

Đánh giá khả năng hóa lỏng tĩnh của cát mịn khu vực ven biển Bắc Bộ

Evaluation of static liquefaction of fine sand in the Northern coastal area

> TS ĐẶNG QUANG HUY^{1*}, TS PHẠM VĂN HÙNG¹, TS ĐÀO HUY HOÀNG², TS TRƯƠNG CÔNG BẰNG²

¹Trường Đại học Mỏ-Địa chất Hà Nội

²Trường Đại học Xây dựng Miền Tây

*Email: dangquanghuy@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Hóa lỏng đất là một trong những thảm họa thiên nhiên gây ra hậu quả nặng nề cho các công trình của con người. Hóa lỏng thường được coi là hệ quả của các trận động đất, tuy vậy thực tế chỉ ra rằng thảm họa này xảy ra ngay cả trong các điều kiện bình thường (hóa lỏng tĩnh). Tại Việt Nam, do không nằm trong vành đai động đất cũng như các điều kiện về kinh tế nên vấn đề hóa lỏng chưa thực sự được quan tâm nghiên cứu trước đây. Trong bài báo này, nhóm tác giả thực hiện chuỗi thí nghiệm nén ba trục đơn với cát Hải An, Hải Phòng tại áp lực cố kết 50kPa và 100kPa. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng cát này có khả năng bị hóa lỏng tĩnh khi độ chặt nhỏ, khi độ chặt tăng lên đến 0.4, mẫu không còn bị hóa lỏng mà có xu hướng ứng xử nở ra.

Từ khóa: Hóa lỏng tĩnh; cát mịn; ứng suất đỉnh; biến dạng dọc trục; thí nghiệm nén ba trục.

ABSTRACT

Soil liquefaction is one of the natural disasters that causes serious effects for construction works. Liquefaction is often considered a consequence of earthquakes, however, this disaster occurs even under normal conditions (static liquefaction). In Vietnam, due to not being located in the earthquake belt as well as economic conditions, the issue of liquefaction has not really been studied. In this paper, the authors conducted a series of monotonic triaxial tests on Hai An (Hai Phong) sand at consolidation pressures of 50kPa and 100kPa. The experimental results showed that this sand is capable of static liquefaction at low density, when the density index increases to 0.4, the sample is no longer liquefied but tends to dilatancy behavior.

Keywords: Static liquefaction; fine sand; peak of deviator; axial strain; triaxial test.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hóa lỏng đất là một hiện tượng xảy ra khi đất chuyển từ trạng thái rắn sang trạng thái lỏng và mất đi khả năng chịu tải trọng, dẫn tới sự phá hủy trên diện rộng các công trình hạ tầng và dân dụng. Hiện tượng này thường được biết đến là một hệ quả đi kèm theo động đất, tuy vậy rất nhiều các thảm họa trong thực tế chỉ ra rằng hóa lỏng đất xảy ra ngay cả khi không có động đất và được các nhà nghiên cứu gọi là “hóa lỏng tĩnh”. Hiện tượng hóa lỏng đất được đề cập lần đầu tiên vào năm 1920 bởi tác giả Hazen [1], tuy nhiên, vấn đề này chỉ thực sự được nghiên cứu rộng rãi sau thảm họa động đất tại Nigata, Nhật Bản năm 1964 với công trình tiên phong của các tác giả như Lee và seed (1967) [2], Castro (1969) [3]. Tuy vậy, các thành tựu nghiên cứu đạt được chủ yếu liên quan đến hóa lỏng kèm theo động đất, các vấn đề hóa lỏng tĩnh vẫn còn nhiều vấn đề gây tranh cãi.

Tại Việt Nam, do ít chịu ảnh hưởng của động đất và nhiều yếu tố khách quan khác mà hóa lỏng đất chưa được đầu tư nghiên cứu rộng rãi. Hiện nay, với sự phát triển bùng nổ của kinh tế, nhiều công trình hạ tầng và dân dụng đang được xây dựng với các tiêu chuẩn ngày càng khắt khe, đòi hỏi độ an toàn cao hơn, đặc biệt là các công trình ven biển. Các công trình này thường được xây dựng trên nền đất được bồi lấp tự nhiên, hoặc san lấp bởi cát mịn vốn nhạy cảm với hóa lỏng. Khi sự cố xảy ra, hậu quả mà nó ảnh hưởng tới công trình là vô cùng nghiêm trọng do vậy đánh giá khả năng hóa lỏng của loại cát này trên các thí nghiệm thực nghiệm trong phòng, cũng như thí nghiệm hiện trường là vô cùng cần thiết. Trong bài báo này, nhóm tác giả đánh giá khả năng hóa lỏng tĩnh của cát mịn khai thác tại khu vực Hải An, Hải Phòng dựa vào các thí nghiệm nén ba trục trong phòng.

2. VẬT LIỆU VÀ CHƯƠNG TRÌNH THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu thí nghiệm

Vật liệu thí nghiệm là cát lấy ở mỏ cát Hải An, Hải Phòng một loại cát mịn, màu vàng nhạt được sử dụng rộng rãi để đắp nền đường, cũng như nền các công trình hạ tầng, công trình dân dụng khác. Để sử dụng cát này trong phòng thí nghiệm, nhóm tác giả tiến hành sàng lọc các hạt hữu cơ và các hạt sạn sỏi lớn lẫn trong đất, sau đó chọn lựa cỡ hạt nằm trong khoảng 80µm tới 400 µm để tiến hành thí nghiệm. Sau khi tiến hành sàng lọc kích thước hạt, ta thu được cỡ hạt trung bình (d₅₀) 0,21mm và hệ số đồng nhất 1,96. Độ rỗng lớn nhất và nhỏ nhất của cát tương ứng là 0,90 và 0,85 (Bảng 1). Thành phần hạt của cát được sàng lọc và thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 1. Đặc trưng của cát Hải An

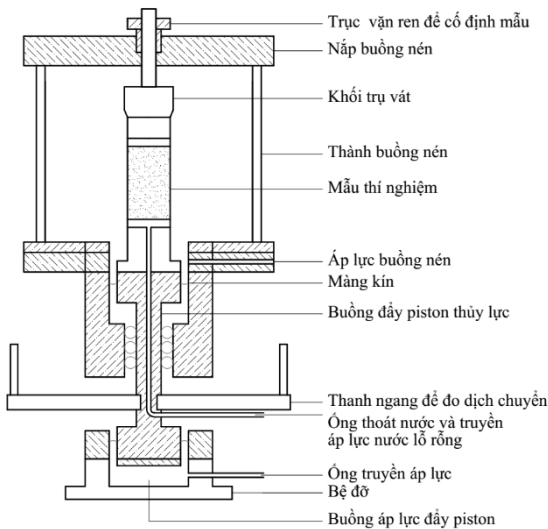
d_{50} (μm)	C_c	C_u	$e_{\max}$	$e_{\min}$
211	0,98	1,94	0,90	0,62

Bảng 2. Tỷ lệ thành phần hạt cát Hải An

Kích thước lỗ sàng (mm)	0.08	0.14	0.315	0.4
Lượng sót tích lũy trên sàng (%)	100	79	5	0

2.2. Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị sử dụng để tiến hành thí nghiệm là hệ thống máy nén ba trục cải tiến dạng Bishop và Wesley chế tạo bởi tập đoàn GDS (Hình 1). Thiết bị này cho phép tiến hành các thí nghiệm ba trục đơn điều hoặc thí nghiệm nén ba trục tuần hoàn với tần số thấp. Hệ thống thí nghiệm gồm một buồng nén hình trụ trong suốt chịu được áp lực nén tối đa 1500kPa, đặt trên một bộ kim loại với đế đặt mẫu đường kính 50mm nằm ở tâm. Để đặt mẫu này có lỗ nhỏ ở giữa để nước có thể đi vào mẫu thí nghiệm từ bên dưới, đồng thời nó được đặt trên pít tông thủy lực có thể di chuyển trong quá trình thí nghiệm. Bên trên mẫu thí nghiệm được gắn kín bằng nắp nhựa hình trụ, đường kính bằng đường kính mẫu và có lỗ nhỏ thông với ống nhỏ chịu được áp lực để nước có thể truyền vào mẫu từ bên trên. Bên dưới nắp của lồng nén có gắn một pít tông khác điều khiển tay bằng cách vận ren. Đầu của pít tông này có dạng khối cầu nhỏ hoặc khối trụ tùy theo mục đích thí nghiệm, khi di chuyển, đầu pít tông sẽ tiếp xúc với nắp nhựa hình trụ đặt trên mẫu thí nghiệm và cố định cho mẫu trong quá trình thí nghiệm. Mặt khác, trong pít tông có đặt ten-xơ để đo lực tác động lên mẫu. Áp lực buồng, áp lực nước lỗ rỗng và pít tông thủy lực được điều khiển bởi ba xy lanh thủy lực GDS. Một xy lanh được nối với buồng nén để tạo áp lực buồng (Cell Pressure), một xy lanh được nối với bộ phận chuyển động dọc trục và một xy lanh được nối với mẫu thí nghiệm để kiểm soát áp lực nước lỗ rỗng (Pore pressure). Các bộ phận này được kết nối với máy tính qua bộ điều khiển trung tâm. Khi tiến hành thí nghiệm, các thông số được thiết lập và kiểm soát từ máy tính. Ngoài ra, còn có một số bộ phận phụ trợ khác như các dụng cụ để tạo mẫu, hệ thống để bão hòa mẫu.



Hình 1. Thiết bị nén ba trục dạng Bishop và Wesley

2.3. Các bước tiến hành thí nghiệm

Để tiến hành thí nghiệm, trước hết ta chuẩn bị mẫu thí nghiệm hình trụ với đường kính 50mm, chiều cao 100mm. Mẫu được chế tạo bởi phương pháp đầm ẩm, phương pháp này cho phép tạo mẫu với độ chặt tùy ý, từ những mẫu rất đặc đến những mẫu rất xốp, thậm

chí có thể tạo ra những mẫu có độ rỗng lớn hơn $e_{\max}$. Phương pháp đầm ẩm có nhược điểm là mẫu thí nghiệm không đồng nhất so với các phương pháp lắng cát trong nước hoặc phương pháp rót cát khô (Ishihara, 1993) [4]; Vaid, 1999) [5], tuy vậy, nhược điểm này có thể được giảm bớt nhờ kĩ thuật chia lớp khi đầm.

Để chuẩn bị mẫu, trước hết ta tính toán lượng cát cần thiết để chế tạo mẫu, tiếp đến, trộn đều cát với khoảng 5% nước tinh khiết rồi chia hỗn hợp thành 5 phần bằng nhau và lần lượt rót từng phần vào khuôn, san đều và đầm nhẹ bằng đầm nhựa đường kính 3,5cm đến khi đạt chiều dày 2cm. Chiều dày này là hợp lý để chế tạo mẫu được đồng nhất và nó đã được sử dụng bởi rất nhiều các nhà nghiên cứu khác (Benahmed, 2001) [6].

Sau khi tạo mẫu xong, khuôn được tháo ra, tiếp đến gắn kín lồng lên bộ máy, cố định mẫu và đổ đầy nước vào trong lồng. Trong bước này, để tránh cho mẫu bị biến dạng, ta có thể dùng bơm hút chân không tạo áp suất khoảng -20kPa trong mẫu. Khi lồng đầy nước, một áp suất khoảng 20kPa được thiết lập trong lồng (thông qua pít tông Cell pressure) để cố định mẫu, lúc ấy bơm hút chân không được gỡ ra và thay vào đó là ống truyền khí CO_2 đi qua mẫu. Khí CO_2 đi từ bên dưới mẫu lên bên trên rồi thoát ra ngoài trong vòng 30 phút sẽ đuổi toàn bộ không khí trong mẫu và thay thế bằng CO_2 , khí này tan tốt trong nước nên đảm bảo cho mẫu sẽ được bão hòa hoàn toàn. Kết thúc quá trình này, nước tinh khiết sẽ được truyền qua mẫu tương tự như CO_2 trong vòng 30 phút để thay thế toàn bộ khí trong mẫu. Có thể vẫn tồn tại một lượng nhỏ khí CO_2 còn sót lại trong mẫu thì sẽ tan hoàn toàn vào trong nước dưới một áp suất thích hợp, đảm bảo cho mẫu thí nghiệm bão hòa hoàn toàn. Kết thúc bước này, các dây dẫn ở 2 đầu mẫu thí nghiệm sẽ được kết nối với pít tông áp lực ngược để điều khiển và đo áp lực nước lỗ rỗng trong mẫu. Các bước tiếp theo sẽ được tiến hành thông qua phần mềm điều khiển GDS trong máy tính. Quá trình bão hòa, cố kết mẫu, tạo mẫu quá cố kết được tiến hành theo như hướng dẫn trong tiêu chuẩn của Pháp NF P 94-074 thông qua 4 bước cơ bản:

1. Bão hòa mẫu (saturation): Trong quá trình bão hòa mẫu, ta đặt vào buồng nén một áp suất bằng tổng 2/3 áp suất hữu hiệu khi cố kết cộng với áp suất lỗ rỗng trong mẫu với khoảng thời gian hợp lý. Khoảng thời gian này lớn hay nhỏ tùy thuộc vào mẫu, với những mẫu đặc, chắc thời gian này lớn và ngược lại. Với các mẫu trong thí nghiệm này, chỉ cần để thời gian bão hòa từ 180 phút trở lên là đảm bảo. Để đảm bảo khí có thể tan hoàn toàn vào trong nước, áp lực nước lỗ rỗng thường lấy nhỏ nhất là 200kPa, đất càng cứng thì áp lực nước lỗ rỗng này càng cao. Theo kinh nghiệm, ta thiết lập áp lực nước lỗ rỗng (hay áp lực ngược) bằng 400kPa để đảm bảo mẫu bão hòa hoàn toàn.

2. Kiểm tra độ bão hòa (B check): Chỉ số B hay còn gọi là hệ số Skempton thường được dùng để kiểm tra độ bão hòa của mẫu trong thí nghiệm nén ba trục. Chỉ số này được tính bởi tỷ số độ biến thiên áp lực nước lỗ rỗng với độ biến thiên áp lực trong buồng nén 3 trục. Để tìm được hệ số này ta khóa ống thoát nước trong mẫu đồng thời tăng áp lực buồng lên một lượng nhất định (trong chuỗi thí nghiệm này là tăng thêm 50kPa) và theo dõi ghi lại sự thay đổi của áp lực nước lỗ rỗng. Kết quả cho thấy trong tất cả các thí nghiệm, hệ số B đều lớn hơn 0,95, các mẫu coi như đã bão hòa.

3. Cố kết mẫu (Consolidation): Khi kết thúc quá trình kiểm tra độ bão hòa của mẫu, ta mở van nước lỗ rỗng và thiết lập quá trình cố kết mẫu. Trong giai đoạn này, áp lực buồng nén được tăng lên đến khi đạt ứng suất hữu hiệu trong mẫu. Quá trình cố kết kết thúc khi lượng nước thoát ra khỏi mẫu nhỏ đến một giá trị không đổi và bằng 0. Trong chuỗi thí nghiệm này, quá trình cố kết kết thúc khi lượng nước thoát ra nhỏ hơn 5mm³ trong vòng 15 phút. Thời gian để hoàn thành quá trình cố kết tùy thuộc vào mẫu thí nghiệm, với

các mẫu sét, thời gian có thể lên tới hàng tuần, tuy nhiên với mẫu cát xốp như trong nghiên cứu này thì thời gian đó ngắn hơn rất nhiều, chỉ khoảng vài giờ đồng hồ.

4. Cắt mẫu hay nén mẫu: Quá trình cắt mẫu hay nén mẫu được tiến hành dưới dạng thí nghiệm nén ba trục cổ điển với vận tốc nén dọc trục là 1mm/phút. Trước khi quá trình nén mẫu bắt đầu, phải đảm bảo rằng pít tông trên nắp lồng nén đã tiếp xúc với mẫu bởi trong quá trình bão hòa, cổ kết kích thước của mẫu đã bị thay đổi và không còn tiếp xúc với nắp lồng nữa. Bằng cách quan sát và đo lại kích thước di chuyển của pít tông đến khi mẫu tiếp xúc với nắp, ta có thể biết được giá trị độ biến thiên thể tích của mẫu khi cổ kết. Tuy nhiên, thực tế cho thấy, mẫu hầu không thay đổi kích thước khi cổ kết.

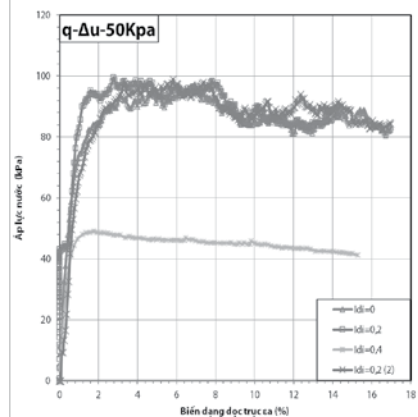
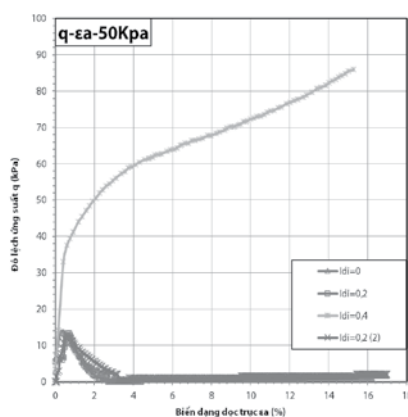
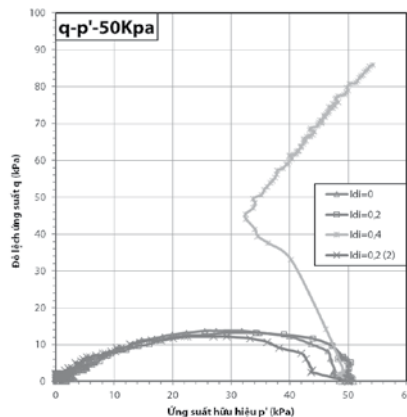
Sau khi kết thúc thí nghiệm, toàn bộ mẫu được đổ cẩn thận vào trong một bát kim loại để xác định độ ẩm của mẫu sau khi thí nghiệm. Vì mẫu đã bão hòa hoàn toàn, từ độ ẩm đó ta có thể xác định được độ rỗng của mẫu sau khi cổ kết.

2.4. Chương trình thí nghiệm

Nghiên cứu tiến hành chuỗi thí nghiệm với 2 áp lực cổ kết chính là 50kPa và 100kPa. Đây là các áp lực tương ứng với độ sâu đất nền khoảng 5-10m, vốn là tầng đất nền có nguy cơ bị hóa lỏng cao nhất khi có động đất xảy ra. Với mỗi áp lực cổ kết, nhóm tác giả thực hiện với 3 mẫu có độ chặt khác nhau, tương ứng là $Dr=0$; 0.2 và 0.4. Quá trình tiến hành thí nghiệm, chuẩn bị mẫu nén ba trục rất phức tạp, có nhiều công đoạn đòi hỏi tỉ mỉ, cẩn thận, kết quả nhận được rất dễ sai lệch nếu một trong các công đoạn thực hiện chưa đúng, do vậy để đảm bảo sự tin cậy, đồng thời cũng là một bước để kiểm tra máy móc, thiết bị nhóm tác giả đã thực hiện mẫu có độ chặt $Dr=0.2$ ở áp lực cổ kết 50kPa và các điều kiện khác tương tự hai lần. Chi tiết chương trình thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 3.

Bảng 3. Chương trình thí nghiệm.

STT	Áp lực cổ kết (kPa)	Độ chặt	Hệ số rỗng e	Hệ số rỗng lớn nhất (emax)	Hệ số rỗng nhỏ nhất (emin)
1	50	0	0.9	0.9	0.62
2	50	0.2	0.85	0.9	0.62
3	50	0.2	0.85	0.9	0.62
4	50	0.4	0.79	0.9	0.62
5	100	0	0.9	0.9	0.62
6	100	0.2	0.85	0.9	0.62
7	100	0.4	0.79	0.9	0.62



Hình 2. Ứng xử của cát Hải An ở áp lực cổ kết 50kPa với các độ chặt khác nhau

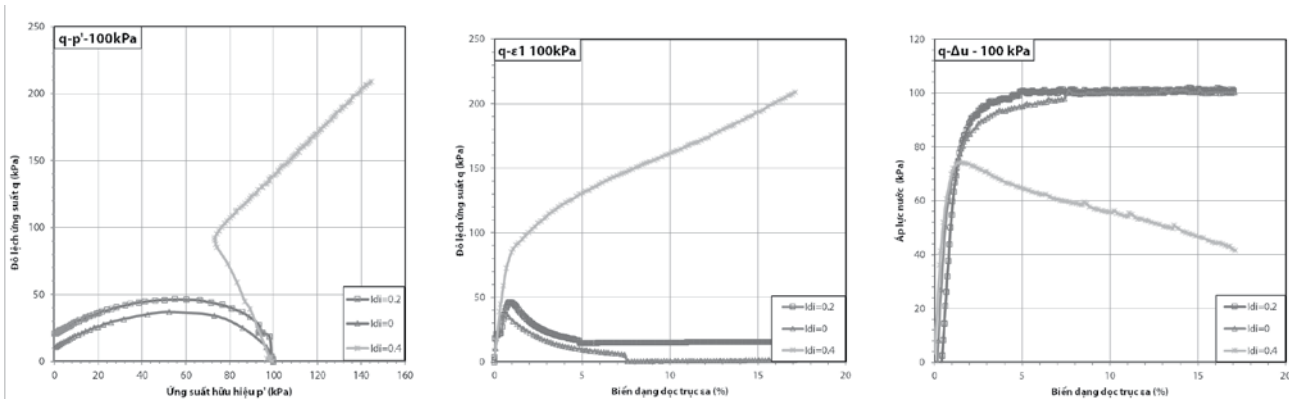
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá khả năng hóa lỏng tĩnh của cát ở áp lực cổ kết 50kPa các độ chặt khác nhau

Để đánh giá khả năng hóa lỏng của cát mịn, trước hết nhóm nghiên cứu đã tiến hành chuỗi thí nghiệm nén ba trục với các mẫu có độ rỗng khác nhau ở cùng một ứng suất hữu hiệu 50kPa. Ứng suất hữu hiệu này tương ứng với độ sâu mặt đất khoảng từ 3-5m, là độ sâu thường xảy ra hóa lỏng đất (Bray và nnk, 2004) [7]. Kết quả thí nghiệm cho thấy, với các mẫu có độ rỗng lớn tương ứng độ chặt tương đối ban đầu (Idi) nhỏ $Idi=0$ và $Idi=0.2$, mẫu bị hóa lỏng tĩnh hoàn toàn khi tiến hành thí nghiệm. Trong biểu đồ $q-p'$, sự hóa lỏng tĩnh được đặc trưng bởi đường cong biến thiên của độ lệch ứng suất. Khi mẫu bắt đầu bị nén, độ lệch ứng suất này tăng nhanh với ứng suất hữu hiệu trung bình gần như không thay đổi. Quá trình này diễn ra gần như tức thời, sau đó, ứng suất hữu hiệu giảm dần, độ lệch ứng suất vẫn tiếp tục tăng nhẹ đến khi đạt đỉnh thì cùng với ứng suất hữu hiệu giảm dần về 0. Khi ấy mẫu mất hoàn toàn khả năng chịu lực.

Trong biểu đồ $q-ea$, có thể nhận thấy độ lệch ứng suất của các mẫu bị hóa lỏng đạt giá trị lớn nhất khi biến dạng dọc trục còn rất nhỏ, khoảng 0,3%-0,5% (Hình 2b). Tiếp đó, độ lệch ứng suất giảm dần và đạt giá trị xấp xỉ bằng 0 khi biến dạng dọc trục của mẫu bằng khoảng 3%. Trong suốt quá trình đó, áp lực nước lỗ rỗng tăng liên tục, khi độ lệch ứng suất nhỏ nhất cũng là lúc độ biến thiên áp lực nước lỗ rỗng đạt giá trị lớn nhất chính bằng áp lực cổ kết của mẫu (Hình 1c). Chú ý rằng, trong chuỗi thí nghiệm này, mẫu có độ chặt tương đối ban đầu (Idi) bằng 0.2 được thực hiện 2 lần và mang lại kết quả tương đồng nhau, cho thấy sự tin cậy của kết quả thí nghiệm. Mặt khác, ta cũng có thể nhận thấy, ứng xử của hai thí nghiệm có độ chặt tương đối $Idi=0$ này và mẫu $Idi=0.2$ là tương đối trùng khớp với nhau, ứng suất đỉnh có sự sai lệch rất nhỏ. Điều này thể hiện với các mẫu rất lỏng, sự ứng xử của chúng có thể giống nhau.

Khi độ chặt của mẫu thí nghiệm tăng lên đến $Idi=0.4$, ứng xử của cát Hải An đã thay đổi từ hóa lỏng hoàn toàn sang xu hướng nở với sự biến mất của ứng suất đỉnh. Xu hướng nở còn dẫn đến độ lệch ứng suất và ứng suất hữu hiệu tăng lên, đồng thời sự biến thiên của áp lực nước lỗ rỗng sau khi tăng đến giá trị cực đại thì giảm xuống chứ không ổn định như ở các mẫu bị hóa lỏng hoàn toàn. Nói cách khác, khi độ chặt của mẫu tăng, khả năng hóa lỏng của mẫu giảm đi.



Hình 3. Ứng xử của cát Hải An ở áp lực cố kết 100kPa với các độ chặt khác nhau.

3.2. Đánh giá khả năng hóa lỏng tĩnh của cát ở áp lực cố kết 100kPa các độ chặt khác nhau

Trong chuỗi thí nghiệm thứ hai, nhóm tác giả đánh giá khả năng hóa lỏng tĩnh của cát tại áp lực cố kết 100kPa, áp lực này tương ứng với áp lực hữu hiệu của đất tại độ sâu khoảng 6-10m tùy thuộc vào mực nước ngầm. Nhìn chung, các kết quả nhận được không có sự sai khác nhiều so với chuỗi thí nghiệm tại áp lực cố kết 50kPa, các mẫu có độ chặt nhỏ $I_{di}=0$ và $I_{di}=0.2$ bị hóa lỏng hoàn toàn, mẫu có độ chặt $I_{di}=0.4$ thì có xu hướng nở ra khiến độ lệch ứng suất tăng lên trong quá trình cắt (Hình 3). Trong quá trình cắt, mẫu $I_{di}=0$ tăng độ lệch ứng suất từ 0 lên tới ứng suất đỉnh 38kPa khi biến dạng dọc trục khoảng 0.5%, sau đó độ lệch ứng suất giảm dần về 0, mẫu bị hóa lỏng hoàn toàn. Với mẫu $I_{di}=0.2$, biến thiên của độ lệch ứng suất cũng tương tự như với mẫu $I_{di}=0$, tuy nhiên ứng suất đỉnh của mẫu này lớn hơn đạt 49kPa. Mẫu $I_{di}=0.4$ không có xuất hiện ứng suất đỉnh, thay vào đó, độ lệch ứng suất tăng dần cùng lúc với ứng suất hữu hiệu trung bình giảm tới 76kPa trong thời gian đầu thực hiện cắt mẫu, sau đó, ứng suất hữu hiệu và ứng suất đỉnh tăng đồng thời với nhau và đạt giá trị ứng suất đỉnh hơn 200kPa tại thời điểm kết thúc quá trình nén mẫu khi biến dạng dọc trục đạt 16%. Về sự biến thiên áp lực nước lỗ rỗng, ta nhận thấy rằng trong khoảng thời gian đầu áp lực nước tăng rất nhanh, khi biến dạng dọc trục đạt 1%, áp lực nước lỗ rỗng đã thay đổi 80kPa, tương đương 80% áp lực cố kết. Sau đó, với các mẫu có độ rỗng lớn, áp lực nước tiếp tục tăng đến khi đạt 100% áp lực cố kết, mẫu bị hóa lỏng hoàn toàn. Với mẫu có độ rỗng nhỏ hơn thì ngược lại, sau khi áp lực nước tăng đạt đỉnh khoảng 78kPa thì giảm dần tới 40kPa khi kết thúc thí nghiệm.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo đã tập trung đánh giá khả năng hóa lỏng của cát được khai thác tại mỏ Hải An, Hải Phòng. Các kết quả thực nghiệm nén ba trục trong phòng tại các áp lực cố kết 50kPa và 100kPa cho thấy rằng cát Hải An có khả năng bị hóa lỏng. Với các mẫu ở trạng thái xốp $I_{di}=0$ và $I_{di}=0.2$ thì cát bị hóa lỏng hoàn toàn khi chịu tác dụng của tải trọng đơn, ứng suất đỉnh của mẫu có độ chặt lớn hơn thì lớn hơn, tuy nhiên sự sai khác này là không thực sự đáng kể. Khi độ chặt tăng lên ($I_{di}=0.4$) thì mẫu không bị hóa lỏng mà thể hiện trạng thái bị nở ra. Như vậy, có thể thấy mẫu càng đầm chặt thì càng có khả năng kháng hóa lỏng tốt hơn. Đặc điểm này là một gợi ý quan trọng để đề ra các biện pháp nâng cao khả năng kháng hóa lỏng của cát cũng như của đất nền trong tương lai.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin cảm ơn đề tài mã số B2022-MDA-04 của Bộ Giáo dục và đào tạo đã giúp đỡ hoàn thành bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Hazen (1920). Hydraulic fill dams. *ASCE transactions*, Vol. 83, pp. 1713-1745.
- [2] K. Ee, H.B. Seed (1967). Cyclic stress conditions causing liquefaction of sand. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 93., No. SM1, pp 47 - 70.
- [3] J. Castro (1969). Liquefaction of sands. Ph.D. Thesis, Harvard Soil Mechanics Series n°81, Harvard University, Cambridge, MA, 112 p.
- [4] K. Ishihara (1993). Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Geotechnique* 43, No. 4, pp. 349-415.
- [5] Y. Vaid, J. Thomas (1995). Liquefaction and post liquefaction behavior of sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 121., No. 2, pp. 163 – 173.
- [6] B. Nadia (2001). Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique : application aux phénomènes de liquéfaction et de mobilité cyclique. Ph.D. Thesis, Ecole Nationale des ponts et chaussées, 360 p.
- [7] D. Jonathan et al (2004), Subsurface Characterization at Ground Failure Sites in Adapazari, Turkey, *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 130(7): 673-685.