

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Đánh giá mức độ phá hoại của cát sạn san hô ở các độ chặt khác nhau cho nền đắp tại các đảo xa bờ

Assessment of particle breakage characteristics of coral sand-gravel with different relative densities for embankment foundations on offshore islands

➤ **Phạm Đức Phong¹, Vũ Văn Tuấn^{1*}, Nguyễn Thị Yến², Vũ Anh Tuấn¹, Phạm Đức Tiếp¹**

¹Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email: tuan97mta@gmail.com

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 25/4/2026

Ngày sửa bài: 05/5/2026

Ngày chấp nhận đăng: 21/5/2026

Ngày xuất bản Online: 27/5/2026

Tác giả liên hệ:

Email: tuan97mta@gmail.com

TÓM TẮT

Trong xây dựng nền đắp tại các đảo xa bờ, việc sử dụng cát sạn san hô tại chỗ có ý nghĩa kinh tế - kỹ thuật quan trọng, tuy nhiên loại vật liệu này có đặc trưng giòn, rỗng và dễ bị phá hoại dưới tác động đầm nén và tải trọng công trình, dẫn đến suy giảm khả năng chịu lực của kết cấu nền đắp.

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm đánh giá mức độ phá hoại hạt của cát sạn san hô ở hai trạng thái độ chặt $K = 0,90$ và $K = 0,95$. Các thí nghiệm đầm nén Proctor, nén một trục không nở hông, cát phẳng trực tiếp và phân tích thành phần hạt trước - sau thí nghiệm bằng các chỉ số MF theo Marsal và B_{rk} theo Hardin. Kết quả cho thấy quá trình đầm chế bị đã gây vỡ hạt đáng kể với MF đạt 1,53% ($K = 0,90$) và 1,65% ($K = 0,95$). Trong thí nghiệm nén, MF tăng lên 1,94% và 1,79%, lớn hơn nhiều so với thí nghiệm cát phẳng (0,24 - 0,52%). Cường độ chống cắt tăng khi độ chặt tăng, với góc ma sát trong từ $45,95^{\circ}$ lên $47,48^{\circ}$, lực dính biểu kiến từ 21,4 kPa lên 26,99 kPa. Kết quả nghiên cứu cho thấy độ chặt $K = 0,90 - 0,95$ là phù hợp đối với nền đắp cát sạn san hô, đồng thời cần kiểm soát công đầm và ứng suất tác dụng để hạn chế phá hoại hạt và biến dạng dư lâu dài.

Từ khóa: Cát sạn san hô, nền đắp, độ chặt, phá hoại hạt, đảo xa bờ.

ABSTRACT

In the construction of embankment foundations on offshore islands, the use of locally available coral sand-gravel materials offers significant economic and technical advantages. However, this material is characterized by brittle, porous particles that are highly susceptible to breakage under compaction and structural loading, potentially reducing the load-bearing capacity of embankment structures.

This paper presents an experimental study evaluating the particle breakage characteristics of coral sand-gravel at two compaction levels, $K = 0,90$ and $K = 0,95$. The testing program included Standard Proctor compaction, one-dimensional compression (oedometer), direct shear tests, and grain-size analyses before and after testing using the Marsal breakage index (MF) and Hardin relative breakage index (B_{rk}). The results indicate that the sample preparation compaction process itself caused considerable particle breakage, with MF values of 1,53% for $K = 0,90$ and 1,65% for $K = 0,95$. In the compression tests, MF increased to 1,94% and 1,79%, respectively, which were significantly higher than those obtained from direct shear tests (0,24 - 0,52%). Shear strength increased with increasing compaction degree, with the internal friction angle rising from $45,95^\circ$ to $47,48^\circ$ and the apparent cohesion increasing from 21,4 kPa to 26,99 kPa. The findings suggest that a compaction degree of $K = 0,90 - 0,95$ is appropriate for coral sand-gravel embankments, while compaction effort and applied stress should be carefully controlled to minimize particle breakage and long-term residual deformation.

Keywords: Coral sand-gravel, embankment foundation, density, particle breakage, offshore islands.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong chiến lược phát triển kinh tế biển kết hợp bảo đảm quốc phòng - an ninh, việc xây dựng và hoàn thiện hệ thống hạ tầng giao thông trên các đảo xa bờ có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Các tuyến đường giao thông nội đảo không chỉ phục vụ nhu cầu đi lại, vận chuyển vật tư, hàng hóa và sinh hoạt của quân dân trên đảo, mà còn đóng vai trò quan trọng trong tổ chức hậu cần, cơ động lực lượng và bảo đảm khai thác lâu dài các công trình hạ tầng biển đảo.

Tuy nhiên, điều kiện xây dựng tại các đảo xa bờ luôn đặt ra nhiều khó khăn đặc thù, trong đó nổi bật là vấn đề nguồn vật liệu đắp nền. Do khoảng cách xa đất liền, chi phí vận chuyển đất, đá, cát xây dựng từ đất liền ra đảo rất lớn, phụ thuộc mạnh vào điều kiện thời tiết, sóng gió và năng lực phương tiện vận tải biển. Vì vậy, việc tận dụng nguồn vật liệu tại chỗ như cát sạn san hô là giải pháp có ý nghĩa kinh tế - kỹ thuật rõ rệt, giúp giảm chi phí, rút ngắn thời gian thi công và nâng cao tính chủ động trong xây dựng công trình. Trên

thực tế, cát sạn san hô đã và đang được sử dụng trong nhiều hạng mục san lấp, đắp nền, gia cố mặt bằng tại các đảo san hô và khu vực ven biển [1].

Tuy nhiên, cát sạn san hô là loại vật liệu có nguồn gốc sinh học, thành phần chủ yếu là carbonate canxi, hình thành từ quá trình phong hóa và phá vỡ cơ học của rạn san hô, vỏ sinh vật biển, nhuyễn thể và tảo vôi. Khác với cát thạch anh thông thường, hạt cát sạn san hô thường có hình dạng góc cạnh, bề mặt nhám, cấu trúc nội hạt rỗng và độ cứng thấp. Chính những đặc điểm này tạo nên khả năng liên kết hạt lớn, góc ma sát trong cao, nhưng đồng thời làm cho vật liệu rất dễ bị vỡ hạt khi chịu tác động cơ học trong quá trình đầm nén, chịu tải công trình hoặc tải trọng giao thông. Hiện tượng vỡ hạt là một trong những đặc trưng cơ học quan trọng nhất của cát sạn san hô. Khi hạt bị nghiền vỡ, thành phần cấp phối của vật liệu thay đổi, hàm lượng hạt mịn tăng lên, cấu trúc ban đầu bị phá vỡ và các thông số cơ lý như cường độ, biến dạng, độ rỗng, độ thấm có thể thay đổi đáng kể. Trong nền đắp, vỡ hạt có thể dẫn đến lún dư, lún không đều, suy giảm khả năng chịu tải, mất ổn định cục bộ hoặc làm thay đổi trạng thái làm việc lâu dài của kết cấu nền - mặt đường.

Một vấn đề đáng chú ý là độ chặt thi công, vốn được xem là chỉ tiêu kiểm soát quan trọng trong nền đắp, có tác động hai mặt đối với cát sạn san hô. Khi tăng độ chặt, vật liệu có khả năng chịu tải tốt hơn, biến dạng nhỏ hơn và cường độ chống cắt cao hơn [2]. Tuy nhiên, độ chặt cao cũng làm tăng khả năng tiếp xúc giữa các hạt và làm tăng ứng suất tiếp xúc cục bộ, từ đó có thể thúc đẩy hiện tượng vỡ hạt. Vì vậy, việc lựa chọn độ chặt thi công hợp lý cần dựa trên sự cân bằng giữa yêu cầu tăng cường độ, giảm biến dạng và yêu cầu hạn chế phá hoại hạt.

Ở Việt Nam, các nghiên cứu về cát sạn san hô phục vụ xây dựng công trình biển đảo còn tương đối hạn chế, đặc biệt là các nghiên cứu định lượng mức độ vỡ hạt theo trạng thái độ chặt. Phần lớn các tiêu chuẩn hiện hành vẫn chủ yếu dựa trên cơ sở nghiên cứu đối với đất, cát thạch anh hoặc vật liệu hạt thông thường, chưa phản ánh đầy đủ đặc trưng của vật liệu carbonate nguồn gốc sinh học. Do đó, việc nghiên cứu ảnh hưởng của độ chặt đến mức độ phá hoại hạt cát sạn san hô có ý nghĩa khoa học và thực tiễn rõ rệt.

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm đánh giá mức độ phá hoại vật liệu cát sạn san hô ở hai trạng thái độ chặt $K = 0,90$ và $K = 0,95$. Chương trình thí nghiệm bao gồm phân tích thành phần hạt, đầm nén Proctor, chế bị mẫu ở các độ chặt yêu cầu, thí nghiệm nén một trục không nở hông, thí nghiệm cắt phẳng trực tiếp và sàng lại mẫu sau từng giai đoạn để định lượng mức độ vỡ hạt. Các chỉ số đánh giá chính gồm hệ số mịn hóa MF theo Marsal và chỉ số vỡ hạt tương đối B_{rk} theo Hardin [3]. Trên cơ sở kết quả thực nghiệm, bài báo phân tích cơ chế phá hoại hạt, so sánh ảnh hưởng của độ chặt và đề xuất một số khuyến nghị khi sử dụng cát sạn san hô làm vật liệu nền đắp tại đảo xa bờ.

2. CƠ SỞ KHOA HỌC

2.1. Quan hệ giữa độ chặt và ứng xử cơ học của vật liệu hạt rời

Độ chặt là một trong những thông số quan trọng nhất phản ánh trạng thái sắp xếp của vật liệu hạt rời. Trong thi công nền đắp, độ chặt thường được biểu diễn thông qua hệ số đầm chặt:

$$K = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d.\max}} \quad (1)$$

Trong đó, γ_d là khối lượng thể tích khô thực tế của mẫu hoặc lớp đắp, còn $\gamma_{d.\max}$ là khối lượng thể tích khô lớn nhất xác định từ thí nghiệm đầm nén tiêu chuẩn.

Khi độ chặt tăng, khoảng cách giữa các hạt giảm, số điểm tiếp xúc giữa các hạt tăng, mức độ liên kết hạt và ma sát trong tăng lên. Do đó, vật liệu thường có cường độ chống cắt cao hơn và biến dạng nhỏ hơn dưới cùng một mức tải trọng. Đây là cơ sở để yêu cầu nền đắp phải được đầm đạt độ chặt nhất định trong thiết kế và nghiệm thu.

Tuy nhiên, đối với cát sạn san hô, cơ chế này trở nên phức tạp hơn. Do hạt san hô có cấu trúc rỗng, giòn và dễ vỡ, sự gia tăng số điểm tiếp xúc và lực tiếp xúc cục bộ khi tăng độ chặt có thể làm tăng nguy cơ phá hoại hạt. Nói cách khác, độ chặt cao vừa có lợi về mặt tăng cường độ và giảm biến dạng, vừa có thể bất lợi vì làm gia tăng vỡ hạt trong quá trình đầm nén và chịu tải. Đây là đặc điểm cần được xem xét riêng khi sử dụng vật liệu san hô cho nền đắp.

2.2. Hiện tượng vỡ hạt và các chỉ số đánh giá

Vỡ hạt xảy ra khi ứng suất tại điểm tiếp xúc giữa các hạt vượt quá cường độ chịu kéo hoặc chịu nén cục bộ của hạt. Đối với cát sạn san hô, hiện tượng này dễ xảy ra hơn so với cát thạch anh do thành phần khoáng vật chủ yếu là CaCO_3 , độ cứng thấp hơn và cấu trúc nội hạt rỗng phát triển. Khi hạt bị vỡ, các mảnh nhỏ hơn lấp đầy lỗ rỗng, làm thay đổi cấp phối và gây ra biến dạng không hồi phục.

Để định lượng mức độ vỡ hạt, nghiên cứu trong bài báo sử dụng hai chỉ số chính: Hệ số mịn hóa MF theo Marsal và chỉ số vỡ hạt tương đối B_{rk} theo Hardin.

Hệ số mịn hóa MF được xác định dựa trên sự giảm phần trăm khối lượng giữ lại trên các sàng sau thí nghiệm:

$$MF = \sum \Delta W_k \quad (2)$$

Với ΔW_k là sự giảm phần trăm khối lượng hạt giữ lại trên sàng thứ k. Chỉ số MF có ưu điểm là đơn giản, trực quan, phản ánh tổng lượng hạt ở các cấp cỡ lớn bị phá vỡ và chuyển xuống các cấp cỡ nhỏ hơn.

Chỉ số vỡ hạt tương đối B_{rk} theo Hardin [3] được xác định theo công thức:

$$B_{rk} = \frac{B_p}{B_{p0}} \quad (3)$$

Trong đó, B_p là diện tích giữa đường cong cấp phối trước và sau thí

nghiệm trên hệ trục bán logarit, còn B_{p0} là diện tích tiềm năng vỡ hạt lớn nhất. Chỉ số B_{rk} có giá trị từ 0 đến 1, trong đó 0 tương ứng với không vỡ hạt, còn 1 tương ứng với mức vỡ hạt cực đại về mặt lý thuyết. So với MF, B_{rk} phản ánh sự dịch chuyển tổng thể của đường cong cấp phối và cho phép so sánh giữa các trạng thái mẫu khác nhau.

Ngoài hai chỉ số trên, sự gia tăng hàm lượng hạt mịn, đặc biệt là phần hạt nhỏ hơn 0,1 mm, cũng được sử dụng như một chỉ tiêu bổ sung. Hàm lượng hạt mịn tăng là biểu hiện trực tiếp của quá trình nghiền vỡ hạt.

2.3. Cường độ chống cắt và biến dạng nén của cát sạn san hô

Cường độ chống cắt của vật liệu hạt rời thường được mô tả theo tiêu chuẩn Mohr - Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (4)$$

Trong đó: τ là ứng suất cắt giới hạn, C là lực dính, σ là ứng suất pháp và φ là góc ma sát trong. Đối với cát sạn san hô, do hình dạng hạt góc cạnh, bề mặt nhám và hiệu ứng liên kết hạt, kết quả thí nghiệm có xuất hiện lực dính biểu kiến [4]. Góc ma sát trong của cát sạn san hô thường lớn hơn cát thạch anh thông thường.

Trong thí nghiệm nén một trục không nở hông, biến dạng dọc trục của mẫu được xác định theo:

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta h}{h_m} 100\% \quad (4)$$

Trong đó, Δh là độ lún của mẫu, h_m là chiều cao ban đầu của mẫu. Đối với vật liệu cát sạn san hô, biến dạng nén bao gồm biến dạng do tái sắp xếp hạt và biến dạng do vỡ hạt. Thành phần biến dạng do vỡ hạt thường không hồi phục khi dỡ tải, dẫn đến biến dạng dư lớn.

3. PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

3.1. Vật liệu thí nghiệm

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu là cát sạn san hô khai thác từ khu vực đảo xa bờ thuộc vùng biển Việt Nam. Mẫu có thành phần chủ yếu là vật liệu carbonate, màu trắng ngà đến vàng nhạt, hạt góc cạnh, bề mặt nhám và có nhiều mảnh vụn san hô. Trước khi thí nghiệm, mẫu được phơi khô tự nhiên, sau đó sấy ở nhiệt độ 105 - 110°C đến khối lượng không đổi.



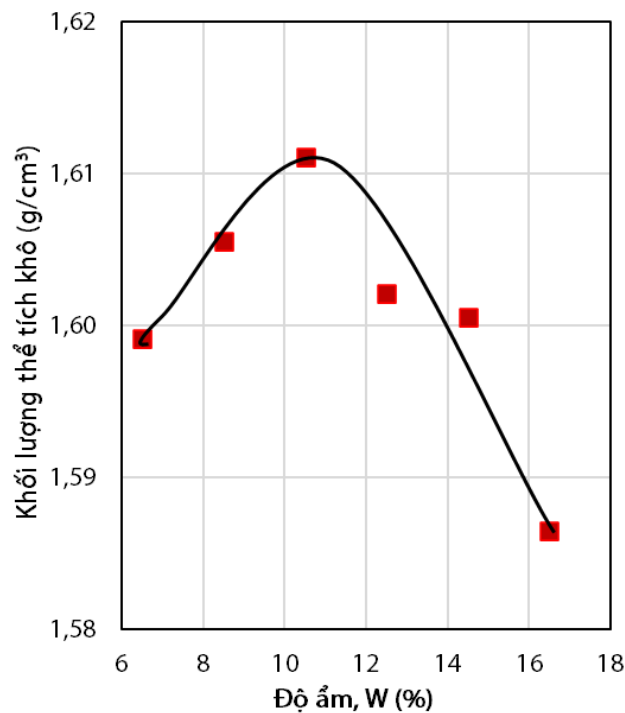
Hình 1: Hỗn hợp cát sạn san hô được lấy từ đảo xa bờ của Việt Nam.

Phân tích và lựa chọn thành phần hạt ban đầu được thực hiện bằng phương pháp sàng khô với bộ sàng có kích thước lỗ 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,25 và 0,1 mm. Khối lượng mẫu đại diện ban đầu là 1945,8 g. Kết quả cho thấy vật liệu có $D_{10} = 0,170$ mm, $D_{30} = 0,470$ mm, $D_{60} = 1,930$ mm; hệ số không đồng nhất $C_u = 11,4$ và hệ số đường cong cấp phối $C_c = 0,67$. Hàm lượng hạt nhỏ hơn 0,1 mm là 3,93%. Theo TCVN 5746:2024 [5], vật liệu được xếp vào nhóm cát lẫn sỏi, ít hạt mịn, cấp phối kém.

Từ thành phần hạt được lựa chọn tạo mẫu thí nghiệm, căn cứ theo TCVN 9436:2012 [6], hai trạng thái độ chặt được lựa chọn cho nghiên cứu là $K=0,90$ và $K=0,95$.

3.2. Thí nghiệm đầm nén Proctor

Thí nghiệm đầm nén Proctor tiêu chuẩn được thực hiện nhằm xác định độ ẩm tối ưu W_{opt} và khối lượng thể tích khô lớn nhất $\gamma_{d,max}$. Mẫu được chuẩn bị ở 6 mức độ ẩm khác nhau, sau đó đầm trong khuôn tiêu chuẩn bằng búa 2,5 kg, chiều cao rơi 305 mm, đầm 3 lớp, mỗi lớp 25 chày. Kết quả thí nghiệm xác định được: Độ ẩm tối ưu $W_{opt} = 11,17\%$; khối lượng thể tích khô lớn nhất $\gamma_{d,max} = 1,611$ g/cm³.



Hình 2. Tương quan độ ẩm và khối lượng thể tích khô của cát san hô ứng công đầm tiêu chuẩn 25 lần/lớp.

*/Chế bị mẫu và đánh giá vỡ hạt do đầm

Mẫu thí nghiệm được chế bị trong khuôn có thể tích 235 cm³. Với $K = 0,90$, khối lượng mẫu khô là 340,72 g; với $K = 0,95$, khối lượng mẫu khô là 359,66 g. Nước được bổ sung theo độ ẩm tối ưu 11,17%, tương ứng với 38,06 g cho mẫu $K = 0,90$ và 40,17 g cho mẫu $K = 0,95$. Mỗi trạng thái độ chặt thực hiện 01 tổ mẫu (03 mẫu) theo quy định của TCVN 4201:2012 [7].

Sau khi trộn đều vật liệu với nước, mẫu được đầm thủ công trong khuôn đến chiều cao thiết kế. Để đánh giá riêng mức độ vỡ hạt do quá trình đầm

chế bị mẫu, sau khi đầm hai tổ mẫu tương ứng hai độ chặt được tháo ra, sấy khô và sàng lại, các tổ mẫu còn lại sau khi đầm chặt được tiến hành đi thí nghiệm nén một trục không nở hông hoặc thí nghiệm cắt phẳng trực tiếp. Đây là bước quan trọng nhằm tách riêng ảnh hưởng của quá trình đầm nén ban đầu với ảnh hưởng của các thí nghiệm cơ học tiếp theo.

3.3. Thí nghiệm nén một trục không nở hông

Thí nghiệm nén một trục không nở hông được thực hiện trên thiết bị nén tự động. Mẫu có đường kính 10 cm, chiều cao ban đầu 3 cm, được thực hiện ở hai độ chặt $K = 0,90$ và $K = 0,95$. Chu trình gia tải bao gồm các cấp áp lực 25, 50, 100, 200 và 400 kPa; sau đó dỡ tải theo các cấp 200, 100, 50 và 25 kPa (TCVN 4200:2012 [8]). Tại mỗi cấp tải, độ lún của mẫu được ghi nhận để xác định biến dạng dọc trục.

Sau khi kết thúc thí nghiệm, toàn bộ mẫu được lấy ra khỏi khuôn, sấy khô và sàng lại để xác định sự thay đổi thành phần hạt. Mức độ vỡ hạt do nén được tính bằng cách so sánh thành phần hạt sau nén với thành phần hạt sau đầm chế bị.

3.4. Thí nghiệm cắt phẳng trực tiếp

Thí nghiệm cắt phẳng trực tiếp được thực hiện trên máy cắt tự động ShearMatic. Mỗi trạng thái độ chặt $K = 0,90$ và $K = 0,95$ được thí nghiệm ở ba cấp ứng suất pháp: 25, 50 và 75 kPa. Tốc độ cắt được chọn là 1 mm/phút (TCVN 4199:1995 [9]). Trong quá trình cắt, lực cắt và chuyển vị ngang được ghi nhận liên tục. Từ các giá trị ứng suất cắt cực đại tương ứng với từng cấp ứng suất pháp, đường bao phá hoại Mohr - Coulomb được xây dựng để xác định góc ma sát trong φ và lực dính biểu kiến c . Sau thí nghiệm, mẫu tiếp tục được sấy và sàng lại để đánh giá mức độ vỡ hạt do cắt.

4. PHÂN TÍCH ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

4.1. Vỡ hạt trong giai đoạn đầm chế bị

Kết quả sàng sau đầm cho thấy quá trình chế bị mẫu đã gây ra vỡ hạt đáng kể.

Với mẫu $K = 0,90$, tổng lượng hạt giảm ở các cỡ sàng D5 (+0,158 g), D2 (+0,303 g), D0,5 (+0,781 g), D0,25 (+3,971 g), tổng $\Sigma\Delta W_k = 5,213$ g, tương ứng MF = 1,53%.

Với mẫu $K = 0,95$, tổng lượng hạt giảm ở các cỡ sàng D5 (+0,590 g), D1 (+0,115 g), D0,5 (+1,022 g), D0,25 (+4,196 g), tổng $\Sigma\Delta W_k = 5,923$ g, tương ứng MF = 1,65%.

Như vậy, mẫu $K = 0,95$ có mức độ vỡ hạt do đầm lớn hơn mẫu $K = 0,90$. Điều này phù hợp với cơ chế vật lý của vật liệu: để đạt độ chặt cao hơn, mẫu phải chịu tác động của số lần đầm lớn hơn, các hạt tiếp xúc chặt hơn và ứng suất tiếp xúc cục bộ tăng lên, từ đó làm tăng khả năng phá vỡ hạt.

Hàm lượng hạt mịn nhỏ hơn 0,1 mm cũng tăng sau đầm. Ở mẫu $K = 0,90$, khối lượng hạt nhỏ hơn 0,1 mm tăng từ 13,644 g lên 15,951 g. Ở mẫu $K = 0,95$, giá trị này tăng từ 14,411 g lên 17,896 g. Kết quả này khẳng định rằng ngay trong quá trình thi công đầm chế bị mẫu, vật liệu cát sạn san hô

đã bị biến đổi cấp phối theo hướng mịn hóa.

Một điểm đáng chú ý là hạt cỡ 0,25 mm bị giảm nhiều nhất trong cả hai trường hợp. Điều này cho thấy nhóm hạt trung bình - nhỏ của cát sạn san hô có thể là nhóm nhạy cảm với phá hoại do đầm. Nguyên nhân có thể do các hạt ở cỡ này vừa đủ lớn để tồn tại khuyết tật nội hạt, vừa đủ nhỏ để chịu ứng suất tiếp xúc cao trong mạng lưới hạt.

4.2. Ứng xử biến dạng trong thí nghiệm nén một trục không nở hông

Kết quả nén cho thấy mẫu K = 0,95 có biến dạng nhỏ hơn mẫu K = 0,90 ở hầu hết các cấp tải thấp và trung bình. Tại áp lực 200 kPa, biến dạng dọc trục của mẫu K = 0,90 là 2,663%, trong khi mẫu K = 0,95 là 2,423%. Điều này chứng tỏ việc tăng độ chặt có tác dụng rõ rệt trong việc giảm biến dạng nén của vật liệu.

Tuy nhiên, ở cấp tải 400 kPa, biến dạng của hai mẫu gần như hội tụ: mẫu K = 0,90 đạt 3,440%, mẫu K = 0,95 đạt 3,347%. Chênh lệch giữa hai mẫu chỉ còn 0,1%. Hiện tượng này cho thấy khi áp lực nén tăng đến mức đủ lớn, cơ chế vỡ hạt và tái cấu trúc vật liệu bắt đầu chi phối ứng xử của mẫu, làm giảm vai trò của độ chặt ban đầu.

Khi dỡ tải từ 400 kPa về 25 kPa, biến dạng dư còn lại rất lớn. Mẫu K = 0,90 còn biến dạng dư 2,943%, tương đương 85,5% biến dạng lớn nhất. Mẫu K = 0,95 còn biến dạng dư 2,440%, tương đương 72,9% biến dạng lớn nhất. Điều đó cho thấy biến dạng của cát sạn san hô chủ yếu là biến dạng không hồi phục, liên quan đến trượt hạt, tái sắp xếp hạt và đặc biệt là vỡ hạt. So với K = 0,90, mẫu K = 0,95 có tỷ lệ phục hồi đàn hồi cao hơn, phản ánh cấu trúc chặt hơn giúp vật liệu làm việc ổn định hơn trong phạm vi tải trọng chưa gây phá hoại mạnh.

*/Vỡ hạt sau thí nghiệm nén

So sánh thành phần hạt sau đầm và sau nén cho thấy thí nghiệm nén gây ra mức độ vỡ hạt đáng kể. Mẫu K = 0,90, tổng tổng $\Sigma\Delta W_k = 6,597$ g, tương ứng MF = 1,94%. Mẫu K = 0,95, tổng tổng $\Sigma\Delta W_k = 6,411$ g, tương ứng MF = 1,79%.

Theo chỉ số MF, mẫu K = 0,90 có mức vỡ hạt do nén lớn hơn mẫu K = 0,95. Tuy nhiên, nếu xét riêng lượng hạt nhỏ hơn 0,1 mm sinh ra trong giai đoạn nén, mẫu K = 0,95 lại có xu hướng tạo ra nhiều hạt mịn hơn. Cụ thể, hạt mịn của mẫu K = 0,90 tăng thêm 3,812 g, trong khi mẫu K = 0,95 tăng thêm 4,164 g.

Sự khác biệt này cho thấy hai chỉ số phản ánh hai khía cạnh khác nhau của hiện tượng phá hoại hạt. MF phản ánh tổng lượng hạt thô giảm trên các sàng, trong khi hàm lượng hạt mịn phản ánh mức độ nghiền vụn đến cấp hạt rất nhỏ. Ở mẫu K = 0,90, cấu trúc rỗng hơn cho phép hạt tái sắp xếp nhiều hơn, làm đường cong cấp phối dịch chuyển rõ ở vùng hạt thô và trung. Ở mẫu K = 0,95, mạng lưới hạt chặt hơn khiến ứng suất tiếp xúc tập trung hơn, làm một phần hạt bị nghiền thành cấp rất nhỏ.

Kết quả tính chỉ số B_{rk} cũng cho thấy trong giai đoạn nén, B_{rk} của mẫu

$K = 0,90$ là $0,0161$, lớn hơn B_{rk} của mẫu $K = 0,95$ là $0,0114$. Điều này phù hợp với nhận xét rằng đường cong cấp phối của mẫu $K = 0,90$ dịch chuyển tổng thể mạnh hơn. Tuy nhiên, sự gia tăng hạt mịn ở $K = 0,95$ vẫn cảnh báo nguy cơ nghiền vụn cục bộ khi vật liệu bị đầm quá chặt hoặc chịu tải cao.

4.3. Kết quả thí nghiệm cắt phẳng và cường độ chống cắt

Kết quả cắt phẳng trực tiếp cho thấy cát sạn san hô có cường độ chống cắt cao.

+ Với mẫu $K = 0,90$, từ các cấp độ thí nghiệm: $\sigma = 25, 50$ và 75 kPa, xác định được góc ma sát trong $\varphi = 45,95$ và lực dính biểu kiến $c = 21,4$ kPa.

+ Với mẫu $K = 0,90$, từ các cấp độ thí nghiệm: $\sigma = 25, 50$ và 75 kPa, xác định được góc ma sát trong $\varphi = 47,48$ và lực dính biểu kiến $c = 26,99$ kPa.

Như vậy, khi tăng độ chặt từ $K = 0,90$ lên $K = 0,95$, cả góc ma sát trong và lực dính biểu kiến đều tăng. Điều này phù hợp với bản chất của vật liệu hạt góc cạnh, độ chặt cao làm tăng hiệu ứng liên kết hạt, tăng lực cản trượt và tăng khả năng chịu cắt. Góc ma sát trong của cả hai mẫu đều cao hơn đáng kể so với cát thạch anh thông thường, phản ánh đặc trưng bề mặt nhám và hình dạng góc cạnh của hạt san hô.

Lực dính xác định từ thí nghiệm không nên hiểu là lực dính thực sự như trong đất sét, mà chủ yếu là lực dính biểu kiến do sự ăn khớp cơ học, gồ ghề bề mặt và hiệu ứng giãn nở thể tích khi cắt.

*/Vỡ hạt sau thí nghiệm cắt phẳng

Mức độ vỡ hạt do cắt phẳng nhỏ hơn đáng kể so với nén một trục không nở hông. Mẫu $K = 0,90$: $MF = 0,24\%$; mẫu $K = 0,95$: $MF = 0,52\%$

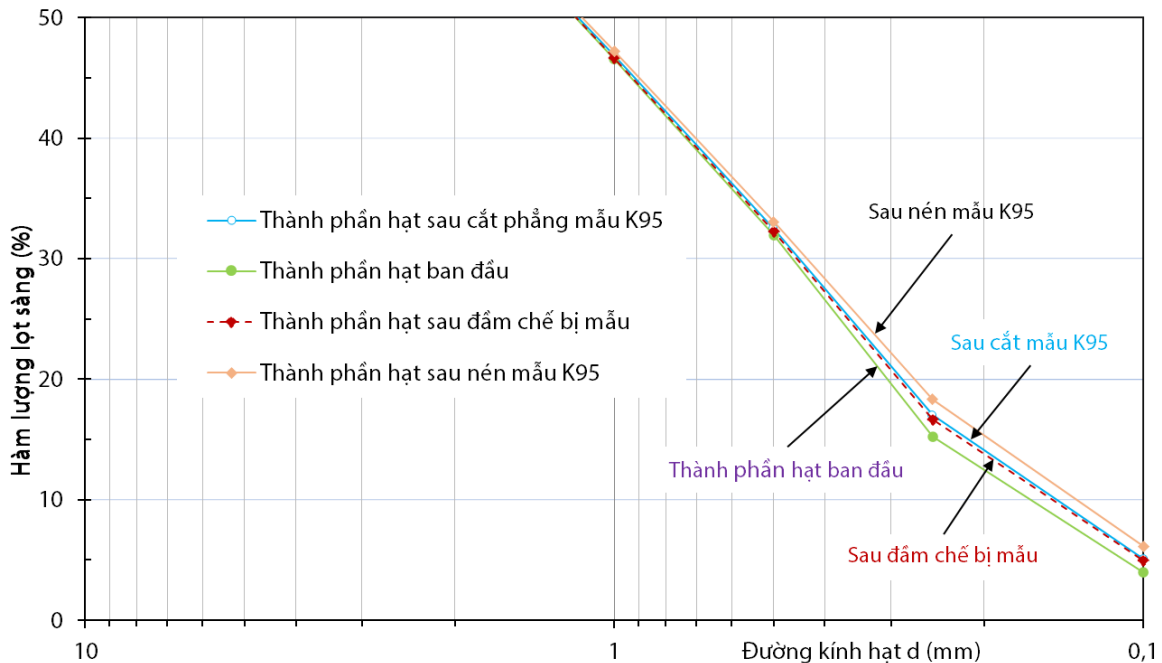
So với giai đoạn nén, MF do cắt chỉ bằng một phần nhỏ. Lượng hạt mịn nhỏ hơn $0,1$ mm tăng thêm do cắt ở mẫu $K = 0,90$ là $0,753$ g, còn ở mẫu $K = 0,95$ là $0,325$ g. Như vậy, nén Oedometer tạo ra lượng hạt mịn lớn hơn nhiều so với cắt phẳng. Nguyên nhân chính là do điều kiện ứng suất khác nhau. Trong nén một trục không nở hông, mẫu bị hạn chế biến dạng ngang bởi khuôn cứng, làm phát triển ứng suất ngang và tăng lực tiếp xúc giữa các hạt. Trong khi đó, ở thí nghiệm cắt phẳng với ứng suất pháp nhỏ hơn nhiều, các hạt có điều kiện dịch chuyển, xoay và tái sắp xếp theo phương cắt trước khi bị phá hoại. Do đó, mức độ nghiền vỡ hạt thấp hơn. Tuy nhiên, mẫu $K = 0,95$ có MF do cắt lớn hơn $K = 0,90$. Điều này có thể được giải thích bởi hiệu ứng giãn nở thể tích của mẫu chặt. Khi cắt, vật liệu chặt có xu hướng giãn nở, nhưng bị giới hạn bởi điều kiện thí nghiệm và tải trọng pháp tuyến, dẫn đến tăng ứng suất tiếp xúc cục bộ trên mặt trượt, làm tăng phá hoại hạt tại vùng cắt.

4.4. So sánh tổng hợp giữa các giai đoạn

Tổng hợp kết quả cho thấy mức độ phá hoại hạt phụ thuộc mạnh vào loại tác động cơ học. Theo chỉ số MF , thứ tự mức độ vỡ hạt trung bình là:

[Thí nghiệm nén Oedometer] > [Thí nghiệm đầm chế bị mẫu] > [Thí nghiệm cắt phẳng]

Cụ thể, MF do đầm khoảng 1,53 - 1,65%; MF do nén khoảng 1,79 - 1,94%; MF do cắt khoảng 0,24 - 0,52%. Điều này cho thấy không chỉ tải trọng khai thác mà cả quá trình thi công đầm nén cũng là nguyên nhân quan trọng gây phá hoại hạt san hô.



Hình 3. Đường cong cấp phối thành phần hạt sau thí nghiệm đầm chế bị mẫu, nén và cắt phẳng mẫu, độ chặt K = 0,95.

Hàm lượng hạt mịn tăng dần qua các giai đoạn. Ban đầu, hàm lượng hạt nhỏ hơn 0,1 mm khoảng 3,93 - 4,01%. Sau đầm, giá trị này tăng lên khoảng 4,69 - 4,99%. Sau nén, tiếp tục tăng lên 5,82 - 6,16%. Sự gia tăng này phản ánh quá trình mịn hóa tích lũy và không hồi phục.

Các đặc trưng cấp phối cũng thay đổi theo hướng C_u tăng nhẹ và C_c giảm nhẹ. Điều đó cho thấy đường cong cấp phối có xu hướng trải rộng hơn về phía hạt nhỏ, nhưng đồng thời mất cân đối ở một số vùng cỡ hạt do sự nghiền vỡ không đồng đều.

Từ góc độ ảnh hưởng của độ chặt, có thể thấy: trong giai đoạn đầm, $K = 0,95$ gây vỡ hạt nhiều hơn $K = 0,90$. Giai đoạn nén, $K = 0,90$ có B_{rk} và MF lớn hơn, nhưng $K = 0,95$ sinh ra nhiều hạt mịn hơn. Còn trong giai đoạn cắt, $K = 0,95$ có MF lớn hơn $K = 0,90$ do hiệu ứng liên kết hạt và giãn nở mạnh hơn.

Về biến dạng, $K = 0,95$ làm việc tốt hơn $K = 0,90$ trong phạm vi ứng suất thấp và trung bình. Với ứng suất cao, sự khác biệt giữa $K = 0,90$ và $K = 0,95$ giảm do cơ chế vỡ hạt chi phối. Như vậy, tăng độ chặt đến $K = 0,95$ có lợi cho cường độ và biến dạng làm việc, nhưng cũng cần kiểm soát nguy cơ vỡ hạt trong quá trình đầm nén.

5. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm về mức độ phá hoại vật liệu cát san

san hô ở các trạng thái độ chặt $K = 0,90$ và $K = 0,95$, có thể rút ra các nhận xét sau:

+ Quá trình đầm chế bị mẫu đã gây ra vỡ hạt đáng kể. Hệ số mịn hóa MF đạt 1,53% với mẫu $K = 0,90$ và 1,65% với mẫu $K = 0,95$. Trong giai đoạn thi công, vật liệu cát sạn san hô đã bị thay đổi cấp phối. Độ chặt càng cao thì nguy cơ vỡ hạt do đầm nén càng lớn.

+ Trong thí nghiệm nén một trục không nở hông, mẫu $K = 0,95$ có biến dạng nhỏ hơn $K = 0,90$ ở cấp tải thấp và trung bình, chứng tỏ độ chặt cao giúp cải thiện khả năng kháng biến dạng. Tuy nhiên, ở cấp tải 400 kPa, biến dạng của hai mẫu gần như hội tụ, cho thấy cơ chế vỡ hạt và tái cấu trúc vật liệu bắt đầu chi phối ứng xử. Biến dạng dư sau dỡ tải rất lớn, đạt 85,5% đối với mẫu $K = 0,90$ và 72,9% đối với mẫu $K = 0,95$. Điều này khẳng định biến dạng của cát sạn san hô chủ yếu là biến dạng không hồi phục, gắn liền với trượt hạt và phá hoại hạt.

+ Thí nghiệm nén gây vỡ hạt mạnh hơn thí nghiệm cắt phẳng. MF do nén đạt 1,94% với $K = 0,90$ và 1,79% với $K = 0,95$, trong khi MF do cắt chỉ đạt 0,24% với $K = 0,90$ và 0,52% với $K = 0,95$. Điều kiện hạn chế biến dạng ngang trong nén làm tăng ứng suất tiếp xúc cục bộ và thúc đẩy nghiền vỡ hạt.

+ Đối với nền đắp sử dụng cát sạn san hô tại đảo xa bờ, nên kiểm soát độ chặt thi công trong khoảng $K = 0,90$ - $K = 0,95$. Ứng suất làm việc nên được khống chế không vượt quá khoảng 200 kPa để hạn chế biến dạng không hồi phục và phá hoại hạt. Quá trình đầm nên ưu tiên các phương pháp đầm tạo ứng suất phân bố đều, hạn chế tác động xung kích cục bộ nhằm giảm nguy cơ nghiền vỡ hạt san hô.

+ Kết quả nghiên cứu góp phần bổ sung cơ sở dữ liệu thực nghiệm về ứng xử cơ học và phá hoại hạt của cát sạn san hô Việt Nam, đồng thời cung cấp căn cứ khoa học cho việc thiết kế, thi công và kiểm soát chất lượng nền đắp sử dụng vật liệu tại chỗ ở các đảo xa bờ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Lê Hải Trung. Nghiên cứu đề xuất giải pháp tôn tạo, mở rộng bãi đảo nổi thuộc quần đảo Trường Sa. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, số 58, tr. 70-77, 2017.

[2] Mai Đăng Nhân, Vũ Anh Tuấn, Phạm Đức Tiệp, Lâm Thị Huyền Hạnh. Nghiên cứu đặc tính sức chống cắt của cát san hô chịu tải trọng lặp bằng thí nghiệm cắt phẳng. Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, số 2(1), tr. 22-29, 2019. DOI: <https://10.56651/lqdtu.jst.v2.n01.316.sce>

[3] Bobby O. Hardin. Crushing of Soil Particles. Journal of Geotechnical Engineering - ASCE, Vol. 111(10), pp. 1177-1192, 1985. DOI: [https://doi:10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:10\(1177\)](https://doi:10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:10(1177))

[4] Anh-Tuan Vu. Shear strength behaviour of coral gravelly sand subjected to monotonic and cyclic loading. Geomechanics and Engineering. Vol. 25(2), pp. 89-98, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.12989/gae.2021.25.2.089>

[5] TCVN 5746:2024. Đất, đá xây dựng - Phân loại. Tiêu chuẩn quốc gia, 2024.

[6] TCVN 9436:2012. Nền đường ô tô - thi công và nghiệm thu. Tiêu chuẩn quốc gia, 2012.

[7] TCVN 4201:2012. Đất xây dựng - Phương pháp xác định độ chặt tiêu chuẩn trong phòng thí nghiệm. Tiêu chuẩn quốc gia, 2012.

[8] TCVN 4200:2012. Đất xây dựng - Phương pháp xác định tính nén lún trong phòng thí nghiệm. Tiêu chuẩn quốc gia, 2012.

[9] TCVN 4199:1995. Đất xây dựng - Phương pháp xác định sức chống cắt trong phòng thí nghiệm ở máy cắt phẳng. Tiêu chuẩn quốc gia, 1995.