nhiều mức vận tốc khác nhau tùy thuộc vào loại vật liệu và mục đích thí nghiệm (0.1 – 4m/s).

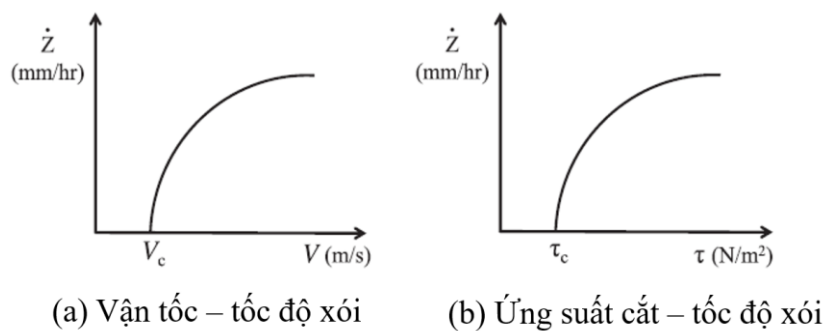
3.2 Phân tích và trình bày kết quả

Kết quả thí nghiệm EFA được phân tích và trình bày dưới dạng biểu đồ thay đổi của tốc độ xói, v , của đất theo vận tốc dòng chảy như trong Hình 3(a). Ứng suất cắt, τ , phát sinh trên bề mặt mẫu đất gây ra do dòng chảy trong máng có thể thu được từ phương trình (1), và kết quả cũng có thể biểu diễn dưới dạng biểu đồ quan hệ giữa vận tốc xói và ứng suất cắt như trong Hình 3(b). Ở đây vận tốc xói tới hạn, v_c , được định nghĩa là vận tốc dòng chảy mà ở đó tốc độ xói đạt đến 1mm/h và ứng suất cắt tương đương được gọi là ứng suất tới hạn, τ_c [8].

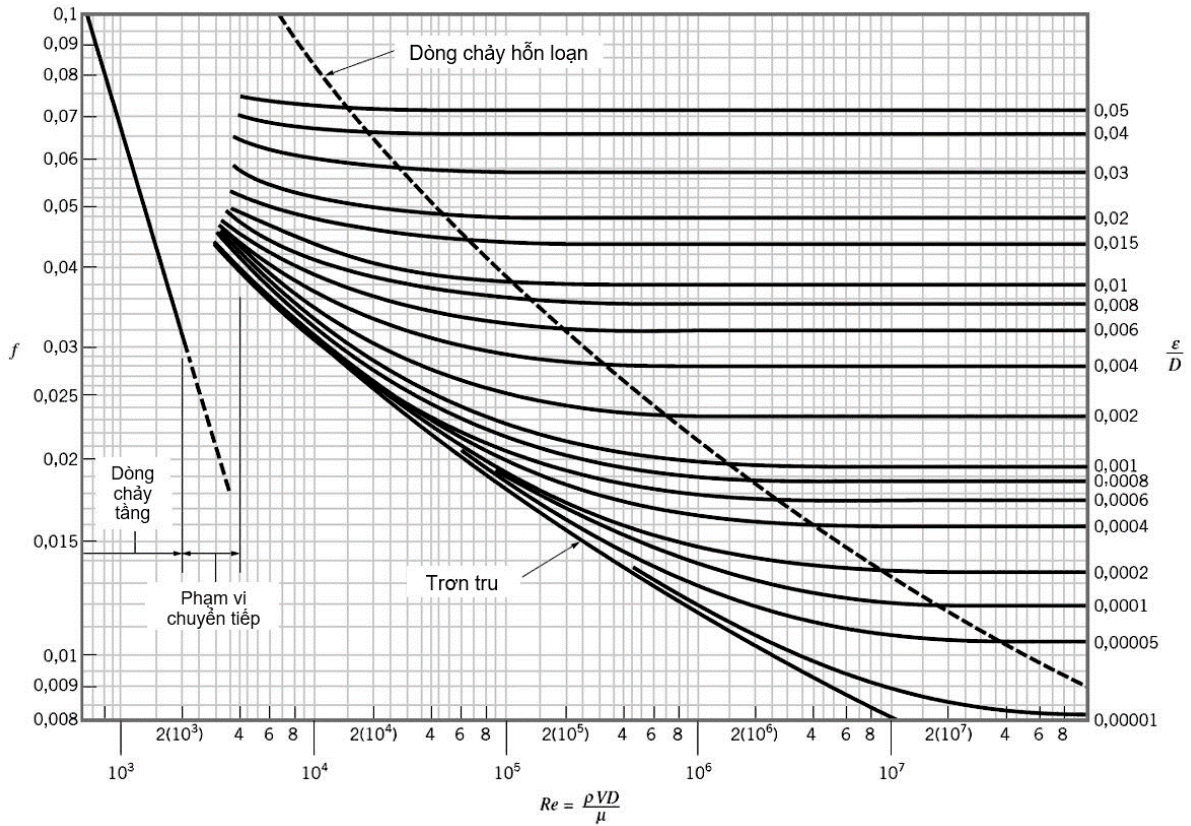
$$\tau = \frac{1}{8} f \rho V^2 \quad (1)$$

ở đây f là hệ số ma sát xác định từ biểu đồ Moody, ρ là khối lượng riêng của nước (kg/m^3) và V là vận tốc trung bình của dòng chảy trong máng (m/s).

Hệ số ma sát, f , có thể xác định từ biểu đồ Moody như trên Hình 4. Nó là hàm của hệ số Reynolds của máng thí nghiệm, Re ($\rho VD/\mu$), và độ nhám tương đối, ε/D . Trong đó D là đường kính của máng thí nghiệm (m), μ là hệ số nhớt của dòng chảy và ε là độ nhám.

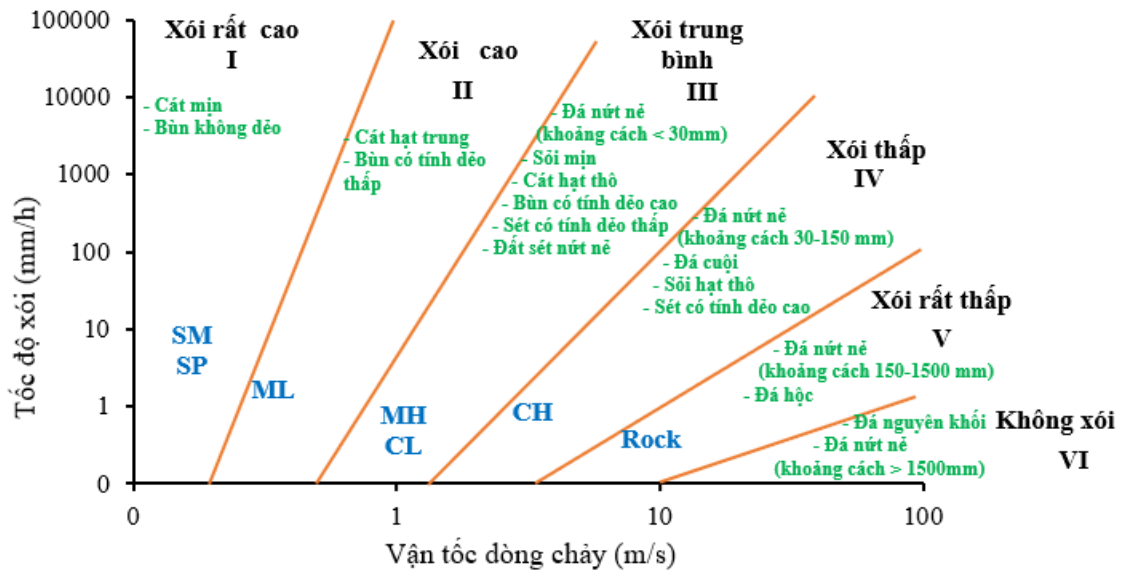


Hình 3. Sơ đồ phân tích kết quả thí nghiệm EFA [8].



Hình 4. Biểu đồ Moody [12].

Briaud và cộng sự [5] đã thực hiện một loạt các thí nghiệm EFA trên nhiều loại đất khác nhau ở Mỹ. Trên cơ sở các kết quả thu được ông đã đề xuất ra bảng phân loại xói của đất cho các loại đất khác nhau như thể hiện trên Hình 5.



Hình 5. Phân loại xói của đất dựa trên mối quan hệ giữa tốc độ xói và vận tốc dòng chảy [5].

4. TRƯỜNG HỢP NGHIÊN CỨU

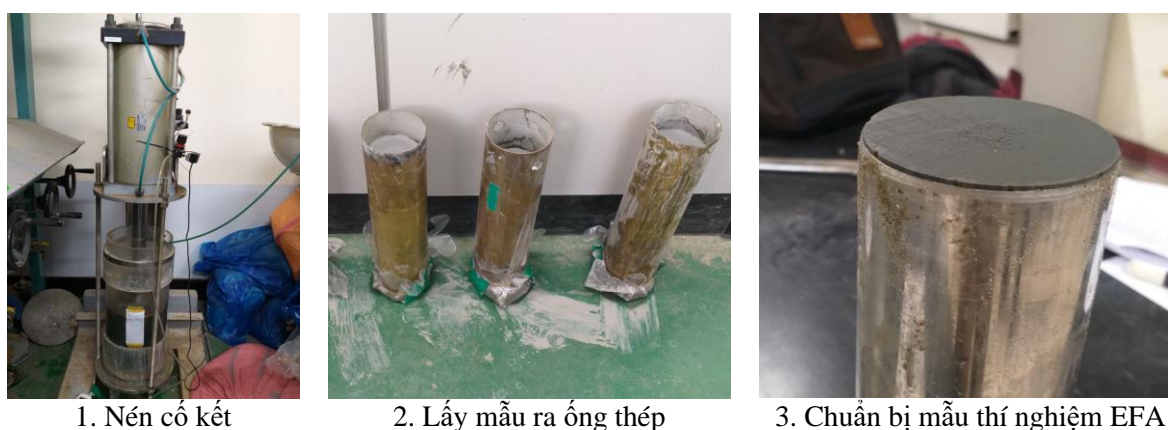
4.1 Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Trường hợp nghiên cứu trong bài báo này được thực hiện trên máy EFA tại phòng thí nghiệm Địa kỹ thuật, trường ĐHQG Chonnam, Hàn Quốc. Vật liệu thí nghiệm là đất bùn được nạo vét từ đáy sông có độ sâu khoảng 3m. Tính chất của đất được thể hiện trong Bảng 1.

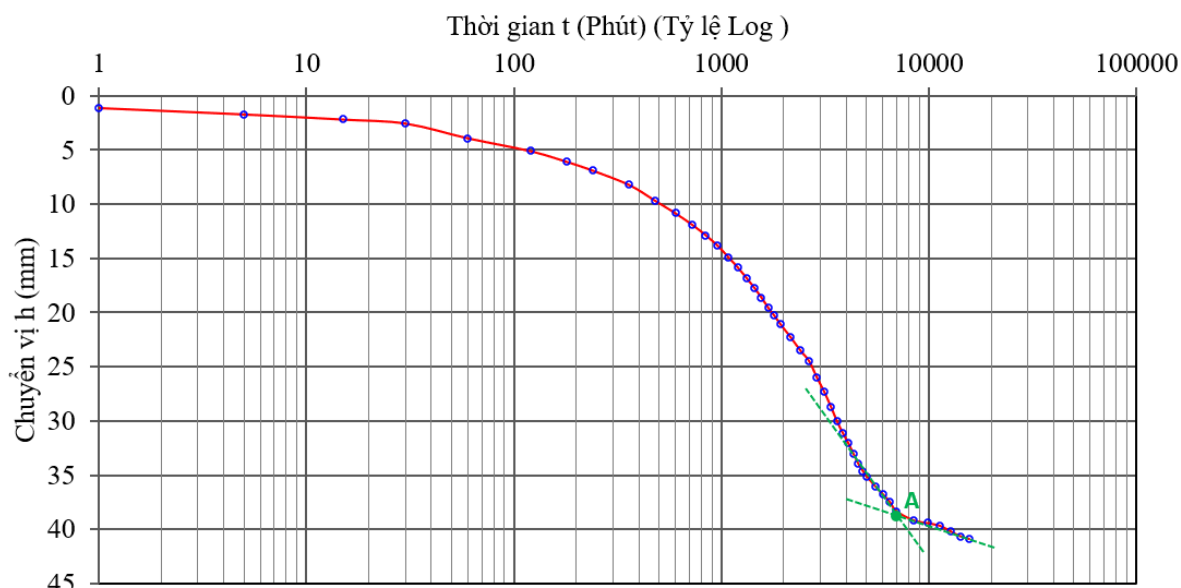
Bảng 1. Tính chất của đất được sử dụng trong nghiên cứu.

| Tỷ trọng hạt | Độ ẩm | Kích thước hạt trung bình | Giới hạn chảy | Giới hạn dẻo | Chỉ số dẻo | Phần trăm lọt sàng #200 | Phân loại theo USCS |
|--------------|-------|---------------------------|---------------|--------------|------------|-------------------------|---------------------|
| Gs | W (%) | D50 | LL(%) | PL(%) | PI(%) | (%) | |
| 2,66 | 86,45 | 0,018 | 53,66 | 36,18 | 17,48 | 58,32 | MH |

Mẫu đất được lấy từ đáy sông bị xáo trộn không còn là mẫu nguyên dạng không thể sử dụng trực tiếp cho thí nghiệm. Do đó, để tái tạo chính xác tình trạng đất hiện trường, mẫu đất đã được nén cố kết bằng máy nén cố kết đường kính lớn. Dựa trên điều kiện thực tế của mẫu đất, thí nghiệm nén cố kết được tiến hành với áp lực 30 kPa. Sau đó mẫu đất được lấy ra thông qua ống kim loại mỏng đường kính 76 mm. Hình 6 trình bày quy trình thí nghiệm và chuẩn bị mẫu. Hình 7 cho thấy quá trình cố kết của mẫu đất. Thí nghiệm được dừng lại sau 15600 s (khoảng 260h). Theo kết quả trên Hình 6, áp dụng phương pháp Log (t) để phân tích biểu đồ thì mẫu đất được coi là cố kết 100% tại điểm A, sau khoảng thời gian khoảng 7000s (khoảng 117h). Độ ẩm mẫu đất sau thí nghiệm khoảng 47%.



Hình 6. Quá trình thí nghiệm nén cố kết và chuẩn bị mẫu thí nghiệm.



Hình 7. Quá trình cô kết của mẫu đất.

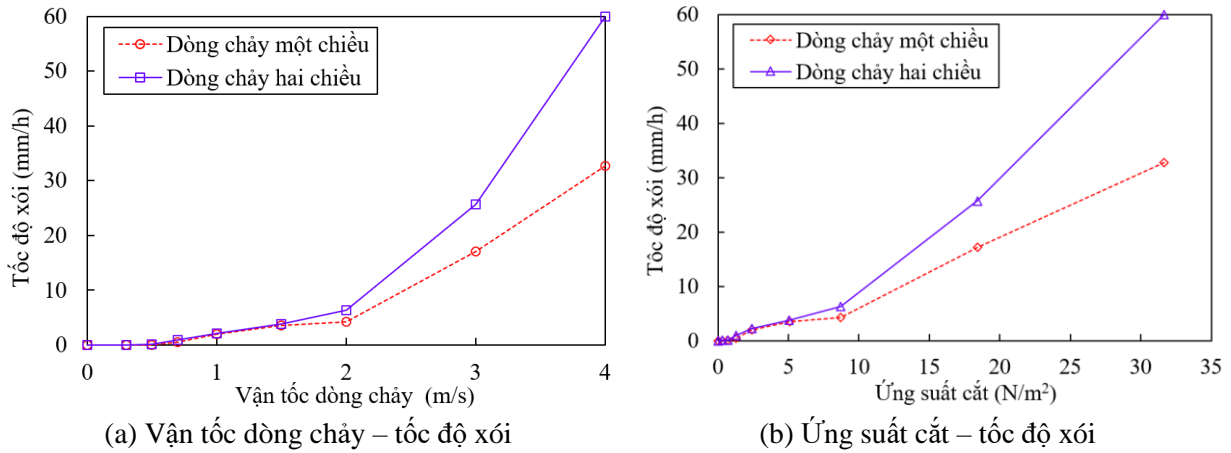
4.2 Điều kiện thí nghiệm và kết quả

Điều kiện thí nghiệm EFA được thể hiện trong Bảng 2. Sau khi thực hiện nén cô kết dưới ứng suất cắt 30 kPa, cường độ kháng cắt không thoát nước của đất đo được bằng thí nghiệm cắt cánh trong phòng là 34 kPa. Các thí nghiệm được thực hiện cho 2 mẫu dưới vận tốc dòng chảy tăng dần từ 0,3 đến 4,0 m/s với cả hai trường hợp dòng chảy một chiều và hai chiều.

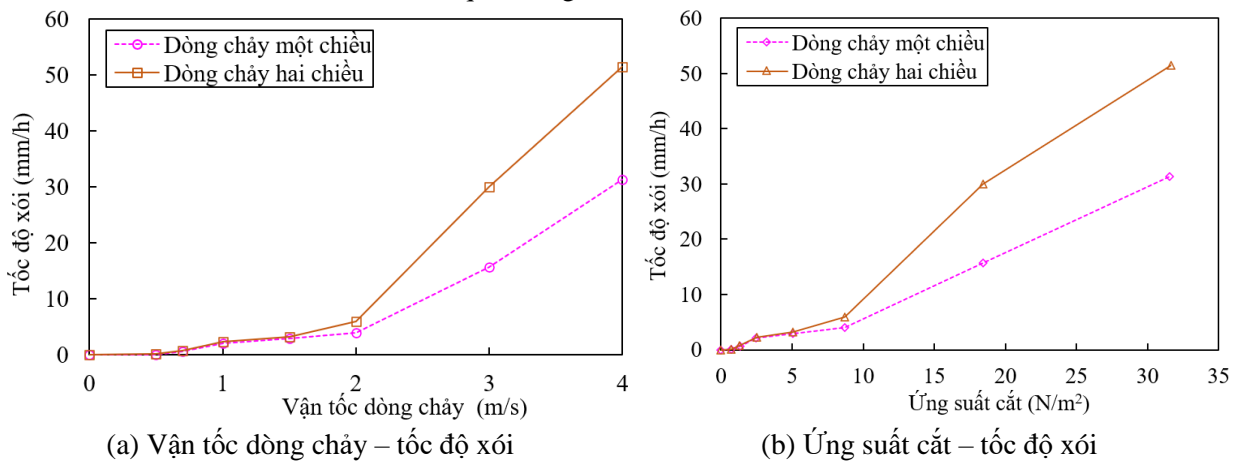
Bảng 2. Điều kiện thí nghiệm EFA.

| Ứng suất nén cô kết (kPa) | Sức kháng cắt không thoát nước (kPa) | Điều kiện dòng chảy thí nghiệm | Vận tốc dòng chảy thí nghiệm (m/s) |
|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---|
| 30 | 34 | Một chiều và hai chiều | 0,3 - 0,5 - 0,7 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 3,0 - 4,0 |

Hình 8 (a) và (b) lần lượt cho thấy sự gia tăng của tốc độ xói theo vận tốc dòng chảy và ứng suất cắt tương ứng của mẫu số 1. Tương tự, kết quả thí nghiệm của mẫu số 2 được trình bày trên Hình 9 (a) và (b). Giá trị ứng suất cắt được tính toán theo phương trình (1). Kết quả cho thấy tốc độ xói tăng chậm ở giai đoạn đầu khi vận tốc dòng chảy nhỏ nhưng lại gia tăng đáng kể sau một vận tốc nhất định. Bên cạnh đó, dòng chảy hai chiều gây xói mạnh hơn so với dòng chảy một chiều, đặc biệt là khi vận tốc dòng chảy lớn hơn 1,5 m/s. Đối với mẫu số 1, ở vận tốc dòng chảy 1m/s tốc độ xói là 1,94 mm/h cho dòng chảy một chiều và 2,17 mm/h cho dòng chảy hai chiều. Các giá trị này tăng đáng kể lên đến 4,29 mm/h and 6,32 mm/h ở vận tốc 2,0 m/s. Khi vận tốc dòng chảy tăng lên 4,0 m/s, tốc độ xói của đất dưới tác dụng của dòng chảy một chiều và hai chiều lần lượt là 32,73 mm/h và 60 mm/h. Ở trường hợp mẫu số 2, tốc độ xói mòn của đất ở trường hợp dòng chảy hai chiều khi vận tốc dòng chảy 1,5; 3 và 4 m/s lần lượt là 3,24; 30,00 và 51,43 mm/h. Các giá trị này lớn hơn tốc độ xói của đất với trường hợp dòng chảy một chiều ở các vận tốc tương ứng lần lượt là 2,93; 15,65 và 31,30 mm/h.



Hình 8. Kết quả thí nghiệm EFA cho mẫu đất số 1.



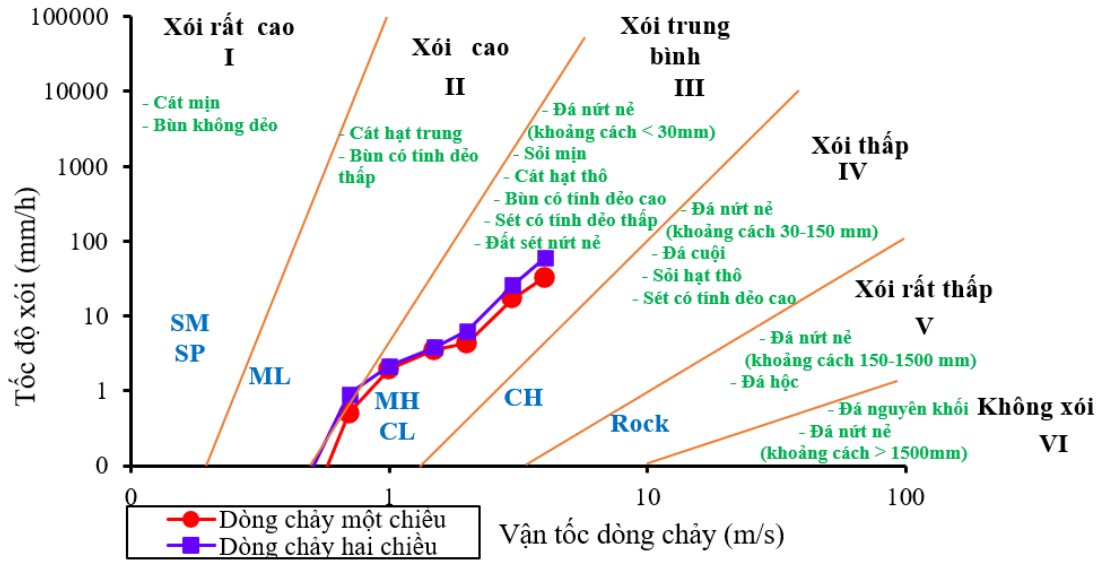
Hình 9. Kết quả thí nghiệm EFA cho mẫu đất số 2.

Các giá trị của vận tốc tới hạn và ứng suất cắt tới hạn cho cả hai mẫu thí nghiệm được tổng hợp trong Bảng 3. Có thể thấy rằng, dưới tác dụng của dòng chảy hai chiều vận tốc dòng chảy tới hạn và ứng suất cắt tới hạn nhỏ hơn so với trường hợp dòng chảy một chiều.

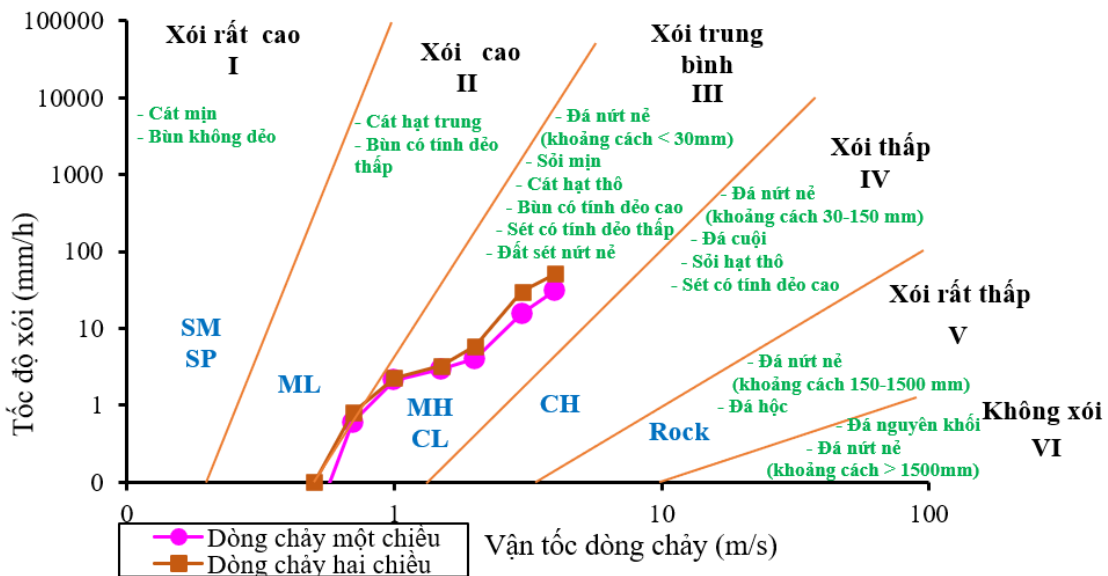
Bảng 3. Vận tốc và ứng suất cắt tới hạn của mẫu thí nghiệm.

| Mẫu thí nghiệm | Dòng chảy một chiều | | Dòng chảy hai chiều | |
|-------------------|-----------------------|--|-----------------------|--|
| | Vận tốc tới hạn (m/s) | Ứng suất cắt tới hạn (N/m ²) | Vận tốc tới hạn (m/s) | Ứng suất cắt tới hạn (N/m ²) |
| 1 | 0,80 | 1,66 | 0,72 | 1,36 |
| 2 | 0,78 | 1,55 | 0,74 | 1,41 |
| Trung bình | 0,79 | 1,60 | 0,73 | 1,38 |

Kết quả thí nghiệm xói trên máy EFA đã được sử dụng để phân loại khả năng xói mòn của đất theo đề xuất của Briaud và cộng sự [5]. Hình 10 (a) và (b) cho thấy các đặc tính xói mòn của vật liệu bằng cách sử dụng biểu đồ phân loại xói trong mối tương quan giữa vận tốc dòng chảy và tốc độ xói. Trong bảng phân loại này, đất được phân loại theo đặc tính xói bao gồm 6 cấp độ, từ đất xói rất cao (Cấp I) cho đến đất không xói (Cấp VI). Có thể thấy rằng dưới cả dòng chảy một chiều và hai chiều, mẫu đất thí nghiệm được phân loại trong vùng xói trung bình.



(a) Mẫu đất số 1



(b) Mẫu đất số 2

Hình 10. Phân loại xói của vật liệu.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp đánh giá khả năng chống xói của đất sử dụng thí nghiệm EFA. Thí nghiệm này có thể ứng dụng để kiểm tra xói của vật liệu dưới tác dụng của dòng chảy một chiều và hai chiều. Kết quả của thí nghiệm cho thấy được sự gia tăng tốc độ xói của đất phụ thuộc vào vận tốc dòng chảy cũng như mối quan hệ giữa tốc độ xói và ứng suất cắt gây ra bởi dòng chảy. Từ đó, có thể xác định và phân loại được khả năng chống xói của đất.

Trường hợp nghiên cứu trong bài báo này được thực hiện trên máy EFA tại phòng thí nghiệm Địa kỹ thuật, trường ĐHQG Chonnam, Hàn Quốc. Đất sét được nén cố kết trước khi

thực hiện thí nghiệm xói. Các kết quả thí nghiệm cho thấy:

- Tốc độ xói gây ra do dòng chảy hai chiều lớn hơn dòng chảy một chiều.
- Tốc độ xói của đất tăng chậm ở giai đoạn đầu và tăng mạnh sau khi đạt đến vận tốc tới hạn.
- Vận tốc tới hạn đối với dòng chảy một chiều là 0,79 m/s và đối với dòng chảy hai chiều là 0,73 m/s.
- Dựa trên biểu đồ phân loại xói đề xuất bởi Briaud, mẫu đất thí nghiệm được phân loại thuộc cấp độ xói trung bình tương ứng với đất MH. Có thể thấy rằng kết quả này phù hợp với các kết quả thí nghiệm bởi Briaud.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải (ĐH GTVT) trong đề tài mã số T2024-CT-024.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Vũ Đình Cường, Nguyễn Thanh Hùng, Nguyễn Văn Hùng, Nguyễn Thành Luân, Khoa học công nghệ ứng dụng công nghệ viễn thám và GIS nghiên cứu diễn biến xói lở, bồi tụ vùng bờ biển, cửa sông tỉnh Thừa Thiên Huế, Tạp chí Khoa học và công nghệ thủy lợi, 48 (2018) 1–11.
- [2]. Lê Thanh Chương, Nguyễn Bình Dương, Nghiên cứu nguyên nhân xói lở bờ biển đông bán đảo cà mau bằng mô hình toán, Tạp chí Khoa học và công nghệ thủy lợi, 71 (2022) 1–12.
- [3]. Phạm Thị Hương, Thí nghiệm xác định tốc độ xói của đất đắp dưới tác dụng của dòng chảy trên bề mặt, Tạp chí Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường, 53 (2016) 54–58.
- [4]. J. L. Briaud, F. C. Ting, H. Chen, R. Gudavalli, S. Perugu, G. Wei, SRICOS: Prediction of Scour rate in cohesive soils at bridge piers, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125 (1999) 237–246. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1999\)125:4\(237\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:4(237))
- [5]. J. L. Briaud, Case Histories in Soil and Rock Erosion : Woodrow Wilson Bridge , Brazos River Meander , Normandy Cliffs , and New Orleans Levees, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134 (2008) 1425–1447. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:10\(1425\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:10(1425))
- [6]. J. Wang, Y. Cao, J. L. Briaud, H. C. Chen, P. Nurtjahyo, Erosion Function Apparatus Overview and Discussion of Influence Factors on Cohesive Soil Erosion Rate in EFA Test, First International Conference on Scour of Foundations, College Station, USA, 2002.
- [7]. W. L. Moore, F. D. Masch, Experiments on the Scour Resistance of Cohesive Sediments, Journal of Geophysical Research, 67 (1962) 1437–1446. <https://doi.org/10.1029/JZ067i004p01437>
- [8]. J. L. Briaud, F. C. Ting, H. Chen, R. Gudavalli, S. Perugu, G. Wei, SRICOS: Prediction of Scour rate at bridge piers, Report No TX-00/2937-1, Texas, USA, 1999.
- [9]. Y. S. Kim, G. O. Kang, T. Tsuchida, Experimental evaluation of the effect of the incidence angle and consolidation pressure on the hydraulic resistance capacity of clayey soils, Soils and Foundations Journal, 59 (2019) 110–121.

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.09.007>.

[10]. B. H. Dinh, A. D. Nguyen, S. Y. Jang, Y. S. Kim, Evaluation of erosion characteristics of soils using the pinhole test, *International Journal of Geo-Engineering*, 12 (2021) 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40703-021-00145-4>.

[11]. A. D. Nguyen, G. Kang, Y. Kim, T. Tsuchida, Experimental Evaluation of Erosion Resistance Capacity of Basic Oxygen Furnace Slag-Treated Clay, *The 3rd Int. Conf. on Transport Infrastructure & Sustainable Development (TISDIC 2019)*, Danang, Vietnam, 2019.

[12]. B. R. Munson, T. H. Okiishi, W. W. Huebsch, A. P. Rothmayer, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 7th ed. USA: John Wiley & Sons, Inc, 2013.