

# ẢNH HƯỞNG CỦA HÀM LƯỢNG HẠT MỊN ĐẾN MỨC ĐỘ XÓI BÊN TRONG ĐỐI VỚI ĐẤT CÓ CỠ HẠT BỊ NHỎ VÀ ĐẤT CÓ CẤP PHỐI LIÊN TỤC

Trần Đình Minh<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Xây dựng Cầu đường, Trường Đại học Bách Khoa – Đại học Đà Nẵng, 54 Nguyễn Lương Bằng, quận Liên Chiểu, Đà Nẵng, Việt Nam*

*Nhận ngày 07/11/2021, Sửa xong 02/3/2022, Chấp nhận đăng 04/5/2022*

---

## Tóm tắt

Xói hạt mịn (suffusion) là xói có chọn lọc, trong đó các hạt mịn bị xói sẽ đi qua lỗ rỗng của các hạt thô do dòng chảy thấm gây ra. Do đó, hàm lượng giữa hạt mịn và hạt thô có ảnh hưởng lớn đến mức độ xói của đất. Vì vậy, mục đích chính của bài báo này là thực hiện thí nghiệm xói đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ (gap-graded soils) với hàm lượng mịn từ 15% đến 45% và đất cấp có cấp phối liên tục (well-graded soils) với hàm lượng mịn từ 15% đến 25% để nghiên cứu vai trò của các hạt mịn đối với mức độ xói bên trong và sử dụng gradient thủy lực nhiều giai đoạn để khảo sát phân loại xói dựa trên phương pháp năng lượng. Kết quả chỉ ra rằng có hai xu hướng liên quan đến hàm lượng hạt mịn. Đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ, chỉ số kháng xói sẽ tăng lên với hàm lượng hạt mịn tăng từ 15% đến 35% và xu hướng ngược lại khi hàm lượng hạt mịn trên 35%. Trong khi đó hàm lượng hạt mịn đạt được mức độ xói lớn nhất đối với đất có cấp phối liên tục là 20% và với hàm lượng này, chỉ số kháng xói của đất đạt giá trị nhỏ nhất.

*Từ khóa:* xói hạt mịn; hàm lượng hạt mịn; mức độ xói bên trong; chỉ số kháng xói; đất có hạt bị nhỏ và có cấp phối liên tục.

EFFECT OF FINE CONTENT TO INTERNAL EROSION SUSCEPTIBILITY FOR GAP-GRADED AND WELL-GRADED SOILS

## Abstract

Suffusion is a selective erosion in which fine particles pass through voids of coarse particles due to a seepage flow. Thus, the fines content have a great impact on erosion susceptibility. The main purpose of this paper performed suffusion tests for gap-graded soils with the fine content from 15% to 45% and well-graded soils with the fine content from 15% to 25% to study the role of fine particles on internal erosion susceptibility and using the multi-stage hydraulic gradient to investigate erosion classification based on the energy-based method. Results indicated that there were two trends related to fine content. For gap-graded soils, suffusion susceptibility increased with a fine particle content of 15% to 35% and the opposite trend when fine content is more than 35%. Whereas the critical value of the percentage of fine particles for well-graded soils is 20% then the value of the erosion resistance index of soils is equal to the lowest.

*Keywords:* suffusion; fine content; internal erosion susceptibility; erosion resistance index; gap-graded and well-graded soils.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(2V\)-09](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(2V)-09) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

---

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [tdminh@dut.udn.vn](mailto:tdminh@dut.udn.vn) (Minh, T. Đ.)

## 1. Giới thiệu

Xói bên trong là một trong những nguyên nhân phổ biến nhất gây ra thiệt hại cho các công trình đập đất và được tập trung nghiên cứu lâu dài trong nhiều năm [1–6]. Foster và cs. đã nghiên cứu 1192 đập đất, chỉ ra rằng trong đó 136 đập bị hỏng hoặc mất chức năng có đến 46% do xói bên trong gây ra [2]. Nhìn chung, xói bên trong có thể được phân loại thành bốn loại xói chính: xói rò rỉ tập trung (concentrated leak erosion), xói kéo theo (backward erosion), xói tiếp xúc (contact erosion), và xói hạt mịn (suffusion) [7, 8]. Bài báo này chúng tôi chỉ tập trung vào xói hạt mịn. Xói hạt mịn là một trong những hiện tượng xói bên trong và là hiện tượng xói mà hạt mịn bên trong lỗ rỗng của hạt thô bị đẩy ra khỏi lỗ rỗng của chúng dưới tác dụng của dòng chảy thấm [9–12]. Ngoài ra, xói hạt mịn là một hiện tượng phức tạp do sự tác động đồng thời của ba quá trình: tách rời, vận chuyển và bị kẹt lại [4, 13]. Các hạt mịn tách ra được di chuyển về phía hạ lưu theo dòng chảy thấm nhưng trong quá trình này có thể có một số hạt xói bị giữ lại ở vị trí lỗ rỗng khác của hạt thô gây tắc nghẽn dẫn đến việc giảm độ dẫn thủy lực do việc tắc nghẽn gây ra [14].

Theo nghiên cứu của Phong và cs. đã chỉ ra rằng ứng suất tổng của các hạt trong bê tông nhẹ chịu nén sẽ giảm nhanh khi có sự tham gia của hạt cốt liệu nhẹ và ứng suất tương tác giữa hạt cốt liệu nhẹ và nặng là chủ yếu khi hàm lượng cốt liệu nhẹ vượt qua 30% [15]. Mặc khác, Taha và cs. đã xây dựng một mô hình số bằng cách sử dụng phương pháp phần tử rời rạc (DEM) để điều tra sự tương tác giữa hạt mịn và hạt thô dưới các hàm lượng hạt mịn khác nhau trong kết cấu đất đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ, cho thấy ở phạm vi với hàm lượng hạt mịn nhỏ hơn 30% thì ứng suất hữu hiệu không tác dụng lên các hạt mịn mà chỉ tác dụng lên các hạt thô [16]. Tuy nhiên, trong trường hợp hàm lượng hạt mịn lớn hơn 30% thì hạt mịn sẽ tham gia chịu ứng suất hữu hiệu và hàm lượng này càng lớn thì tham gia chịu ứng suất hữu hiệu càng lớn. Điều này cho thấy vai trò quan trọng của hạt mịn đối với tính chất cơ học của đất. Kenney và Lau đã làm thực nghiệm để kiểm tra và đề xuất biểu đồ đường cong kích thước hạt H-F để xác định tính không ổn định bên trong của đất. Từ đó, tác giả đã có một biện luận giả thuyết rằng, đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ, hàm lượng hạt mịn tối đa là khoảng 30% thì có thể lấp đầy lỗ rỗng của các hạt thô hơn và tỷ lệ các hạt mịn bị xói tối đa có thể xảy ra với hàm lượng hạt mịn này [1]. Trong khi đó, đối với đất có cấp phối liên tục, hàm lượng hạt mịn tối đa đạt 20% thì mức độ xói hạt mịn sẽ đạt tối đa. Wan và Fell đã nghiên cứu phân loại đặc điểm xói bên trong của đất bằng thí nghiệm đối với cả hai loại đất và nhận thấy rằng những hạt mịn với đường kính không vượt quá 0,075 mm sẽ ảnh hưởng đáng kể đến tốc độ xói [3]. Chang và Zhang đã đưa ra khuyến nghị các tiêu chí ổn định bên trong mở rộng bằng cách sử dụng kết quả của các nhà nghiên cứu trước đây và dựa trên sự hiểu biết vật lý về cấu trúc vi mô của đất. Chỉ ra rằng khi hàm lượng hạt mịn lớn hơn 35% đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ và hàm lượng hạt mịn lớn hơn 20% đối với đất có cấp phối liên tục thì các hạt thô dần dần nổi trong ma trận của các hạt mịn dẫn đến sự ổn định bên trong của đất [5]. Ngoài ra, Seghir và cs. nghiên cứu sự bắt đầu và phát triển xói bên trong của đất hỗn hợp giữa cát và mịn đối với hai loại đất trên, nhận thấy rằng sức kháng xói của đất tăng lên khi hàm lượng mịn tăng [17].

Mặc dù những nỗ lực nghiên cứu trước đây đã được thực hiện, tuy nhiên sự ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn trên mức độ xói hạt mịn đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ và đất có cấp phối liên tục chỉ mới đưa ra giả thiết và vẫn chưa được giải quyết rõ ràng [1, 3, 5, 17]. Đặc biệt là sự hiểu biết về ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn đối với xói bên trong thông qua thực nghiệm trong phòng thí nghiệm vẫn còn giới hạn. Do đó, mục tiêu chính của bài báo này là nghiên cứu thực nghiệm trong phòng thí nghiệm về ảnh hưởng của hàm lượng mịn đến mức độ xói hạt mịn đối với hai loại đất trên. Trong đó, đối với đất cấp phối liên tục tác giả kết hợp với dữ liệu kết quả thực nghiệm của Le [18].

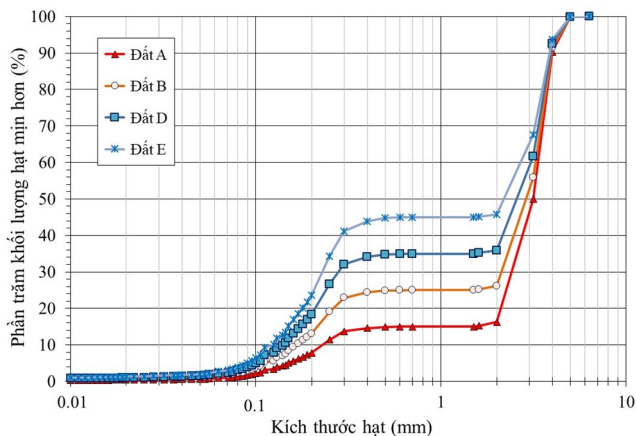
## 2. Nghiên cứu thí nghiệm

### 2.1. Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị thí nghiệm xói bao gồm một ống nhựa acrylic hình trụ tròn để chứa vật liệu đất thí nghiệm và được cố định bởi hai khung thẳng đứng với hai kẹp để giữ cố định. Đỉnh đầu ống nhựa liên kết với hệ thống nén tĩnh và hệ thống cấp nước. Phía dưới của ống nhựa liên kết với hệ thống thu gom đất xói. Thiết bị này cũng kết nối với hệ thống thu thập dữ liệu và đồng thời được thiết kế để cho phép dòng chảy theo hướng thẳng đứng từ đỉnh ống nhựa đến đáy. Hệ thống nén tĩnh được sử dụng để tạo ứng suất dọc trục lên mẫu thí nghiệm thông qua một piston khí nén có thể di chuyển lên hoặc xuống. Thiết bị cũng cho phép nước di chuyển đi vào, đi ra và được giữ lại trong bể chứa nước thoát, đồng thời thu giữ các hạt mịn xói được tách ra khỏi kết cấu đất của mẫu thí nghiệm. Hệ thống thu gom đất xói gồm 8 túi vải lanh chứa trong cốc được sử dụng để thu thập các hạt mịn xói từ mẫu thí nghiệm. Cuối cùng, hệ thống thu thập dữ liệu được sử dụng bằng phần mềm chuyên dụng cho phép theo dõi diễn biến thời gian của độ dẫn thủy lực, gradient thủy lực, khối lượng nước thải, gradient áp suất và tốc độ dòng chảy trong suốt quá trình thực hiện thí nghiệm. Mô tả chi tiết về cấu tạo thiết bị xói này xem ở bài báo của Marot và cs. [19].

### 2.2. Đất thí nghiệm

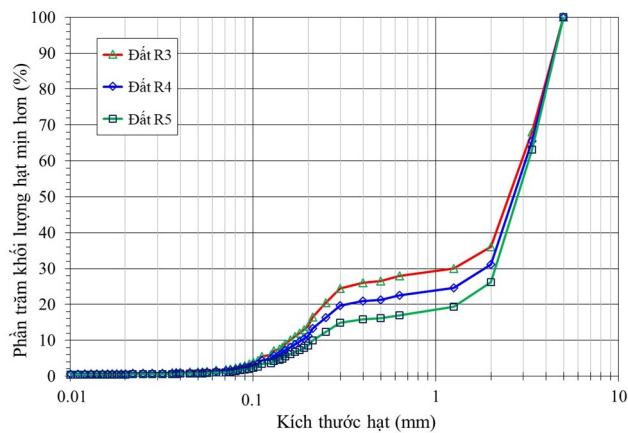
Đối với đập đất, phần vỏ thường sử dụng đất có cỡ hạt bị nhỏ trong khi đất có cấp phối liên tục được sử dụng cho phần lõi [20]. Do đó, hai loại đất trên được lựa chọn để nghiên cứu. Đất có cỡ hạt bị nhỏ có 04 mẫu và đất có cấp phối liên tục có 03 mẫu với độ kết dính thấp hoặc không có độ kết dính đã được sử dụng trong thí nghiệm của chúng tôi để nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn đến mức độ xói hạt mịn. Đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ, mẫu đất được tạo ra bằng cách trộn vật liệu cát S1 và sỏi G3 được cung cấp bởi công ty Sablière Palvadeau (Pháp). Một máy phân tích kích thước hạt bằng nhiễu xạ laser được sử dụng để đo đường cong thành phần hạt mẫu đất thí nghiệm (xem Hình 1 và Hình 2). Đất thí nghiệm A, B, D và E có hàm lượng cát hạt mịn S1 lần lượt là 15%, 25%, 35% và 45%. Đất thí nghiệm B giống tương tự như mẫu đất thí nghiệm của Le [18] (bao gồm: tên đất thí nghiệm, loại vật liệu, phần trăm hạt mịn, dung trọng khô, độ ẩm và quy trình thí nghiệm) để so sánh kết quả.



Hình 1. Đường cong thành phần hạt đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ

Đối với đất có cấp phối liên tục, mẫu đất thí nghiệm là bao gồm cát hạt mịn S1 và sỏi DR từ đập đất ở Pháp [18, 19]. Đất thí nghiệm R3, R4 và R5 có hàm lượng hạt mịn S1 lần lượt là 25%, 20% và 15%. Ngoài ra, đường kính hạt cao nhất là 6,3 mm đối với đất có cỡ hạt bị nhỡ và 5,0 mm đối với đất có cấp phối liên tục.

Theo tiêu chí dựa trên kích thước hạt do Kenney và Lau đề xuất, cả 07 đất thí nghiệm A, B, D, E, R3, R4 và R5 là không ổn định xói do tỉ lệ  $(H/F)_{\min}$  nhỏ hơn 1,0. Đối với đất có cỡ hạt bị nhỡ A, B, D và E, giá trị P là nhỏ hơn 10% và tỷ lệ khe hở Gr nhỏ hơn 3. Do đó, theo tiêu chí Chang và Zhang's 04 đất A, B, D và E là ổn định xói. Vì giá trị P nhỏ hơn 5% và  $(H/F)_{\min}$  nhỏ hơn 1,0 đối với đất có cấp phối liên tục R3, R4 và R5, do đó 03 loại đất trên là không ổn định xói theo tiêu chí của Chang và Zhang's. Theo Wan và Fell, tiêu chí mà họ đề xuất dường như không áp dụng được cho các loại đất có cỡ hạt bị nhỡ và hàm lượng hạt mịn lớn hơn 15%. Do vậy, tiêu chí này chỉ phù hợp với đất R3, R4 và R5, được phân loại là ổn định xói.



Hình 2. Đường cong thành phần hạt đối với đất có cấp phối liên tục

Bảng 1 là trình bày chi tiết về các thông số và mức độ xói tiềm năng của 07 loại đất thí nghiệm trên theo các tiêu chí của Kenney và Lau, Wan and Fell và Chang và Zhang.

Bảng 1. Mức độ xói tiềm năng của 07 loại đất thí nghiệm

Tên mẫu đất thí nghiệm	Finer KL (%)	P (%)	$G_r$	$(H/F)_{\min}$	Mức độ xói tiềm năng		
					Tiêu chí Kenney & Lau	Tiêu chí Wan & Fell	Tiêu chí Chang & Zhang
A	15	0,92	2,5	0,036	Không ổn định	/	Ổn định
B	25	1,60	2,5	0,035	Không ổn định	/	Ổn định
D	35	2,15	2,5	0,028	Không ổn định	/	Ổn định
E	45	2,76	2,5	0,022	Không ổn định	/	Ổn định
R3	25	1,64	1,0	0,29	Không ổn định	Ổn định	Không ổn định
R4	20	1,32	1,0	0,24	Không ổn định	Ổn định	Không ổn định
R5	15	0,99	1,0	0,20	Không ổn định	Ổn định	Không ổn định

Chú thích: Finer KL là kí hiệu phần trăm hạt mịn theo Kenney và Lau;  $(H/F)_{\min}$  là tỉ lệ nhỏ nhất

theo Kenny và Lau;  $P$  là phần trăm hạt mịn có đường kính nhỏ hơn 0,063 mm;  $G_r = d_{\max}/d_{\min}$  ( $d_{\max}$  và  $d_{\min}$  là kích thước hạt lớn nhất và nhỏ nhất của đoạn bị nhỡ trong đường cong cấp phối).

### 2.3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Với mục tiêu nghiên cứu thí nghiệm xói hạt mịn dựa trên hàm lượng hạt mịn khác nhau. Mỗi mẫu thí nghiệm có chiều cao 35cm được nén tĩnh chặt bằng đầm nén để hạn chế sự phân tách của đất trong mẫu và đất thí nghiệm có độ ẩm 7,8%. Việc chuẩn bị mẫu thí nghiệm được thực hiện trong hộp gỗ (xem Hình 3). Mẫu thí nghiệm được tạo ra nhờ một hộp gỗ được chia thành hai khoang nhờ các tấm xốp màu trắng. Một khoang chứa đất thí nghiệm có chiều dày 35 cm có thể tích lớn hơn và một khoang khác chứa một lớp cát dày 5 cm. Đất thí nghiệm được tiến hành đầm nén tĩnh trong khoang của nó với mỗi lớp cao 5 cm để đạt được độ đồng nhất. Sau khi đất đã được lấp đầy và đạt được trọng lượng riêng mong muốn, một tấm phủ sẽ được đặt vào vị trí trên hộp. Để tạo mẫu thí nghiệm giống như lấy mẫu ở hiện trường, mẫu thí nghiệm được tạo ra từ một hình trụ thép có chứa ống nhựa acrylic hình trụ tròn và một máy nén.



Hình 3. Mô tả hình ảnh tạo mẫu thí nghiệm trong hộp gỗ

Mô tả tính toán xác định mức độ xói Từ kết quả của các thử nghiệm xói [21], Marot và cs. đã đề xuất một phương pháp dựa trên năng lượng mới phụ thuộc vào năng lượng được tiêu thụ bởi dòng thấm để ước tính mức độ xói của đất khi thực hiện quá trình xói hạt mịn. Tải trọng thủy lực ở đây được đề xuất bằng công suất do dòng chảy tiêu thụ được xác định như sau:

$$P_{\text{flow}} = (\gamma_w \Delta z + \Delta P) Q \quad (1)$$

trong đó  $\Delta z = 35$  cm là độ cao giữa hai vị trí đỉnh và đáy của mẫu thí nghiệm,  $\Delta P$  là độ giảm áp suất giữa hai vị trí đỉnh và đáy của mẫu thí nghiệm và  $Q$  là lưu lượng nước của tốc độ dòng chảy.

Khi xói các hạt mịn có xu hướng giảm dần và gradient thủy lực có xu hướng ổn định thì được xem như ở trạng thái ổn định và chúng ta sẽ tính được chỉ số kháng xói ( $I_\alpha$ ). Giá trị của chỉ số kháng xói ( $I_\alpha$ ) phụ thuộc vào trọng lượng khô tích lũy của hạt mịn xói và năng lượng tiêu hao ( $E_{\text{flow}}$ ) tích lũy. Năng lượng tiêu hao tích lũy này được xác định bằng cách tích phân theo thời gian của công suất tức thời bị tiêu tán bởi dòng nước chảy thấm

$$I_\alpha = -\log \left( \frac{\text{Trọng lượng khô tích lũy của hạt mịn xói}}{E_{\text{flow}}} \right) \quad (2)$$

Sáu loại mức độ xói của đất được đề xuất phụ thuộc vào chỉ số kháng xói như sau: xói cao đối với  $I\alpha < 2$ ; xói thông thường đối với  $2 \leq I\alpha < 3$ ; xói vừa phải đối với  $3 \leq I\alpha < 4$ ; kháng xói vừa phải đối với  $4 \leq I\alpha < 5$ ; kháng xói thông thường đối với  $5 \leq I\alpha < 6$ ; kháng xói cao đối với  $I\alpha \geq 6$  [21].

### 3. Phân tích kết quả và thảo luận

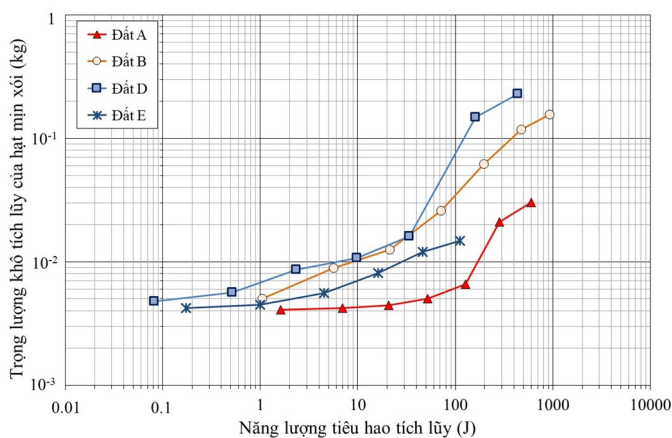
#### 3.1. Đất có cỡ hạt bị nhỏ

Hình 4 thể hiện trọng lượng khô tích lũy của hạt mịn xói so với năng lượng tiêu hao tích lũy. Đối với các thí nghiệm này, phạm vi năng lượng tiêu hao cuối cùng là từ 111 J (đất E) đến 925 J (đất B) và phạm vi tương ứng với trọng lượng khô tích lũy của hạt mịn bị xói cuối cùng là từ 14,8 g (đất E) đến 228 g (đất D).

Chỉ số chống xói được tính toán khi kết thúc thí nghiệm và tương ứng ở thời điểm đó là sự ổn định của độ dẫn thủy lực và sự giảm của mức độ xói. Bảng 2 trình bày các thông số vật lý và chỉ số kháng xói của 04 đất thí nghiệm có cỡ hạt bị nhỏ. Giá trị của chỉ số kháng xói là 4,30 đối với đất A; 3,77 đối với đất B; 3,29 đối với đất D và 3,88 đối với đất E.

Bảng 2. Tổng hợp các thông số vật lý và chỉ số kháng xói của đất có cỡ hạt bị nhỏ

Số thứ tự	Tên mẫu đất thí nghiệm	Dung trọng khô $\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	Finer KL (%)	(H/F) <sub>min</sub>	Chỉ số kháng xói ( $I\alpha$ )
1	A	17,39	15	0,036	4,30
2	B	17,39	25	0,035	3,77
3	E	17,39	35	0,028	3,29
4	D	17,39	45	0,022	3,88



Hình 4. Mô tả trọng lượng khô tích lũy của hạt mịn xói so với năng lượng tiêu hao tích lũy đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ

Dựa trên kết quả của chỉ số kháng xói chỉ ra rằng mức độ xói hạt mịn tương ứng đối với đất B, D và E là đất xói vừa phải trong khi đất A có khả năng kháng xói vừa phải [21]. Trong đó, mức độ xói hạt mịn của đất B cho kết quả giống với kết quả của Le [18]. Kết quả này cho thấy độ lặp lại của việc

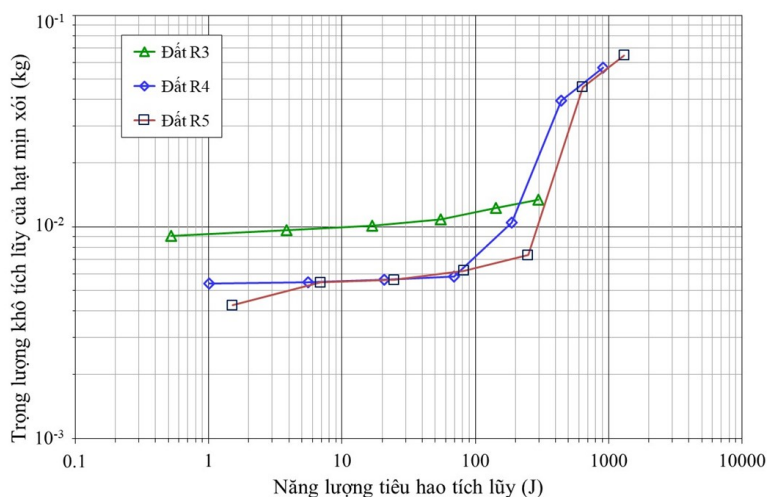


chuẩn bị mẫu là khá tốt. Ngoài ra, kết quả thí nghiệm cho thấy chỉ số kháng xói giảm khi tăng hàm lượng hạt mịn từ 15% đến 35% nhưng lại tăng khi tăng hàm lượng hạt mịn từ 35% lên 45% (xem bảng 2). Đồng thời chỉ ra rằng mức độ xói lớn nhất khi hàm lượng hạt mịn khoảng 35% và kết quả này khá giống với giả thiết của Kenny và Lau, Chang và Zhang đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ [1, 5].

Đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ, Taha và cs. đã thực hiện quy mô dạng hạt các thí nghiệm nén ba trục bằng phương pháp phần tử rời rạc (DEM) [16], cho thấy rằng đối với các hạt mịn nhỏ hơn 30%, các hạt mịn nằm trong lỗ rỗng của các hạt thô sẽ không bị ảnh hưởng bởi ứng suất hữu hiệu và các hạt mịn lấp đầy lỗ rỗng giữa các hạt thô khi đạt giá trị 30%. Tuy nhiên, trong trường hợp hàm lượng mịn lớn hơn 30% thì các hạt mịn sẽ tham gia chịu ứng suất hữu hiệu. Theo Wan và Fell [22], xói hạt mịn sẽ xảy ra khi hội đủ 3 điều kiện: hàm lượng hạt mịn đủ nhiều, số hạt mịn trong lỗ rỗng của các hạt thô không tham gia chịu ứng suất hữu hiệu và tốc độ dòng chảy phải đủ lớn. Từ kết quả thí nghiệm và kết luận nghiên cứu của những tác giả trên có thể nhận định rằng hàm lượng hạt mịn từ 30% đến 35% đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ cho mức độ xói lớn nhất. Ngoài ra, giá trị cụ thể của hàm lượng hạt mịn này phụ thuộc vào dung trọng khô ( $\gamma_k$ ) và được giải thích rõ ở mục 3.2.

### 3.2. Đất có cấp phối liên tục

Hình 5 thể hiện trọng lượng khô tích lũy của hạt mịn bị xói so với năng lượng tiêu hao tích lũy đối với đất có cấp phối liên tục. Giá trị của chỉ số kháng xói của đất R3, R4, R5 lần lượt bằng 4,34, 4,21 và 4,30. Do đó, mức độ xói hạt mịn tương ứng đối với 3 loại đất này là kháng xói ở mức độ trung bình [21]. Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy chỉ số chống xói của đất R4 nhỏ hơn một chút và ứng với hàm lượng hạt mịn là 20%.

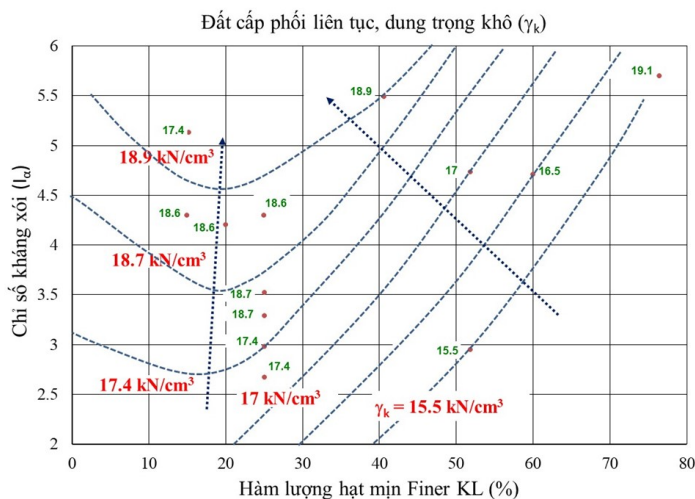


Hình 5. Mô tả trọng lượng khô tích lũy của hạt mịn bị xói so với năng lượng tiêu hao tích lũy đối với đất có cấp phối liên tục

Đối với đất có cấp phối liên tục, Le V.T đã thực hiện 10 thí nghiệm xói hạt mịn với các hàm lượng hạt mịn khác nhau (3-T-1, 3-T-2, CH-5, CH-10, R1, R2-90a, R2-90b, R2-97b, R2-97d và CD) [18]. Kết quả chỉ ra rằng cho thấy chỉ số kháng xói có xu hướng tăng khi hàm lượng hạt mịn tăng từ 25% đến 76,46% và xu hướng giảm khi hạt mịn từ 15,3% đến 25%, xem giá trị chỉ số kháng xói ở Bảng 3.

Bảng 3. Tổng hợp các thông số vật lý và chỉ số kháng xói của đất có cấp phối liên tục từ tác giả (03 mẫu thí nghiệm) và Le V.T (10 mẫu thí nghiệm)

Số thứ tự	Tên mẫu đất thí nghiệm	Dung trọng khô $\gamma_k$ (kN/m <sup>3</sup> )	Finer KL (%)	(H/F) <sub>min</sub>	Chỉ số kháng xói ( $I_\alpha$ )
1	3-T-1	17,0	51,84	0,45	4,73
2	3-T-2	15,5	51,84	0,45	2,95
3	CH-5	16,54	60,01	0,41	4,71
4	CH-10	18,9	40,61	0,44	5,49
5	R1	17,39	15,26	0,59	5,13
6	R2-90a	17,39	25,04	0,2	2,67
7	R2-90b	17,39	25,04	0,2	2,98
8	R2-97b	18,74	25,04	0,2	3,52
9	R2-97d	18,74	25,04	0,2	3,29
10	CD	19,14	76,46	0,11	5,70
11	R5	18,66	15	0,29	4,30
12	R4	18,66	20	0,24	4,21
13	R3	18,66	25	0,2	4,34



Hình 6. Biểu diễn mối quan hệ không tuyến tính giữa chỉ số kháng xói  $I_\alpha$ , hàm lượng hạt mịn Finer KL và trọng lượng riêng khô đối với đất cấp phối liên tục (13 mẫu đất thí nghiệm)

Hình 6 biểu diễn mối quan hệ không tuyến tính giữa chỉ số kháng xói  $I_\alpha$ , hàm lượng hạt mịn Finer KL và dung trọng khô ( $\gamma_k$ ) đối với đất cấp phối liên tục từ kết quả thí nghiệm xói hạt mịn của chúng tôi (03 mẫu thí nghiệm) và Le (10 mẫu thí nghiệm), chỉ ra rằng chỉ số kháng xói giảm khi hàm lượng hạt mịn tăng dần lên 20% và tăng khi hàm lượng hạt mịn vượt qua 20%. Mức độ xói lớn nhất khi hàm lượng hạt mịn khoảng 20% và kết quả này khá giống với giả thiết của Kenny và Lau, Chang và Zhang đối với đất có cấp phối liên tục [1, 5]. Hàm lượng hạt mịn của đất có cấp phối liên tục để gây mức độ xói tối đa có giá trị nhỏ hơn đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ là do kích cỡ lỗ rỗng giữa các hạt thô của nó nhỏ hơn [1], dẫn đến hàm lượng hạt mịn tối đa lấp đầy lỗ rỗng giữa các hạt thô cũng ít hơn.



Đồng thời kết quả cũng cho thấy rằng chỉ số kháng xói bị ảnh hưởng bởi hàm lượng hạt mịn và dung trọng khô (xem Hình 6). Cùng hàm lượng hạt mịn, khi dung trọng khô tăng lên thì chỉ số kháng xói tăng lên. Trong khi đó, cùng giá trị dung trọng khô chỉ số kháng xói xuất hiện hai xu hướng theo hàm lượng hạt mịn. Chỉ số kháng xói có xu hướng giảm khi hàm lượng hạt mịn nhỏ hơn 20% và xu hướng tăng khi hàm lượng hạt mịn lớn hơn 20%. Tương tự, kết quả khá giống với giả thiết của Kenny và Lau, Chang và Zhang đối với đất có cấp phối liên tục [1, 5].

Do đó, chỉ số kháng xói nhỏ nhất khi hàm lượng hạt mịn khoảng 20%. Ngoài ra, giá trị hàm lượng hạt mịn này thay đổi nhưng không đáng kể và tùy thuộc vào trọng lượng riêng khô (xem Hình 6).

#### 4. Kết luận

Chỉ số kháng xói ( $I\alpha$ ) được tính toán dựa trên trọng lượng khô tích lũy của hạt mịn bị xói và năng lượng tiêu hao ở trạng thái ổn định (tức là khi độ dẫn thủy lực có xu hướng ổn định và tốc độ xói có xu hướng giảm). Nhờ giá trị của  $I\alpha$ , chúng tôi có thể xác định được mức độ xói hạt mịn. Đối với đất có cỡ hạt bị nhỏ, mức độ xói hạt mịn đạt tối đa với hàm lượng mịn là khoảng 35%. Khi vượt quá 35% thì sức kháng xói của đất tăng lên do các hạt thô nổi trong ma trận của các hạt mịn. Đối với đất có cấp phối liên tục, ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn với mức độ xói có xu hướng giống với đất có cỡ hạt bị nhỏ nhưng hàm lượng hạt mịn chỉ khoảng 20% là đạt mức độ xói tối đa.

Dựa trên cơ sở dữ liệu từ kết quả thí nghiệm của chúng tôi và Le [18], kết quả cho thấy sức kháng xói của đất gia tăng theo dung trọng khô ( $\gamma_k$ ). Ngoài ra, số lượng các hạt mịn bị xói tăng lên khi giảm mật độ ban đầu và xói hạt mịn có thể gây ra sự thay đổi cục bộ của mật độ do sự sắp xếp lại cục bộ của các hạt thô trong đất [23]. Do đó, hàm lượng hạt mịn để mức độ xói đạt tối đa còn liên quan đến dung trọng khô và cần được xem xét nghiên cứu thêm để đưa ra kết luận chính xác hơn.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Kenney, T. C., Lau, D. (1985). [Internal stability of granular filters](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 22 (2):215–225.
- [2] Foster, M., Fell, R., Spannagle, M. (2000). [The statistics of embankment dam failures and accidents](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5):1000–1024.
- [3] Wan, C. F., Fell, R. (2004). [Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams](#). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4):373–380.
- [4] Fry, J. (2012). [Introduction to the process of internal erosion in hydraulic structures: embankment dams and dikes](#). Wiley.
- [5] Chang, D. S., Zhang, L. M. (2013). [Extended internal stability criteria for soils under seepage](#). *Soils and Foundations*, 53(4):569–583.
- [6] Ke, L., Takahashi, A. (2014). [Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil](#). *Soils and Foundations*, 54(4):713–730.
- [7] Le, V. T., Vu, H. C. (2018). Đánh giá khả năng xói hạt mịn của một số đất đắp đập, đề dựa vào những tiêu chuẩn cỡ hạt. *Tạp chí khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường*, 60:27–32.
- [8] Richards, K. S., Reddy, K. R. (2007). [Critical appraisal of piping phenomena in earth dams](#). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66(4):381–402.
- [9] Kézdi, A. (1979). *Soil physics: Selected topics*. Elsevier Scientific Pub. Co.
- [10] Kovács, G. (1981). *Seepage hydraulics*. Elsevier Scientific Pub. Co.
- [11] Moffat, R., Fannin, R. J., Garner, S. J. (2011). [Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 48(3):399–412.
- [12] Fannin, R. J., Slangen, P., Mehdizadeh, A., Disfani, M. M., Arulrajah, A., Evans, R. (2015). [Discussion: On the distinct phenomena of suffusion and suffosion](#). *Géotechnique Letters*, 5(3):129–130.

- [13] Sato, M., Kuwano, R. (2015). [Suffusion and clogging by one-dimensional seepage tests on cohesive soil](#). *Soils and Foundations*, 55(6):1427–1440.
- [14] Chaney, R. C., Demars, K. R., Reddi, L. N., Lee, I.-M., Bonala, M. V. S. (2000). [Comparison of Internal and Surface Erosion Using Flow Pump Tests on a Sand-Kaolinite Mixture](#). *Geotechnical Testing Journal*, 23(1):116.
- [15] Phong, H. V. N., Trung, V. T., Minh, T. D., My, N. V., Lo, V. T. (2022). [Effects of lightweight particle content on the mechanical strength of cylindrical aggregates](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 16(2):117–127.
- [16] Taha, H., Nguyen, N.-S., Marot, D., Hijazi, A., Abou-Saleh, K. (2019). [Micro-scale investigation of the role of finer grains in the behavior of bidisperse granular materials](#). *Granular Matter*, 21(2).
- [17] Seghir, A., Benamar, A., Wang, H. (2014). [Effects of fine particles on the suffusion of cohesionless soils. Experiments and modeling](#). *Transport in Porous Media*, 103(2):233–247.
- [18] Le, V. T., Marot, D., Rochim, A., Bendahmane, F., Nguyen, H. H. (2018). [Suffusion susceptibility investigation by energy-based method and statistical analysis](#). *Canadian Geotechnical Journal*, 55(1):57–68.
- [19] Marot, D., Tran, D. M., Bendahmane, F., Le, V. T. (2020). [Multidirectional flow apparatus for assessing soil internal erosion susceptibility](#). *Geotechnical Testing Journal*, 43(6):20190254.
- [20] Chang, D., Zhang, L., Cheuk, J. (2014). [Mechanical consequences of internal soil erosion](#). *HKIE Transactions*, 21(4):198–208.
- [21] Marot, D., Rochim, A., Nguyen, H.-H., Bendahmane, F., Sibille, L. (2016). [Assessing the susceptibility of gap-graded soils to internal erosion: proposition of a new experimental methodology](#). *Natural Hazards*, 83(1):365–388.
- [22] Wan, C. F., Fell, R. (2008). [Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations](#). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(3):401–407.
- [23] Hosn, R., Benahmed, N., Nguyen, C. D., Andò, E., Sibille L., P., Chareyre B., P. (2019). *Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees*.