

# Ảnh hưởng của phân tầng địa chất đến khả năng hóa lỏng của nền đất: Nghiên cứu thực nghiệm

## Effect of Geological Stratification on Soil Liquefaction Potential: A Laboratory Study

> TS TRẦN ĐÔNG KIỂM LAM<sup>1\*</sup>, PGS. TS NGUYỄN VĂN HIẾU<sup>2</sup>, THS NGUYỄN ĐỨC KHIÊM<sup>3</sup>, GS SUNG-SIK PARK<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Khoa Xây dựng, Trường ĐH Kiến trúc TP.HCM; \*Corresponding Author: Email: lam.trandongkiem@uah.edu.vn

<sup>2</sup>Khoa Xây dựng, Trường ĐH Kiến trúc TP.HCM; Email: hieukt@gmail.com

<sup>3</sup>Khoa Khoa học cơ bản, Trường ĐH Xây dựng Miền Tây; Email: ndkhiem@mtu.edu.vn

<sup>4</sup>Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường ĐH Quốc gia Kyungpook, Daegu, Hàn Quốc; Email: sungpark@knu.ac.kr

### TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của phân tầng địa chất đến khả năng hóa lỏng của nền đất thông qua thí nghiệm cắt đơn giản tuần hoàn (GDSS). Ba mô hình phân tầng đất được xem xét: (i) mẫu có hạt mịn phân bố đồng đều (G2), (ii) mẫu có hạt mịn tập trung ở lớp trên và lớp dưới (G3), và (iii) mẫu có hạt mịn tập trung ở lớp giữa (G4). Ngoài ra, nghiên cứu cũng phân tích tác động của chiều dày lớp cát đến khả năng chống hóa lỏng. Các thí nghiệm được thực hiện dưới điều kiện cố kết ban đầu 100 kPa, tỷ số ứng suất tuần hoàn (CSR) = 0,1, và tiêu chí hóa lỏng được xác định khi biến dạng cát biên độ kép đạt 7,5%. Kết quả cho thấy sự phân bố hạt mịn có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chống hóa lỏng. Cụ thể, mẫu G2 và G3 có số chu kỳ hóa lỏng trung bình tương đương nhau, cho thấy sự khác biệt trong cách phân bố hạt mịn không tác động rõ rệt trong trường hợp này. Trong khi đó, mẫu G4 có khả năng chống hóa lỏng cao hơn đáng kể do lớp cát trên và dưới đóng vai trò vùng chịu tải chính, giúp hạn chế sự phát triển nhanh chóng của áp lực nước lỗ rỗng. Ngoài ra, chiều dày lớp cát cũng ảnh hưởng quan trọng đến khả năng chống hóa lỏng, khi lớp cát dày hơn, số chu kỳ hóa lỏng tăng lên, cho thấy khả năng tiêu thoát áp lực nước lỗ rỗng tốt hơn, giúp nền đất ổn định hơn dưới tải trọng động. Mối quan hệ tuyến tính giữa số chu kỳ hóa lỏng và chiều dày lớp cát được thiết lập, cung cấp công cụ dự báo khả năng hóa lỏng của nền đất dựa trên đặc điểm phân tầng địa chất. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở thực nghiệm quan trọng trong việc đánh giá nguy cơ hóa lỏng của nền đất có cấu trúc phân tầng tự nhiên, đồng thời góp phần vào việc thiết kế móng và cải tạo nền đất tại các khu vực có nguy cơ động đất.

**Từ khóa:** Khả năng chống hóa lỏng; phân tầng địa chất; thí nghiệm cắt đơn giản tuần hoàn; áp lực nước lỗ rỗng thặng dư; tải trọng tuần hoàn.

### ABSTRACT

This study evaluates the effect of geological stratification on soil liquefaction potential through cyclic direct simple shear (GDSS) tests. Three different stratification models were considered: (i) a uniform distribution of fine particles (G2), (ii) fine particles concentrated in the upper and lower layers (G3), and (iii) fine particles concentrated in the middle layer (G4). Additionally, the study analyzed the impact of sand layer thickness on liquefaction resistance. The experiments were conducted under an initial consolidation stress of 100 kPa, with a cyclic stress ratio (CSR) of 0.1, and liquefaction was defined when the double-amplitude shear strain reached 7.5%. The results indicate that the distribution of fine particles significantly influences liquefaction resistance. Specifically, the liquefaction resistance of G2 and G3 samples was similar, suggesting that different distributions of fine particles had no significant effect in these cases. In contrast, the G4 sample exhibited significantly higher liquefaction resistance, as the upper and lower sand layers acted as load-bearing zones, limiting the rapid development of excess pore water pressure. Furthermore, sand layer thickness played a crucial role in liquefaction resistance, with thicker sand layers increasing the number of cycles required for liquefaction. This indicates improved drainage capacity and greater soil stability under cyclic loading. A linear relationship between the number of liquefaction cycles and sand layer thickness was established, providing a predictive tool for assessing liquefaction potential based on geological stratification characteristics. The findings of this study offer valuable experimental insights for evaluating liquefaction risks in naturally stratified soils and contribute to foundation design and soil improvement strategies in earthquake-prone areas.

**Keywords:** liquefaction resistance; geological stratification; cyclic direct simple shear test; excess pore water pressure; cyclic loading.

## 1. GIỚI THIỆU

Hóa lỏng đất là một vấn đề quan trọng trong địa kỹ thuật, đặc biệt trong các khu vực có nền đất yếu và chịu tải trọng động như động đất (Boulanger and Idriss 2004; Jakka et al. 2023). Hiện tượng này xảy ra khi đất mất khả năng chịu cắt do áp lực nước lỗ rỗng tăng lên, làm giảm ứng suất hiệu dụng. Điều này đặc biệt nghiêm trọng đối với các công trình xây dựng trên nền đất rời rạc, bão hòa nước như đất cát, đất bùn (Seed 1979; Idriss and Boulanger 2008). Tác động của hóa lỏng có thể dẫn đến những hậu quả nghiêm trọng như lún, trượt lở đất, và phá hủy công trình. Do đó, việc đánh giá và giảm thiểu rủi ro hóa lỏng đất là cần thiết để đảm bảo an toàn và ổn định cho các công trình xây dựng trong khu vực có nguy cơ động đất.

Các nghiên cứu về hóa lỏng đất của hỗn hợp cát - hạt mịn cho thấy một bức tranh phức tạp về ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn đến khả năng hóa lỏng của đất. Ảnh hưởng của hàm lượng hạt mịn không phải lúc nào cũng rõ ràng và có thể thay đổi tùy thuộc vào các yếu tố khác nhau. Một số nghiên cứu cho thấy mối quan hệ tỷ lệ nghịch, trong đó khả năng chống hóa lỏng giảm khi hàm lượng hạt mịn tăng (Chien et al. 2002; Kokusho 2007; Boominathan et al. 2010; Eseller-Bayat et al. 2019). Tuy nhiên, các nghiên cứu khác lại cho thấy mối quan hệ tỷ lệ thuận, nghĩa là khả năng chống hóa lỏng tăng khi hàm lượng hạt mịn tăng (Shen et al. 1977; Amini and Qi 2000). Một số nghiên cứu còn chỉ ra rằng mối quan hệ có thể thay đổi tùy thuộc vào hàm lượng hạt mịn. Ở hàm lượng hạt mịn thấp, mối quan hệ có thể là tỷ lệ nghịch, nhưng ở hàm lượng hạt mịn cao, mối quan hệ lại là tỷ lệ thuận hay theo chiều hướng ngược lại (Singh 1996; Altun et al. 2005; Kokusho 2007; Polito and Martin 2001; Hsiao et al. 2015; Monkul et al. 2021; Gobbi et al. 2021; Cheng and Zhang 2024).

Một hạn chế quan trọng của nhiều nghiên cứu trước đây là tập trung chủ yếu vào các hỗn hợp cát - hạt mịn đồng nhất, trong đó các hạt mịn và cát được trộn đều với nhau. Điều này có thể không phản ánh đúng điều kiện địa chất thực tế tại hiện trường, nơi mà đất có thể phân tầng hoặc có sự phân bố không đồng đều của các hạt mịn. Trong điều kiện tự nhiên, đất thường tồn tại dưới dạng cấu trúc phân tầng do quá trình trầm tích hoặc tái lắng đọng. Sự phân tầng này có thể làm thay đổi tính chất cơ học của đất, ảnh hưởng đến khả năng hóa lỏng, nhưng vẫn chưa có nhiều nghiên cứu thực nghiệm đánh giá đầy đủ cơ chế tác động của hiện tượng này (Park et al. 2024).

Phân tầng địa chất ảnh hưởng đến khả năng hóa lỏng của nền đất thông qua sự thay đổi tính thấm, độ cứng của các lớp đất và phân bố ứng suất trong đất. Khi một lớp đất có độ thấm cao, chẳng hạn như cát, nằm kẹp giữa các lớp đất có độ thấm thấp, như sét hoặc hạt mịn, áp lực nước lỗ rỗng có thể bị giữ lại trong các lớp đất mịn, làm gia tăng quá trình hóa lỏng. Ngược lại, khi hạt mịn tập trung ở lớp giữa, khả năng tiêu thoát áp lực nước lỗ rỗng bị hạn chế, dẫn đến sự tích tụ áp lực nước lớn hơn và làm tăng nguy cơ mất ổn định. Bên cạnh đó, sự khác biệt về độ cứng giữa các lớp đất có thể dẫn đến sự tập trung ứng suất tại các vùng yếu hơn, làm gia tăng nguy cơ hóa lỏng cục bộ. Điều này đặc biệt nguy hiểm khi nền đất chịu tác động của động đất, vì các sóng địa chấn có thể làm khuếch đại sự mất ổn định trong môi trường đất không đồng nhất.

Mặc dù ảnh hưởng của phân tầng địa chất đến hóa lỏng đã được quan sát qua các sự kiện động đất trong thực tế, các nghiên cứu thực nghiệm vẫn còn hạn chế. Phần lớn các thí nghiệm về hóa lỏng trong phòng thí nghiệm tập trung vào mẫu đất trộn đều, trong đó hạt mịn phân bố đồng nhất. Cách tiếp cận này giúp kiểm soát tốt các biến số thí nghiệm nhưng lại không phản ánh chính xác điều kiện thực tế của nền đất có cấu trúc phân tầng. Một số nghiên cứu trước đây (Amini and Sama 1999; Amini and Qi 2000; Yoshimine and

Koike 2005; Park et al. 2024) đã thực hiện thí nghiệm trên đất phân tầng, nhưng chưa đánh giá chi tiết về ảnh hưởng của số lớp phân tầng và vị trí lớp hạt mịn đến khả năng hóa lỏng. Gần đây, Xiu và các cộng sự (2019) đã chỉ ra rằng vị trí của lớp sét trong nền cát có ảnh hưởng đáng kể đến quá trình hóa lỏng, tuy nhiên nghiên cứu này chủ yếu dựa trên mô phỏng số thay vì thí nghiệm thực nghiệm.

Bên cạnh đó, các nghiên cứu hiện tại vẫn chưa đưa ra đánh giá hệ thống về ảnh hưởng của độ dày lớp đất đến cơ chế hóa lỏng. Câu hỏi quan trọng cần giải quyết là độ dày tối thiểu của lớp cát hoặc hạt mịn trong cấu trúc phân tầng có tác động như thế nào? Việc thiếu các nghiên cứu chi tiết về những yếu tố này làm cho việc dự đoán khả năng hóa lỏng trong điều kiện thực tế trở nên khó khăn hơn.

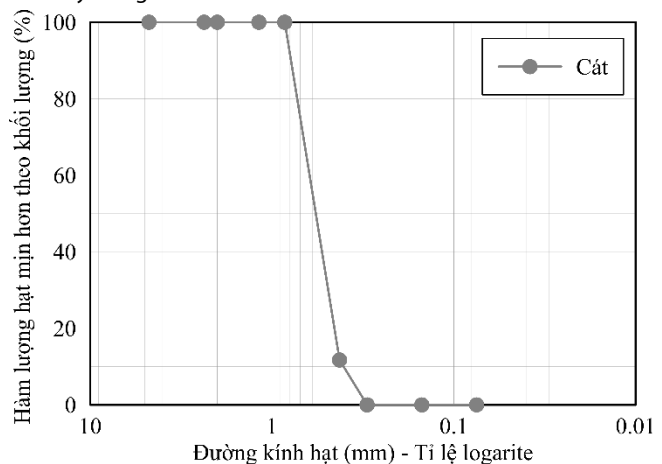
Trước những hạn chế nêu trên, nghiên cứu về khả năng hóa lỏng của đất trong điều kiện phân tầng địa chất thực tế là cần thiết. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của phân tầng địa chất đến khả năng hóa lỏng của nền đất thông qua các thí nghiệm CDSS (Cyclic Direct Simple Shear). Mục tiêu chính của nghiên cứu là phân tích sự khác biệt trong hành vi hóa lỏng giữa nền đất trộn đều và các nền đất có cấu trúc phân tầng khác nhau. Cụ thể, nghiên cứu xem xét hai kiểu phân tầng phổ biến: (i) mẫu đất có hạt mịn tập trung chủ yếu ở giữa lớp đất và (ii) mẫu đất có hạt cát tập trung chủ yếu ở giữa lớp đất. Các kết quả thí nghiệm sẽ được sử dụng để so sánh sự phát triển áp lực nước lỗ rỗng, số chu kỳ tải trọng cần thiết để hóa lỏng giữa các mẫu thử.

Bên cạnh đó, nghiên cứu còn tập trung phân tích ảnh hưởng của chiều dài lớp cát trung tâm trong cấu trúc phân tầng đến khả năng hóa lỏng của đất. Cấu trúc phân tầng với lớp cát trung tâm có thể làm thay đổi đáng kể cơ chế tiêu thoát áp lực nước lỗ rỗng và mức độ mất ổn định của nền đất. Do đó, một loạt các thí nghiệm CDSS sẽ được tiến hành trên các mẫu có chiều dài lớp cát trung tâm khác nhau để xác định xu hướng thay đổi số chu kỳ tải trọng cần thiết để hóa lỏng.

## 2. VẬT LIỆU VÀ CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

### 2.1 Vật liệu thí nghiệm

Vật liệu được sử dụng trong thử nghiệm bao gồm cát Jumunjin làm cát nền và cát silica cho các hạt mịn không dẻo. Cát Jumunjin có kích thước hạt từ 0,85 đến 0,3 mm, hệ số đồng nhất ( $C_u$ ) là 1,3, hệ số cong ( $C_c$ ) là 0,86, trọng lượng riêng là 2,65 và tỷ lệ lỗ rỗng tối thiểu và tối đa lần lượt là 0,57 và 0,90 (Bảng 1). Theo Hệ thống Phân loại Đất Thống nhất, cát Jumunjin được phân loại là SP, trong khi cát silica được phân loại là ML. Đường cong cấp phối hạt của cát được trình bày trong Hình 1.



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

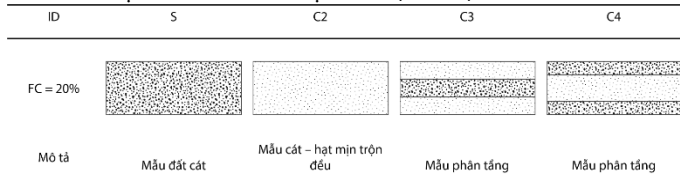
Loại	$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	$C_u$	$C_c$	$G_s$
Cát (S)	0.415	0.508	0.631	1.52	0.98	2.648
Hạt mịn (F)	0.013	0.025	0.038	2.91	1.28	2.600

**2.2 Phương pháp thí nghiệm**

Hệ thống CDSS (Cyclic Direct Simple Shear) được sử dụng trong thí nghiệm là loại Norwegian Geotechnical Institute của Geocomp ShearTract-II Cyclic DSS System. Các mẫu thử nghiệm là các mẫu khô hình trụ có đường kính ban đầu 63,5 mm và chiều cao 25 mm, được chuẩn bị bằng kỹ thuật lắng đọng phễu khô, một phương pháp phổ biến để thử nghiệm hỗn hợp cát-bùn.

Các mẫu CDSS được sử dụng có hàm lượng hạt mịn (FC) bằng 20%.

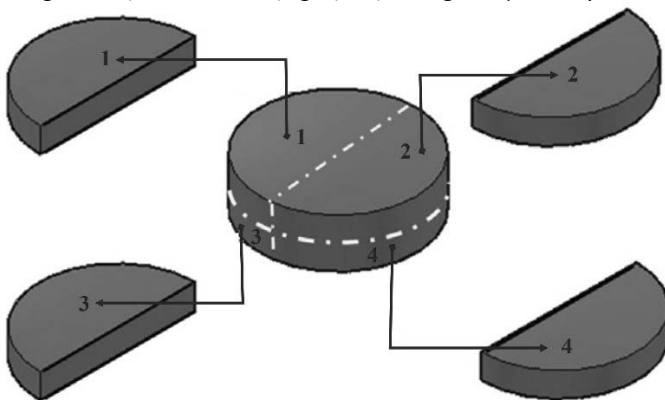
- Đối với bài toán khảo sát ảnh hưởng của các loại phân tầng, các mẫu được chia thành ba loại chính (Hình 2):



Hình 2. Cấu tạo phân bố các lớp đất trong các mẫu thí nghiệm

- Type C2: Các hạt mịn không dẻo được phân tán đều trong toàn bộ mẫu.
- Type C3: Các hạt mịn được phân bố đều chỉ ở lớp trên và lớp dưới của mẫu.
- Type C4: Các hạt mịn tập trung chủ yếu ở giữa mẫu, mỗi lớp có độ dày ban đầu là 8,3 mm.

Để xác minh độ đồng nhất của hạt mịn trong mẫu, nghiên cứu này áp dụng phương pháp được đề xuất bởi Monkul và cộng sự (2015). Theo đó, mỗi mẫu được chia thành bốn phần bằng cách chia đôi theo cả trục ngang và trục dọc (Hình 3). Sau đó, sàng lọc bốn phần này để xác định sự phân bố của các hạt mịn, từ đó đánh giá tính đồng nhất của bùn theo cả phương ngang và phương dọc trong mẫu dựa theo khối lượng hạt mịn trong bốn phần này.



Hình 3. Phương pháp xác định mức độ đồng nhất của mẫu

Đối với bài toán khảo sát ảnh hưởng của chiều dài lớp đất cát, các tác giả giữ nguyên cách phân bố hạt của mẫu C4 (hạt mịn tập trung ở giữa). Chiều dày lớp cát trên và dưới (hai lớp này chỉ chứa cát) được thay đổi với các giá trị khác nhau từ 6.25 mm, 5 mm, 4.2 mm, và 3.6 mm, so với chiều dài ban đầu là 8.3 mm (Hình 4).

Về điều kiện thử nghiệm, tất cả các mẫu hỗn hợp cát-hạt mịn được cố kết đến ứng suất pháp tuyến ban đầu ( $\sigma_n$ ) là 100 kPa và chịu tỷ số ứng suất tuần hoàn là 0,1 (CSR=0,1) với tần số 0,1 Hz. Quá trình

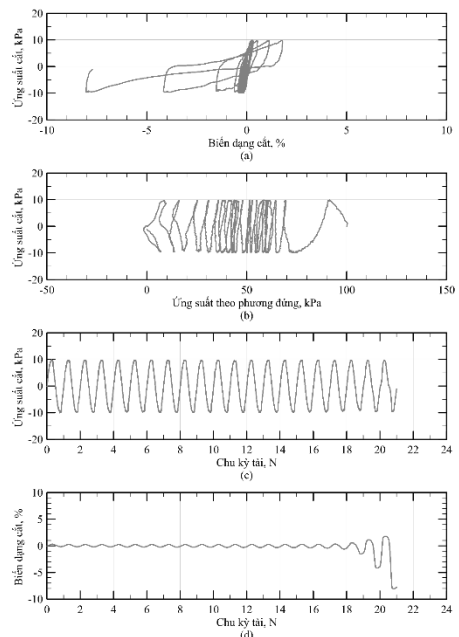
cố kết này giúp các mẫu đạt độ chặt tương đối gần 60%. Tiêu chí hóa lỏng được xác định khi biến dạng cắt biên độ kép đạt 7,5%. Số chu kỳ mẫu đất đạt trạng thái hóa lỏng được ký hiệu là  $N_{cyc-liq}$ .

Test ID	Mô tả cấu tạo phân lớp mẫu	h (mm)
C4a		6.25
C4b		5
C4c		4.2
C4d		3.6

Hình 4. Cấu tạo mẫu phân tầng C4

**3.2 Kết quả thí nghiệm**

Bảng 2 trình bày kết quả các trường hợp thí nghiệm, bên cạnh đó, Hình 5 mô tả ứng xử động của mẫu đất cát S khi chịu tải trọng động trong điều kiện thí nghiệm CDSS. Trong điều kiện tải trọng động, mẫu đất S thể hiện các đặc tính được mô tả chi tiết trong Hình 6, bao gồm mối quan hệ giữa biến dạng cắt và số chu kỳ tải, tương quan giữa ứng suất cắt và biến dạng cắt, và mối quan hệ giữa ứng suất cắt và ứng suất có hiệu theo phương đứng. Ban đầu, khi số chu kỳ tải còn nhỏ, biến dạng cắt phát sinh có biên độ thấp. Tuy nhiên, khi số chu kỳ tải tăng lên, biến dạng cắt tích lũy một cách từ từ, sau đó tăng đột ngột khi mẫu đất tiến gần đến trạng thái hóa lỏng. Khi mẫu đất hóa lỏng (tại  $N_{cyc-liq} = 21$ ), biến dạng cắt vượt quá giới hạn cho phép.



Hình 5. Ứng xử của mẫu đất Sa khi chịu tải trọng cắt động có CSR = 0,1, thể hiện mối tương quan giữa (a) ứng suất cắt và biến dạng cắt, (b) ứng suất cắt và ứng suất có hiệu theo phương đứng trong quá trình thí nghiệm, (c) áp lực nước lỗ rỗng thặng dư và số chu kỳ, và (d) số chu kỳ và biến dạng cắt.

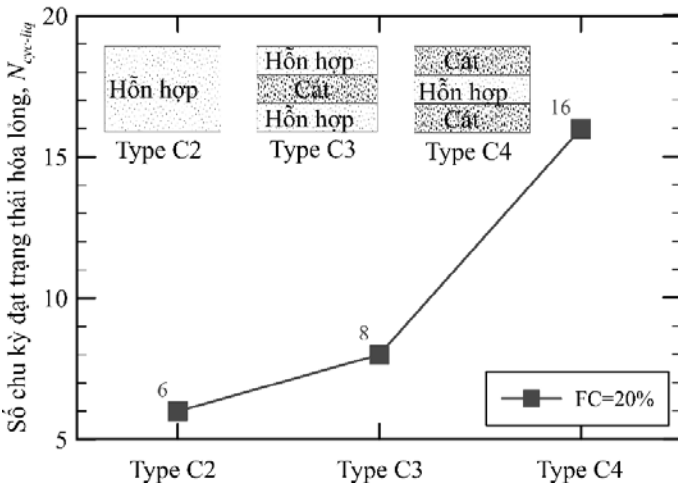
Bảng 2. Kết quả thí nghiệm CDSS

Test ID	FC (%)	Chiều cao lớp cát h (mm)	Số chu kỳ hóa lỏng trung bình, $N_{cyc-liq}$
S	0	25	21
C2	20	8.3	6
C3		8.3	8
C4		8.3	16
C4a		6.25	12
C4b		5	11
C4c		4.2	11
C4d		3.6	10

**3.3 Thảo luận**

**3.3.1. Ảnh hưởng của phân tầng địa chất đến khả năng chống hóa lỏng của hỗn hợp**

Hình 6 trình bày ảnh hưởng của loại mẫu (phân tầng địa chất) đến số chu kỳ đạt trạng thái hóa lỏng của mẫu đất. Kết quả cho thấy loại mẫu hay tổng quát hơn là điều kiện phân tầng địa chất có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chống hóa lỏng khi FC = 20%.



Hình 6. Ảnh hưởng của phân tầng địa chất (loại mẫu) đến số chu kỳ đạt trạng thái hóa lỏng

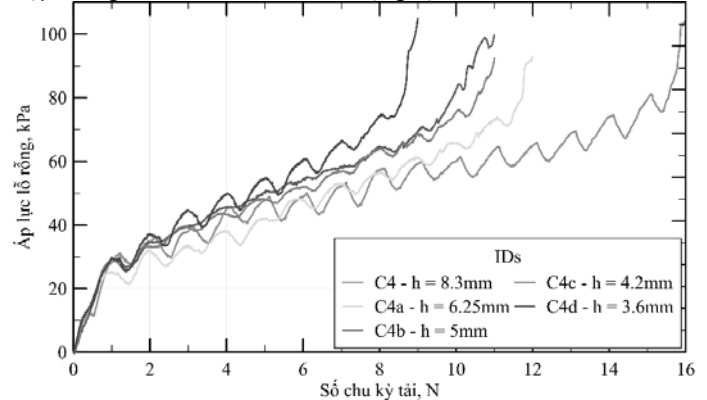
Đối với mẫu loại C2 (hỗn hợp cát và bùn phân bố đều) và C3 (bùn tập trung ở lớp trên và lớp dưới), số chu kỳ trung bình để hóa lỏng gần như là tương đương nhau ( $N_{cyc} = 6$  so với  $N_{cyc} = 8$ ). Điều này gợi ý rằng, ở FC = 20%, sự khác biệt trong cách phân bố chất mịn không gây ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chống hóa lỏng. Tuy nhiên, mẫu loại C4 (bùn tập trung ở lớp giữa) lại cho thấy khả năng chống hóa lỏng vượt trội hơn hẳn, với số chu kỳ trung bình để hóa lỏng là  $N_{cyc} = 16$ . Điều này cho thấy rằng, khi chất mịn được tập trung ở lớp giữa, khả năng chống hóa lỏng của mẫu tăng lên đáng kể so với các mẫu có chất mịn phân bố đều hoặc tập trung ở trên và dưới.

Sự khác biệt này có thể được giải thích bằng cường độ cao hơn của lớp cát ở trên và dưới trong mẫu loại C4. Trong thí nghiệm CDSS, lớp trên và lớp dưới đóng vai trò là vùng chịu tải. Do chỉ chứa cát, hai lớp này có cường độ cao hơn so với các mẫu C2 và C3, từ đó giúp tăng cường khả năng chống lại hóa lỏng.

**3.3.2. Ảnh hưởng của chiều dày lớp đất**

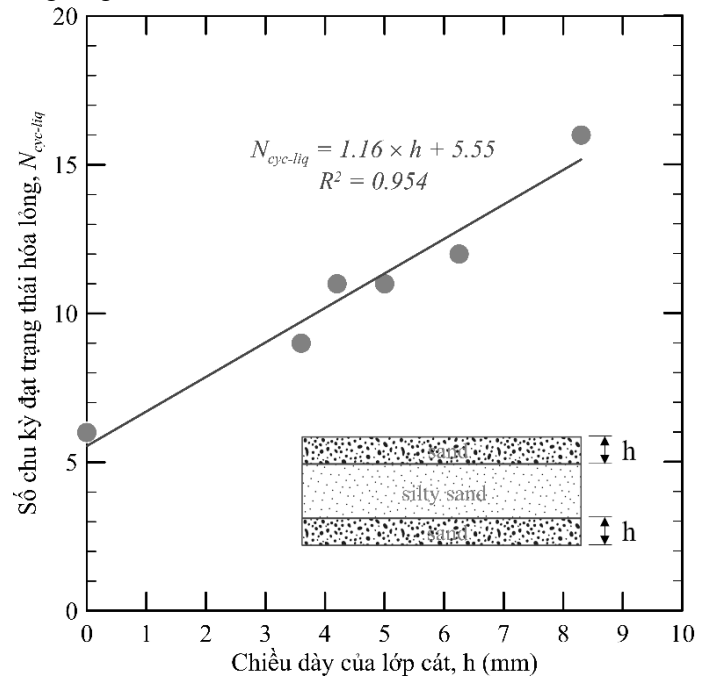
Hình 7 minh họa sự thay đổi của áp suất lỗ rỗng (PP) theo số lượng chu kỳ tải, ứng với các giá trị chiều dày lớp cát khác nhau. Dưới điều kiện ứng suất cắt không đổi, sự thay đổi độ dày của lớp cát dẫn đến sự thay đổi áp suất lỗ rỗng. Khi chiều dày lớp cát tăng lên, số lượng chu kỳ tải cần thiết để hóa lỏng mẫu cũng tăng lên. Điều này được thể hiện qua việc, với các lớp cát có độ dày lần lượt là 3.6 mm, 4.2 mm, 5 mm, 6.25 mm và 8.3 mm, số lượng chu kỳ tải cần thiết để

hóa lỏng mẫu tương ứng là 9, 11, 11, 12 và 161. Kết luận này phù hợp với nghiên cứu của Xiu và các cộng sự (2019).



Hình 7. Ảnh hưởng của phân tầng địa chất (loại mẫu) đến số chu kỳ đạt trạng thái hóa lỏng

Hình 9 thể hiện mối quan hệ giữa chiều dày của lớp cát trên và dưới (chỉ chứa cát) và số chu kỳ cần thiết để hóa lỏng. Khi chiều dày của lớp cát tăng từ 3.6 mm lên 8.3 mm,  $N_{cyc}$  tăng từ 9 lên 16. Điều này khẳng định rằng lớp cát càng dày thì khả năng chống hóa lỏng càng cao.



Hình 8. Ảnh hưởng của chiều dày lớp cát đến số chu kỳ đạt trạng thái hóa lỏng

Mối quan hệ tuyến tính tồn tại giữa số chu kỳ tải cần thiết để đạt được hóa lỏng và chiều dày của lớp cát. Điều này có nghĩa là sự gia tăng chiều dày lớp cát sẽ dẫn đến sự gia tăng tương ứng về số lượng chu kỳ tải mà mẫu có thể chịu được trước khi hóa lỏng.  $N_{cyc-liq}$  có thể được tính toán từ chiều dày của lớp cát theo công thức thực nghiệm.

$$N_{cyc-liq} = 1.135 \times h + 5.824$$

trong đó h là chiều dày của lớp trên và lớp dưới chỉ chứa các hạt cát. Công thức này cung cấp một phương tiện định lượng để ước tính khả năng chống hóa lỏng dựa trên đặc tính hình học của mẫu đất.

Tóm lại, phân tích Hình 7 và 8 cho thấy chiều dày của lớp cát đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm soát khả năng chống hóa lỏng của hỗn hợp cát-bùn. Lớp cát dày hơn giúp giảm sự tích tụ áp suất lỗ rỗng và tăng số lượng chu kỳ tải cần thiết để gây ra hóa lỏng.

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực hiện một loạt thí nghiệm cắt đơn giản tuần hoàn (CDSS) nhằm đánh giá ảnh hưởng của phân tầng địa chất đến khả năng hóa lỏng của nền đất. Các mẫu đất được chế tạo với ba kiểu phân tầng khác nhau: (i) mẫu có hạt mịn phân bố đều (C2), (ii) mẫu có hạt mịn tập trung ở lớp trên và dưới (C3), và (iii) mẫu có hạt mịn tập trung ở lớp giữa (C4). Ngoài ra, nghiên cứu cũng xem xét ảnh hưởng của chiều dày lớp cát trong mẫu phân tầng đến khả năng chống hóa lỏng. Tất cả các thí nghiệm được thực hiện dưới điều kiện cố kết ban đầu 100 kPa và chịu tải trọng động với tỷ số ứng suất tuần hoàn (CSR) = 0,1. Tiêu chí hóa lỏng được xác định khi biến dạng cắt biên độ kép đạt 7,5%. Các kết quả thu được cho thấy rằng sự phân bố hạt mịn trong mẫu đất có tác động đáng kể đến khả năng chống hóa lỏng. Cụ thể:

i. Mẫu đất có hạt mịn phân bố đồng đều (C2) và mẫu có hạt mịn tập trung ở lớp trên và lớp dưới (C3) có số chu kỳ hóa lỏng trung bình tương đương nhau, cho thấy sự khác biệt trong cách phân bố hạt mịn không ảnh hưởng rõ rệt trong trường hợp này.

ii. Mẫu có hạt mịn tập trung ở lớp giữa (C4) thể hiện khả năng chống hóa lỏng cao hơn đáng kể, với số chu kỳ hóa lỏng cao hơn so với các mẫu khác. Điều này có thể được giải thích do lớp cát trên và dưới đóng vai trò làm vùng chịu tải chính, giúp hạn chế sự phát triển nhanh chóng của áp lực nước lỗ rỗng.

iii. Chiều dày lớp cát trong mẫu phân tầng cũng ảnh hưởng đến khả năng chống hóa lỏng. Khi lớp cát có chiều dày lớn hơn, số chu kỳ hóa lỏng tăng lên, cho thấy khả năng tiêu thoát áp lực nước lỗ rỗng tốt hơn và giúp nền đất ổn định hơn dưới tải trọng động.

iv. Mối quan hệ tuyến tính giữa số chu kỳ hóa lỏng và chiều dày lớp cát được thiết lập, giúp dự đoán được khả năng hóa lỏng của nền đất dựa trên đặc điểm phân tầng địa chất.

Những phát hiện trong nghiên cứu này cung cấp cơ sở thực nghiệm quan trọng để đánh giá nguy cơ hóa lỏng của nền đất trong điều kiện phân tầng địa chất tự nhiên.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

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

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)).

Amini, F., and K. M. Sama. 1999. "Behavior of stratified sand-silt-gravel composites under seismic liquefaction conditions." *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 18 (6): 445-455. Elsevier Science Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(99\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(99)00011-1).

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>.

Boulanger, R., and I. Idriss. 2004. "Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays." *Neurosci. Lett.*, 339 (December): 123-126.

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>.

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>.

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.

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/s11440-021-01262-1>.

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>.

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

Jakka, R. S., Y. Singh, T. G. Sitharam, and B. K. Maheshwari (Eds.). 2023. *Earthquake Engineering and Disaster Mitigation: Contributions in the Honour of Late Professor D. K. Paul*. Springer Tracts in Civil Engineering. Singapore: Springer Nature Singapore.

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.-Invit. Lect.*, 159-184. Springer.

Monkul, M. M., C. Gültekin, M. Gülver, Ö. Akin, and E. Eseller-Bayat. 2015. "Estimation of liquefaction potential from dry and saturated sandy soils under drained constant volume cyclic simple shear loading." *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 75: 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.03.019>.

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>.

Park, S.-S., S.-W. Woo, T.-N. Nguyen, and D.-K.-L. Tran. 2024. "Effect of silt uniformity on the liquefaction resistance of sand-silt mixtures." *Soils Found.*, 64 (5): 101507. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101507>.

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)).

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.

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

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

Xiu, Z. G., S. H. Wang, C. Li, and F. L. Wang. 2019. "Triaxial Liquefaction Test of Saturated Stratified Sand." *Dongbei Daxue Xuebao/Journal Northeast. Univ.*, 40 (9): 1350-1354. Northeastern University. <https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2019.09.023>.

Yoshimine, M., and R. Koike. 2005. "Liquefaction of clean sand with stratified structure due to segregation of particle size." *Soils Found.*, 45 (4): 89-98. Japanese Geotechnical Society. [https://doi.org/10.3208/sandf.45.4\\_89](https://doi.org/10.3208/sandf.45.4_89).