

# Đánh giá tác động của hạt mịn không dính đến khả năng hóa lỏng của đất cát

Evaluating the effect of non-plastic fine content on the liquefaction potential of sandy soils

> TS TRẦN ĐÔNG KIỂM LAM<sup>1\*</sup>, THS NGUYỄN ĐỨC KHIÊM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM

<sup>2</sup>Khoa Khoa học Cơ bản, Trường Đại học Xây dựng Miền Tây, Email: ndkiem@mtu.edu.vn

\*Corresponding Author, Email: lam.trandongkiem@uah.edu.vn

## TÓM TẮT

Công trình nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn không dẻo (FC) đến khả năng chống hóa lỏng của đất cát thông qua một loạt thí nghiệm cắt đơn giản tuần hoàn (CDSS). Nghiên cứu xem xét sự hình thành áp lực nước lỗ rỗng thặng dư (EPP) và số chu kỳ tải cần thiết để đạt trạng thái hóa lỏng trong các hỗn hợp cát-hạt mịn với hàm lượng hạt mịn thay đổi từ 0% đến 40%. Kết quả cho thấy EPP có xu hướng tăng theo số chu kỳ tải cho tất cả các mẫu, nhưng tỷ lệ tăng trưởng thay đổi tùy thuộc vào hàm lượng hạt mịn. Đặc biệt, mẫu có 20% hạt mịn cho thấy EPP cao nhất trong các chu kỳ giữa, cho thấy sự tương tác đáng kể giữa cát và hạt mịn ở mức này. Về khả năng chống hóa lỏng, mẫu đất cát sạch (FC = 0%) thể hiện khả năng kháng hóa lỏng cao nhất, yêu cầu nhiều chu kỳ tải nhất để đạt trạng thái hóa lỏng. Tuy nhiên, khi hàm lượng hạt mịn tăng lên 20%, số chu kỳ cần thiết để đạt hóa lỏng giảm mạnh, cho thấy rằng chỉ cần một lượng nhỏ hạt mịn cũng có thể làm giảm đáng kể khả năng chống hóa lỏng. Đáng chú ý, khi hàm lượng hạt mịn vượt quá 30%, khả năng chống hóa lỏng lại được cải thiện, làm nổi bật mối quan hệ phức tạp giữa hàm lượng hạt mịn và hành vi của đất. Những phát hiện này cho thấy hàm lượng hạt mịn đóng vai trò quan trọng trong việc ảnh hưởng đến khả năng hóa lỏng của đất cát.

**Từ khóa:** Khả năng chống hóa lỏng; hàm lượng hạt mịn không dẻo; thí nghiệm cắt đơn giản tuần hoàn; áp lực nước lỗ rỗng thặng dư; chu kỳ tải.

## ABSTRACT

This paper investigates the influence of non-plastic fine content (FC) on the liquefaction resistance of sandy soils through a series of cyclic direct simple shear (CDSS) tests. The study examines the development of excess pore water pressure (EPP) and the number of loading cycles required for liquefaction in sand-fine mixtures with varying fine content (0% to 40%). The results show that EPP tends to increase with the number of loading cycles for all samples, but the rate of increase varies depending on the fine content. Notably, the sample with 20% fine content exhibits the highest EPP during mid-cycles, indicating significant interaction between sand and fine particles at this level. Regarding liquefaction resistance, the clean sand sample (FC = 0%) demonstrates the highest resistance, requiring the most loading cycles to reach liquefaction. However, as the fine content increases to 20%, the number of cycles needed for liquefaction decreases sharply, suggesting that even a small amount of fine content can significantly reduce liquefaction resistance. Interestingly, when the fine content exceeds 30%, the liquefaction resistance improves again, highlighting the complex relationship between fine content and soil behavior. These findings suggest that fine content plays a critical role in influencing the liquefaction potential of sandy soils.

**Keywords:** Liquefaction resistance; fine content; cyclic direct simple shear test; excess pore pressure; number of cycles.

## 1. GIỚI THIỆU

Hiện tượng hóa lỏng của đất là một hiện tượng trong đó đất, khi chịu tác động của lực động như động đất hoặc rung động mạnh, mất đi sức chịu lực và chuyển từ trạng thái rắn sang trạng thái gần như lỏng (Seed 1979; Idriss and Boulanger 2008). Điều này xảy ra chủ yếu trong đất bão hòa, đặc biệt là đất cát rời, khi sự gia tăng áp suất nước lỗ rỗng làm giảm áp lực hiệu quả giữa các hạt đất. Khi áp suất nước lỗ rỗng tăng đủ cao, các hạt đất không còn có thể chịu lực liên kết với nhau, dẫn đến mất ổn định

của đất và sự biến dạng mạnh mẽ của nền đất.

Hạt mịn không dính (những hạt có đường kính nhỏ hơn 0.075 mm), như silt (bùn), đóng một vai trò quan trọng trong việc ảnh hưởng đến khả năng hóa lỏng của đất cát. Những hạt này không có tính dẻo như hạt sét và có thể làm thay đổi đáng kể cơ chế hóa lỏng. Trong một số trường hợp, sự hiện diện của hạt mịn không dính với hàm lượng thấp có thể giúp tăng khả năng thoát nước lỗ rỗng, từ đó giảm nguy cơ hóa lỏng. Tuy nhiên, nếu hàm lượng hạt mịn vượt quá mức cho phép, khả năng tiêu thoát nước

sẽ bị hạn chế, dẫn đến sự gia tăng áp suất nước lỗ rỗng và làm tăng nguy cơ hóa lỏng.

Mối quan hệ giữa hạt mịn không dính và đất cát phụ thuộc vào hàm lượng hạt mịn, sự phân bố kích thước hạt và loại hạt. Khi hàm lượng hạt mịn thấp, chúng có thể lấp đầy các khoảng trống giữa các hạt cát, làm tăng độ chặt của đất và giảm nguy cơ hóa lỏng. Ngược lại, với hàm lượng hạt mịn cao, đất trở nên kém thấm hơn, dễ làm gia tăng áp suất nước lỗ rỗng dưới tải động. Các nghiên cứu trước đây đã cho thấy rằng không chỉ hàm lượng hạt mịn mà cả loại hạt và độ phân tán của chúng cũng ảnh hưởng đến cơ chế hóa lỏng, cho thấy tính phức tạp trong việc đánh giá tác động của hạt mịn không dính trong đất cát (Chien et al. 2002; Ghani and Kumari 2021; Tran et al. 2024).

Mục tiêu của bài báo là tóm tắt và phân tích các nghiên cứu trước đây trên thế giới liên quan đến tác động của hàm lượng hạt mịn không dính đến khả năng hóa lỏng của đất cát. Qua đó, bài báo cung cấp một cái nhìn toàn diện về vai trò của hạt mịn không dính trong khả năng chống hóa lỏng của đất cát.

Phần thứ hai của bài báo sẽ trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm của tác giả. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp thí nghiệm cắt đơn giản tuần hoàn - Cyclic Direct Simple Shear (CDSS) để đánh giá ảnh hưởng của FC, với tỷ lệ thay đổi từ 0% đến 40%, đến khả năng chống hóa lỏng của đất cát. Kết quả thí nghiệm sẽ được so sánh với các nghiên cứu trước đây để đưa ra những nhận định cụ thể về ảnh hưởng của FC trong hỗn hợp cát-hạt mịn (SaSi). Điều này sẽ giúp hiểu rõ hơn về cơ chế hóa lỏng của đất có chứa hạt mịn không dính và đóng góp vào việc phát triển các phương pháp thiết kế và xây dựng an toàn trên nền đất cát trộn hạt mịn.

## 2. TỔNG QUAN CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU TRƯỚC ĐÂY

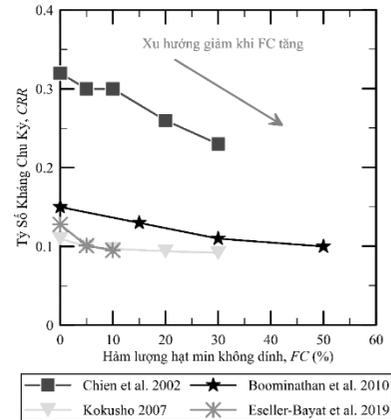
Khả năng hóa lỏng của SaSi đã thu hút sự quan tâm lớn trong các nghiên cứu địa kỹ thuật. Nhiều công trình nghiên cứu đã tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của FC đến ứng xử chu kỳ và khả năng chống hóa lỏng của SaSi. Tuy nhiên, kết quả từ các nghiên cứu này thường không đồng nhất, thể hiện sự phức tạp trong cơ chế hóa lỏng của đất chứa FC.

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng tác động của FC đến khả năng chống hóa lỏng của đất cát không tuân theo một xu hướng tuyến tính đơn giản. Trong một số trường hợp, khi FC tăng, khả năng chống hóa lỏng của đất giảm do giảm tính thấm và sự gia tăng áp suất nước lỗ rỗng (Throncoso and Verdugo 1985; Boominathan et al. 2010; Oka and Dewoolkar 2018). Tuy nhiên, ở một số mức độ nhất định của FC, các hạt mịn có thể lấp đầy các khoảng trống giữa các hạt cát, tăng độ chặt của đất và do đó cải thiện khả năng chống hóa lỏng (Shen et al. 1977; Amini and Qi 2000).

Ngoài ra, một số nghiên cứu khác đã chỉ ra rằng khả năng chống hóa lỏng của đất có thể tăng đến một ngưỡng giới hạn FC ( $FC_{th}$  thường từ 15% đến 40%), sau đó tiếp tục giảm khi FC tiếp tục tăng. Điều này cho thấy rằng khi hạt mịn không dính đạt một ngưỡng nhất định, chúng có thể cải thiện độ bền của đất, nhưng sau ngưỡng này, khả năng chống hóa lỏng lại giảm (Papadopoulou and Tika 2008; Wang and Wang 2010; Porcino and Diano 2017).

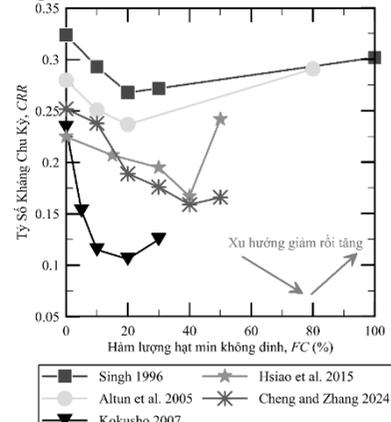
Các xu hướng chính về ảnh hưởng của FC đến khả năng chống hóa lỏng hay tỷ số kháng chu kỳ (cyclic resistance ratio - CRR) của SaSi có thể được tổng hợp như sau:

(i) Giảm khi FC tăng (Hình 1): Khả năng chống hóa lỏng giảm dần khi hàm lượng FC tăng lên, do sự giảm tính thấm và sự gia tăng áp suất nước lỗ rỗng (Chien et al. 2002; Kokusho 2007; Boominathan et al. 2010; Eseller-Bayat et al. 2019)



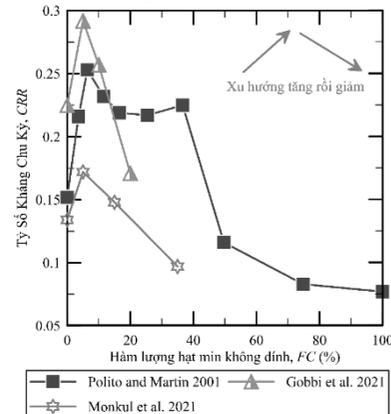
**Hình 1.** Xu hướng khả năng chống hóa lỏng giảm khi FC tăng

(ii) Giảm, đảo chiều, sau đó tiếp tục tăng sau một ngưỡng  $FC_{th}$  (Hình 2): Khi FC đạt ngưỡng từ 15% đến 40%, khả năng chống hóa lỏng có thể giảm, nhưng sau đó tiếp tục tăng nếu FC tăng thêm (Singh 1996; Altun et al. 2005; Kokusho 2007; Hsiao et al. 2015; Cheng and Zhang 2024).



**Hình 2.** Xu hướng khả năng chống hóa lỏng giảm, đảo chiều, sau đó tiếp tục tăng sau một ngưỡng  $FC_{th}$

(iii) Tăng, sau đó giảm với sự gia tăng thêm của FC (Hình 3): Khả năng chống hóa lỏng tăng khi FC đạt đến một ngưỡng nhất định, nhưng sẽ giảm nếu FC tiếp tục tăng (Polito and Martin 2001; Monkul et al. 2021; Gobbi et al. 2021).



**Hình 3.** Xu hướng khả năng chống hóa lỏng tăng, sau đó giảm với sự gia tăng thêm của FC

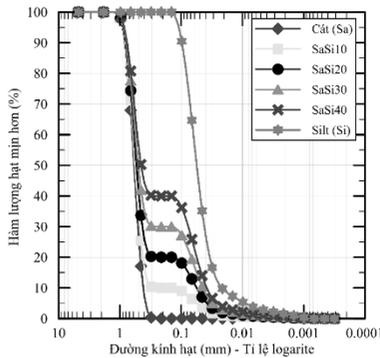
## 3. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA FC ĐẾN KHẢ NĂNG HÓA LỎNG CỦA HỖN HỢP CÁT-HẠT MỊN

### 3.1 Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

Cát Jumunjin được sử dụng làm vật liệu chính trong nghiên cứu này, cùng với hạt mịn sử dụng là cát Silica có đường kính bé hơn 0.075mm. Cát Jumunjin là loại cát không dính, với khối lượng riêng  $G_s$  là 2.648 và được phân loại là cát SP theo hệ thống phân loại đất USCS. Đường cong phân bố kích thước hạt của cát Jumunjin và hạt Silica được trình bày trong Hình 4.

Bảng 1. Thông số chi tiết của vật liệu sử dụng thí nghiệm

Loại	FC (%)	$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	$G_s$
Cát (Sa)	0	0.415	0.508	0.631	1.52	0.98	2.648
SaSi10	10	0.086	0.475	0.611	7.07	4.28	2.643
SaSi20	20	0.034	0.429	0.586	17.49	9.37	2.638
SaSi30	30	0.027	0.086	0.558	20.97	0.50	2.633
SaSi40	30	0.023	0.046	0.521	22.71	0.18	2.629
Silt (Si)	100	0.013	0.025	0.038	2.91	1.28	2.600



Hình 4. Đường cong cấp phối hạt của cát, hạt mịn, và các hỗn hợp với các giá trị FC = 10, 20, 30, và 40%

Hệ thống thí nghiệm CDSS ShearTrac-II do Geocomp Corporation sản xuất, thuộc dòng thiết bị phát triển bởi NGI được đặt tại phòng thí nghiệm Cơ đất trường ĐHQG Quốc gia Kyungpook. Hệ thống này được sử dụng rộng rãi để nghiên cứu ứng xử chu kỳ và khả năng chống hóa lỏng của đất cát (Park et al. 2023; Tran et al. 2024). Hệ thống bao gồm khung tải CDSS ShearTrac-II với hộp cắt, hai động cơ điều khiển tải ngang và dọc, cùng các cảm biến đo tải trọng và đo chuyển vị đứng và ngang. Mẫu CDSS có chiều cao 25 mm và đường kính 63.5 mm, được chuẩn bị bằng phương pháp rải khô kết hợp thử-sai. Mẫu cát rời được tạo ra bằng cách đổ cát khô vào màng cao su và điều chỉnh để đạt mật độ tương đối khoảng 40%. Quy trình và chương trình thí nghiệm chi tiết được trình bày trong Bảng 2.

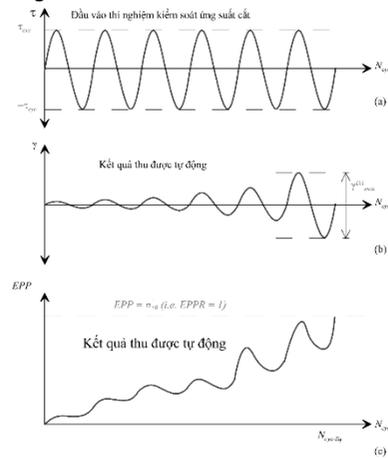
Trong quá trình chuẩn bị mẫu cát khô, mẫu đất được cố định bằng màng cao su và các vòng nhôm phủ Teflon, ngăn chặn chuyển động ngang của đất, đảm bảo quá trình cố kết theo điều kiện  $K_0$  với ứng suất có hiệu ban đầu  $\sigma'_{v0}$  là 100 kPa. Sau khi cố kết, lực cắt chu kỳ được áp dụng theo phương ngang để mô phỏng điều kiện ứng suất trong đất dưới tác động động đất. Trong giai đoạn này, thể tích của mẫu được duy trì không đổi để tái hiện trạng thái không thoát nước, và áp suất nước lỗ rỗng thặng dư (EPP) được xác định bằng sự thay đổi của ứng suất có hiệu.

Bảng 2. Thông số và kết quả thí nghiệm CDSS

IDs	$\sigma'_{v0}$ kPa	CSR	$\tau_{cyc}$ kPa	$N_{cyc-liq}$
Sa	100	0.08	8	197
SaSi10	100	0.08	8	54
SaSi20	100	0.08	8	24
SaSi30	100	0.08	8	55
SaSi40	100	0.08	8	64

Hỗn hợp cát và hạt mịn được điều chỉnh với FC dao động từ 0% đến 40%, nhằm đánh giá ảnh hưởng của các tỷ lệ hạt mịn khác nhau đến tính chất của đất. Các thông số chi tiết về hỗn hợp được trình bày trong Bảng 1.

Trong thí nghiệm CDSS, giá trị ứng suất cắt chu kỳ cực đại  $\tau_{cyc}$  được duy trì cố định sau mỗi chu kỳ và tính toán dựa trên tỷ số ứng suất chu kỳ (CSR - Cyclic Stress Ratio). Hiện tượng hóa lỏng được xác định khi tỷ lệ áp suất nước lỗ rỗng thặng dư (EPPR) đạt 100% hoặc khi biến dạng cắt kép  $\gamma_{maxDA} \geq 7.5\%$  (Hình 5). Trong nghiên cứu này, hiện tượng hóa lỏng được coi là xảy ra khi một trong hai điều kiện này được đáp ứng.



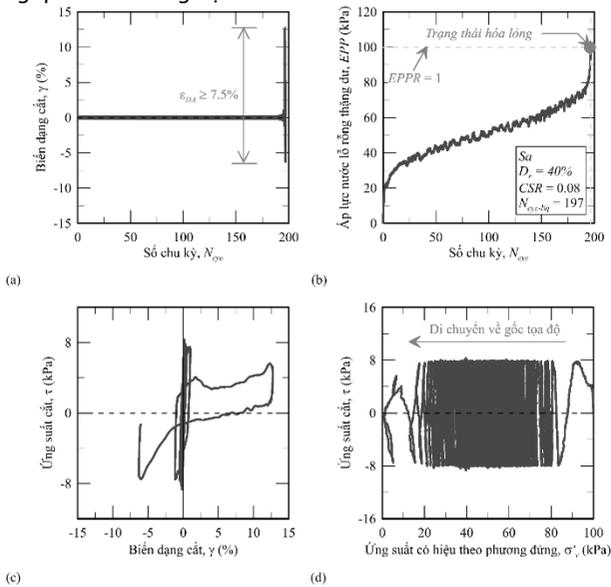
Hình 5. Biểu đồ tải trọng cắt đầu vào thí nghiệm (a), kết quả biến dạng cắt (b) và áp lực nước lỗ rỗng thặng dư (c) theo chu kỳ tải

### 3.2 Kết quả thí nghiệm

Mỗi mẫu đất với cùng FC đã được tiến hành thí nghiệm 3 lần bằng cách áp dụng cùng một giá trị  $\tau_{cyc}$ . Mục tiêu của các thí nghiệm này là xác định số lượng chu kỳ ( $N_{cyc-liq}$ ) cần thiết để mẫu đất đạt đến trạng thái hóa lỏng.

Kết quả chi tiết của quá trình thí nghiệm được trình bày trong Bảng 2, bao gồm các thông số IDs mẫu, ứng suất có hiệu tải thời điểm bắt đầu thí nghiệm cắt động, tỷ số ứng suất cắt chu kỳ, ứng suất cắt chu kỳ cực đại và số chu kỳ hóa lỏng trung bình cần thiết để mẫu đất đạt trạng thái hóa lỏng.

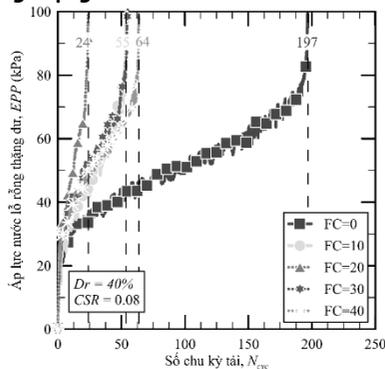
Ứng xử của mẫu đất Sa trong điều kiện tải trọng động được thể hiện trong Hình 6. Trong đó thể hiện mối quan hệ giữa biến dạng cắt theo chu kỳ tải (Hình 6a). Với chu kỳ tải nhỏ, biến dạng cắt sinh ra nhỏ, tuy nhiên khi số chu kỳ tăng lên biến dạng cắt trong mẫu sinh ra từ từ và tăng đột ngột khi mẫu gần đạt trạng thái hóa lỏng, và vượt quá giới hạn cho phép khi mẫu hóa lỏng tải  $N_{cyc-liq} = 197$ . Mối quan hệ giữa áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư (EPP) phát sinh theo chu kỳ (Hình 6b). Giá trị EPP tăng đột biến trong một vài chu kỳ đầu (đạt 20kPa chỉ sau vài chu kỳ) tuy nhiên, độ tăng của EPP giảm dần khi  $N_{cyc}$  tăng. Khi mẫu đất gần đạt trạng thái hóa lỏng thì EPP tăng đột biến và đạt 100 kPa sau  $N_{cyc-liq} = 197$ . Bên cạnh đó, Hình 6 còn thể hiện tương quan giữa ứng suất cắt và biến dạng cắt (Hình 6c) cũng như ứng suất cắt và ứng suất có hiệu theo phương đứng (Hình 6d) trong quá trình thí nghiệm.



**Hình 6.** Ứng xử của mẫu đất Sa khi chịu tải trọng cắt động có  $CSR = 0.08$ , thể hiện mối tương quan giữa (a) số chu kỳ và biến dạng cắt, (b) áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư và số chu kỳ, (c) ứng suất cắt và biến dạng cắt, và (d) ứng suất cắt và ứng suất có hiệu theo phương đứng trong quá trình thí nghiệm

### 3.3 Thảo luận

#### 3.3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn đến sự hình thành áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư



**Hình 7.** Quá trình hình thành áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư theo số chu kỳ tải  
 Hình 7 mô tả sự hình thành áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư theo số chu kỳ tải của các mẫu đất có hàm lượng FC thay đổi từ 0% đến 40%. Nhìn chung, áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư có xu hướng tăng dần theo số lượng chu kỳ đối với tất cả các mẫu. Điều này phù hợp với thực tế khi số chu kỳ tăng, đất chịu biến dạng lớn hơn và dẫn đến sự phát triển EPP, và phù hợp với các kết quả nghiên cứu trước

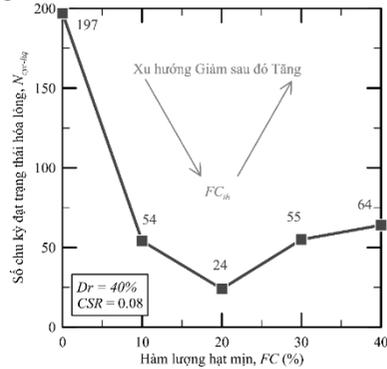
đây (Seed 1979; Monkul et al. 2021; Tran et al. 2024).

Cụ thể, ở các chu kỳ thấp ( $N_{cyc} < 10$ ), EPP của các mẫu bắt đầu ở mức khác nhau sau chu kỳ 1 nhưng có xu hướng tăng từ từ. Sau đó EPP tăng mạnh hơn ở cả chu kỳ trung bình và đến các chu kỳ cao, sự tăng trưởng EPP trở nên đột ngột và rõ ràng hơn.

Khi so sánh các mẫu theo FC, ta thấy rằng mẫu có  $FC = 20\%$  có giá trị EPP cao hơn so với các mẫu còn lại trong các chu kỳ từ 0 đến 24. Điều này có thể cho thấy rằng hàm lượng hạt mịn ở mức 20% tạo ra sự khác biệt đáng kể về áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư, có thể do sự gia tăng mật độ hoặc tương tác giữa các hạt cát - hạt mịn. Đối với các mẫu có  $FC = 10\%, 30\%$ , và  $40\%$ , có sự hình thành EPP gần như tương tự nhau. Trong khi đó, mẫu đất cát ( $FC = 0\%$ ) có EPP thấp hơn rõ rệt ở nhiều chu kỳ so với các mẫu có hàm lượng hạt mịn cao hơn. Đất với ít hạt mịn thường ít chịu tác động hơn từ sự thay đổi về nước lỗ rỗng vì khả năng thoát nước tốt hơn, giảm áp lực nước lỗ rỗng thẳng dư. Điều này dễ dàng nhận thấy, mẫu có  $FC = 0\%$  cần nhiều chu kỳ hơn để đạt trạng thái hóa lỏng.

#### 3.3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn đến khả năng chống hóa lỏng của hỗn hợp

Để nghiên cứu chi tiết hơn về ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn đến khả năng chống hóa lỏng của hỗn hợp, biểu đồ mối quan hệ giữa FC và số chu kỳ tải để mẫu đất đạt trạng thái hóa lỏng được trình bày trong Hình 8.



**Hình 8.** Ảnh hưởng của FC đến số chu kỳ đạt trạng thái hóa lỏng của mẫu đất

Từ biểu đồ, ta thấy rõ ràng có sự thay đổi đáng kể về số chu kỳ để đạt hóa lỏng tương ứng với từng FC. Mẫu đất không chứa hạt mịn (mẫu Sa) có số chu kỳ để đạt đến hóa lỏng cao nhất (197 chu kỳ). Điều này cho thấy đất cát sạch có khả năng chống hóa lỏng cao hơn so với đất có hạt mịn. Khi hàm lượng hạt mịn tăng lên 10%, số chu kỳ để đạt hóa lỏng giảm đáng kể, chỉ còn 54 chu kỳ. Điều này cho thấy rằng chỉ cần thêm một lượng nhỏ hạt mịn cũng có thể làm giảm đáng kể khả năng chống hóa lỏng của đất (giảm 72.6%). Đối với mẫu chứa 20% hạt mịn, số chu kỳ để đạt hóa lỏng tiếp tục giảm mạnh, chỉ còn 24 chu kỳ (giảm 87.8%). Đây là mức thấp nhất trong toàn bộ nghiên cứu, cho thấy hàm lượng hạt mịn này làm giảm đáng kể khả năng kháng hóa lỏng của đất. Tại hàm lượng hạt mịn đạt 30%, số chu kỳ để đạt hóa lỏng tăng trở lại lên 55. Mức tăng này cho thấy rằng khi hàm lượng hạt mịn tiếp tục tăng lên một ngưỡng nhất định, đất có thể trở nên ổn định hơn. Đối với hàm lượng hạt mịn 40%, số chu kỳ tiếp tục tăng lên 64, thể hiện xu hướng đất với hàm lượng hạt mịn cao hơn có khả năng kháng hóa lỏng tốt hơn so với khi chỉ có một lượng vừa phải hạt mịn.

Từ kết quả phân tích trên, ta thấy, khả năng chống hóa lỏng của đất phụ thuộc vào hàm lượng hạt mịn, với xu hướng khá phức tạp: ban đầu khi hạt mịn tăng lên từ 0% đến 20%, số chu kỳ hóa lỏng giảm mạnh, nhưng từ 20% trở lên, số chu kỳ lại tăng lên. Điều này phù hợp với một số nghiên cứu trước đây (Singh 1996; Altun et al. 2005; Kokusho 2007; Hsiao et al. 2015; Cheng and Zhang 2024). Điều

này có thể được giải thích rằng hạt mịn, khi đạt một ngưỡng nhất định (20%), bắt đầu ảnh hưởng tiêu cực đến khả năng chống lại sự phát triển áp lực nước lỗ rỗng, làm đất dễ hóa lỏng hơn. Tuy nhiên, khi FC tiếp tục tăng (từ 30% trở đi), có thể do sự thay đổi trong cấu trúc đất và các yếu tố về sự nén chặt, đất trở nên kháng hóa lỏng hơn (Thevanayagam 2007a; b).

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xem xét sự ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn không dẻo (FC) đến khả năng chống hóa lỏng của đất cát thông qua thí nghiệm cắt đơn giản tuần hoàn (CDSS). Kết quả thu được cho thấy mối quan hệ phức tạp giữa hàm lượng hạt mịn và sự phát triển áp lực nước lỗ rỗng thặng dư (EPP) cũng như khả năng chống hóa lỏng của đất cát pha hạt mịn.

Cụ thể, sự hình thành EPP có xu hướng tăng dần theo số chu kỳ tải đối với tất cả các mẫu đất, nhưng mức độ tăng trưởng phụ thuộc nhiều vào hàm lượng hạt mịn. Đặc biệt, mẫu có FC = 20% tạo ra giá trị EPP cao hơn đáng kể so với các mẫu khác ở các chu kỳ trung bình, cho thấy hàm lượng hạt mịn này có thể tạo ra tương tác đáng kể giữa hạt cát và hạt mịn, làm gia tăng áp lực nước lỗ rỗng.

Về khả năng chống hóa lỏng, mẫu đất sạch (FC=0%) có khả năng chống hóa lỏng tốt nhất, với số chu kỳ đạt hóa lỏng cao nhất. Khi hàm lượng hạt mịn tăng lên đến 20%, số chu kỳ để đạt hóa lỏng giảm mạnh, cho thấy chỉ cần một lượng nhỏ hạt mịn đã có thể làm giảm đáng kể khả năng chống hóa lỏng của đất. Tuy nhiên, khi hàm lượng hạt mịn tiếp tục tăng lên đến 30% và 40%, khả năng kháng hóa lỏng của đất lại được cải thiện, cho thấy sự ổn định có thể tăng lên khi hạt mịn đạt một ngưỡng nhất định.

Nhìn chung, kết quả nghiên cứu cho thấy hàm lượng hạt mịn có vai trò quan trọng trong việc ảnh hưởng đến tính chất hóa lỏng của đất cát. Hàm lượng hạt mịn từ 0% đến 20% làm giảm khả năng chống hóa lỏng của đất, trong khi hàm lượng cao hơn (trên 30%) có thể cải thiện sự kháng hóa lỏng do sự thay đổi trong cấu trúc và tính chất nén chặt của đất. Những kết quả này cung cấp cơ sở quan trọng cho các nghiên cứu tiếp theo về ứng dụng trong thiết kế nền móng và gia cố đất ở các khu vực có nguy cơ chịu ảnh hưởng của hiện tượng hóa lỏng đất.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Altun, S., A. B. Göktepe, and C. Akgüner. 2005. "Cyclic shear strength of silts and sands under cyclic loading." *Geotech. Spec. Publ.*, 1365–1375.

[2]. Amini, F., and G. Z. Qi. 2000. "Liquefaction testing of stratified silty sands." *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 126 (3): 208–217. ASCE. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:3\(208\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:3(208)).

[3]. Boominathan, A., K. Rangaswamy, and Rajagopal. 2010. "Effect of non-plastic fines on liquefaction resistance of Gujarat sand." *Int. J. Geotech. Eng.*, 4 (2): 241-253. Maney Publishing. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.02.241-253>.

[4]. Cheng, K., and Y. Zhang. 2024. "A Cyclic Resistance Ratio Model of Sand-Fines Mixtures Based on Cyclic Triaxial Test." *Geotech. Geol. Eng.*, 42 (2): 1021-1033. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02602-6>.

[5]. Chien, L.-K., Y.-N. Oh, and C.-H. Chang. 2002. "Effects of fines content on liquefaction strength and dynamic settlement of reclaimed soil." *Can. Geotech. J.*, 39 (1): 254–265. <https://doi.org/10.1139/t01-083>.

[6]. Eseller-Bayat, E. E., M. M. Monkul, Ö. Akin, and S. Yenigun. 2019. "The coupled influence of relative density, CSR, plasticity and content of fines on cyclic liquefaction resistance of sands." *J. Earthq. Eng.*, 23 (6): 909–929. Taylor & Francis.

[7]. Ghani, S., and S. Kumari. 2021. "Insight into the effect of fine content on liquefaction behavior of soil." *Geotech. Geol. Eng.*, 39: 1–12. Springer.

[8]. Gobbi, S., P. Reiffsteck, L. Lenti, M. P. S. d'Avila, and J. F. Semblat. 2021. "Liquefaction triggering in silty sands: effects of non-plastic fines and mixture-packing conditions." *Acta Geotech.*, 1. Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/s11440-](https://doi.org/10.1007/s11440-021-01262-1)

021-01262-1.

[8]. Hsiao, D. H., V. T. A. Phan, Y. T. Hsieh, and H. Y. Kuo. 2015. "Engineering behavior and correlated parameters from obtained results of sand-silt mixtures." *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 77: 137–151. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.05.005>.

[9]. Idriss, I. M., and R. W. Boulanger. 2008. *Soil liquefaction during earthquakes*. *Earthq. Eng. Res. Inst.*

[10]. Kokusho, T. 2007. "Liquefaction strengths of poorly-graded and well-graded granular soils investigated by lab tests." *Earthq. Geotech. Eng. 4th Int. Conf. Earthq. Geotech. Eng.-Invt. Lect.*, 159–184. Springer.

[11]. Monkul, M. M., S. B. Kendir, and Y. E. Tütüncü. 2021. "Combined effect of fines content and uniformity coefficient on cyclic liquefaction resistance of silty sands." *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 151 (September): 106999. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106999>.

[12]. Oka, L. G., and M. M. Dewoolkar. 2018. "Influence of Non-Plastic Fines on Laboratory Shear Wave Velocity Measurements and Cyclic Resistance." *Geotech. Spec. Publ.*, 309–320. American Society of Civil Engineers (ASCE).

[13]. Papadopoulou, A., and T. Tika. 2008. "The Effect of Fines on Critical State and Liquefaction Resistance Characteristics of Non-Plastic Silty Sands." *Soils Found.*, 48 (5): 713-725. <https://doi.org/10.3208/sandf.48.713>.

[14]. Park, S.-S., D.-K.-L. Tran, T.-N. Nguyen, S.-W. Woo, and H.-Y. Sung. 2023. "Effect of Loading Frequency on the Liquefaction Resistance of Poorly Graded Sand." *Adv. Geospatial Technol. Min. Earth Sci. Sel. Pap. 2nd Int. Conf. Geo-Spat. Technol. Earth Resour.* 2022, 95-104. Springer.

[15]. Polito, C. P., and J. R. Martin. 2001. "Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands." *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 127 (5): 408–415. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:5\(408\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:5(408)).

[16]. Porcino, D. D., and V. Diano. 2017. "The influence of non-plastic fines on pore water pressure generation and undrained shear strength of sand-silt mixtures." *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 101: 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.015>.

[17]. Seed, H. B. 1979. "Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes." *J. Geotech. Eng. Div.*, 105 (2): 201-255. American Society of Civil Engineers.

[18]. Shen, C. K., J. L. Vrymoed, and C. K. Uyeno. 1977. "The effect of fines on liquefaction of sands." *Proc 9th ICSMFE*, 381–385.

[19]. Singh, S. 1996. "Liquefaction characteristics of silts." *Geotech. Geol. Eng.*, 14 (1): 1-19. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/BF00431231>.

[20]. Thevanayagam, S. 2007a. "Intergrain contact density indices for granular mixtures: Framework." *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, 6 (2): 123–134. <https://doi.org/10.1007/s11803-007-0705-7>.

[21]. Thevanayagam, S. 2007b. "Intergrain contact density indices for granular mixtures: II: Liquefaction resistance." *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, 6 (2): 135-146. <https://doi.org/10.1007/s11803-007-0706-6>.

[22]. Throncoso, J. H., and R. Verdugo. 1985. "Silt content and dynamic behavior of tailing sands." *Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.* 11, 1311-1314.

[23]. Tran, D.-K.-L., S.-S. Park, T.-N. Nguyen, J.-H. Park, H.-Y. Sung, J.-H. Son, and K.-B. Hwang. 2024. "Effect of Non-Plastic Fines Content on the Pore Pressure Generation of Sand-Silt Mixture Under Strain-Controlled CDSS Test." *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 28 (1): 33-39. <https://doi.org/10.5000/EESK.2024.28.1.033>.

[24]. Wang, Y., and Y. Wang. 2010. "Study of effects of fines content on liquefaction properties of sand." *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 272-277.