

Nghiên cứu những ứng xử cơ học của đất rời dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ theo phương thẳng đứng

Phạm Văn Hùng*, Vũ Minh Ngạn, Phạm Thị Nhân
Trường Đại học Mỏ - Địa chất

TÓM TẮT

Kết cấu chịu tác dụng của tải trọng chu kỳ do sự thay đổi cường độ tải trọng tác dụng theo thời gian. Khi có sự thay đổi của tải trọng theo thời gian đủ lớn, tác động của tải trọng chu kỳ lên kết cấu và nền đất không thể bị bỏ qua. Các nghiên cứu lý thuyết liên quan đến ứng xử của đất khi chịu tác dụng của tải trọng theo chu kỳ được xem xét nhằm mang lại một cái nhìn tổng quan sâu sắc về các ứng xử cơ học của đất khi chịu tác dụng của tải trọng chu kỳ. Bài báo phân tích và tổng hợp mối quan hệ giữa ứng suất biến dạng dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ. Hai tham số chính ảnh hưởng đến ứng xử của đất dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ gồm hệ số giảm chấn và độ cứng được chỉ ra. Các thông số địa kỹ thuật và vật lý ảnh hưởng sự suy giảm độ cứng và hệ số suy giảm được thảo luận. Ngoài ra, các thông số ảnh hưởng đến sự tích lũy biến dạng của đất rời bao gồm các thông số về tải trọng, chỉ tiêu cơ-lý của đất và trạng thái ứng suất được phân tích.

Từ khóa: ứng xử cơ học; đất rời; tích lũy biến dạng; tải trọng chu kỳ.

1. Đặt vấn đề

Thuật ngữ “tải trọng chu kỳ” được hiểu là tải trọng tác dụng đều đặn cả về cường độ và tần số. Theo cách khác, tải trọng chu kỳ có thể được xem là một hoạt động có tính tuần hoàn, tác dụng lên vật chất, có xu hướng làm thay đổi trạng thái ứng suất hoặc biến dạng theo thời gian.

Sự khác biệt giữa tải trọng tĩnh và tải trọng chu kỳ có thể xuất phát từ hiện tượng xung, dao động và sóng, được biểu diễn bởi tốc độ gia tải (tần số) và hiệu ứng lặp lại (một số vòng lặp và biên độ). Tác dụng lặp lại của tải trọng là một thuộc tính cơ bản của tải trọng chu kỳ, trong đó tải trọng tác dụng lặp lại nhiều lần với một tần số nhất định. Tốc độ của gia tải nhanh (một khoảng thời gian ngắn) được coi là một thuộc tính của tải trọng động, chẳng hạn như động đất, ép cọc và tải trọng giao thông. Trong các trận động đất, tải trọng lặp lại thông thường từ 10 đến 20 lần với cường độ khác nhau. Chúng có thể được lặp đi lặp lại từ 100 đến 1000 lần với tần số dao động từ 10 đến 60 Hz khi đóng cọc và ép rung (Ishihara, 1996).

Trong thực tế, hầu hết các kết cấu chịu tác dụng tải trọng chu kỳ do sự thay đổi cường độ tải trọng tác dụng theo thời gian, chẳng hạn như tải trọng gió, tải trọng giao thông hoặc do quá trình vận hành của máy móc, hoạt động sản xuất gây ra. Khi tải trọng biến thiên không đáng kể, tác dụng tải trọng chu kỳ lên kết cấu có thể bị bỏ qua, xem như tải trọng tĩnh. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp, tốc độ biến thiên tải trọng lớn, ảnh hưởng của tải trọng chu kỳ không thể bỏ qua, đặc biệt là tải trọng trên các công trình ngoài khơi, tải trọng gió trên các công trình có độ mảnh lớn (đền hải đăng, công trình dầu khí, cầu trên biển, tua bin gió...); tải trọng giao thông trên đường ô tô hay đường sắt và rung động trên nền móng máy. Tải trọng chu kỳ lên các bộ phận kết cấu, dẫn đến tải trọng chu kỳ truyền xuống móng và nền.

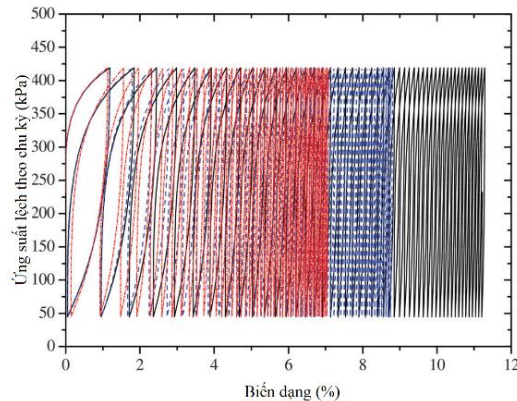
Để giải quyết các vấn đề nêu trên, các kỹ sư phải đưa ra giải pháp phân tích an toàn, hiệu quả và tiết kiệm. Các phân tích tĩnh thường phù hợp với các trường hợp có tốc độ gia tải chậm (Ishihara, 1996). Khi sự thay đổi đáng kể về cường độ ứng suất hoặc biến dạng và tần số, thì ảnh hưởng của tải trọng chu kỳ không thể bị bỏ qua, các phân tích tĩnh định sẽ đưa ra kết quả thiếu chính xác, dẫn đến không an toàn và không hiệu quả. Do đó, trong các thiết kế địa kỹ thuật, việc xem xét các tác động tải trọng chu kỳ và ảnh hưởng của nó đóng một vai trò cực kỳ quan trọng, trong đó ứng xử của đất dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ phải được coi là gốc rễ của vấn đề.

* Tác giả liên hệ
Email: phamvanhung@humg.edu.vn

2. Những ứng xử cơ học của đất rời dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ

2.1. Quan hệ ứng suất - biến dạng

Tương tự với điều kiện tải trọng tĩnh, các mô hình lý thuyết được đề xuất cho ứng xử của đất khi chịu tải trọng chu kỳ cũng dựa trên sự phù hợp giữa kết quả mô hình số và dữ liệu thực nghiệm của đường cong ứng suất – biến dạng. Mỗi quan hệ ứng suất – biến dạng của đất biểu diễn hai giai đoạn khác nhau trong hình 1. Giai đoạn đường cong gia tải trong đó trạng thái giá trị biến dạng lớn hơn giá trị trước đó. Giai đoạn này được mô tả thông qua *đường cong nền* (backbone curve). Ngoài ra, khi biến dạng có giá trị nhỏ hơn giá trị tối đa trước đó, được gọi là giai đoạn đường cong dỡ tải và gia tải, trong đó việc dỡ tải và gia tải tương ứng với sự giảm và tăng biến dạng theo thời gian. Chu trình kín dỡ tải và gia tải thường được gọi là một *chu kỳ tải trọng* (hysteresis loop). Các chu kỳ tải trọng được thiết lập trong không gian ứng suất - biến dạng (hình 1).



Hình 1. Quan hệ ứng suất – biến dạng của đất dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ (Chen và nnk, 2015).

Biên độ biến dạng cắt rất quan trọng đối với ứng xử của đất dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ (Habib và nnk, 2010), cụ thể :

- Khi biên độ biến dạng cắt của đất nhỏ ($< 10^{-4}$), biến dạng của đất hoàn toàn đàn hồi và có thể phục hồi hoàn toàn. Mô đun cắt là một tham số chính.

- Khi biên độ biến dạng cắt có giá trị trung bình ($10^{-4} \div 10^{-2}$), ứng xử của đất được xem là đàn-dẻo và hình thành biến dạng không thể phục hồi. Mô đun cắt có xu hướng giảm khi biên độ biến dạng cắt tăng, và sự tiêu tán năng lượng xảy ra trong quá trình tác dụng tải trọng chu kỳ. Năng lượng hấp thụ có thể được giải thích do đặc tính giảm chấn của đất. Hệ số giảm chấn và mô đun cắt là các hàm của biên độ biến dạng cắt và không phụ thuộc vào tải trọng chu kỳ.

- Khi biên độ biến dạng cắt lớn ($> 10^{-2}$), mô đun kháng cắt và hệ số giảm chấn phụ thuộc vào cả biên độ biến dạng cắt và tải trọng chu kỳ. Để xác định mối quan hệ ứng suất - biến dạng trong phạm vi biến dạng lớn, các phương pháp hiện tại đã xét sự ảnh hưởng của từng tham số riêng rẽ. Đường cong ứng suất-biến dạng được kết hợp với một vài quy luật toán học, cho phép diễn tả từng bước như bước gia tải lần đầu, dỡ tải và gia tải lại (Ishihara, 1996). Nhiều công trình đã nghiên cứu sự phụ thuộc của các thông số của tải trọng, tính chất vật lý của đất (ví dụ độ chặt tương đối ban đầu, phân bố kích thước hạt, chỉ số dẻo) và lịch sử ứng suất lên đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng theo tải trọng chu kỳ (Habib và nnk, 2010).

Từ đó nhận thấy rằng, hai tham số quan trọng trong mô tả ứng xử của đất chịu tải trọng chu kỳ là mô đun cắt và hệ số giảm chấn. Mô đun cắt đại diện cho độ cứng hữu hiệu của đất, hệ số giảm chấn biểu diễn sự tiêu tán năng lượng trong đất. Mô đun cắt và hệ số giảm chấn là hai tham số cơ bản để xây dựng đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng theo tải trọng chu kỳ (Habib và nnk, 2010).

2.2. Mô đun cắt và hệ số giảm chấn của đất

2.2.1. Mô đun cắt của đất

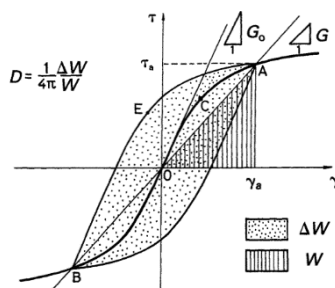
Mô đun cắt (G) là tỷ lệ ứng suất cắt (τ) với biến dạng cắt (γ), như phương trình 1 (Ishihara, 1996).

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (1)$$

Trong trường hợp các biến dạng cắt trung bình nhỏ do tải trọng chu kỳ, độ cứng của đất được mô tả phù hợp bởi mô đun cắt cát tuyến G_{sec} . Để thuận tiện, mô đun cắt cát tuyến được gọi là mô đun cắt.

2.2.2. Hệ số giảm chấn của đất

Trong mỗi chu kỳ tải trọng, sự mất mát năng lượng được thể hiện bằng đặc tính giảm chấn. Giá trị của nó được xác định bằng diện tích được bao quanh bởi một chu kỳ đỡ tải - gia tải, ΔW . Vì mất mát năng lượng là một hàm của biên độ biến dạng cắt, không phải là một thuộc tính của vật liệu, nên không dễ để đo đặc tính giảm chấn. Theo cách này, hệ số giảm chấn D được xác định bằng tỷ lệ tổn thất năng lượng (ΔW) trên mỗi chu kỳ với năng lượng đàn hồi lớn nhất được lưu trữ trong một đơn vị thể tích của cơ thể đàn-nhớt, W (Ishihara, 1996).



Hình 2. Biểu đồ xác định năng lượng đàn hồi lưu trữ và năng lượng tổn thất [1]
Theo Ishihara (1996), hệ số giảm chấn được xác định theo công thức 2.

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (2)$$

Trong hình 2, năng lượng tổn thất trong một chu kỳ ΔW (diện tích phần chấm) và năng lượng đàn hồi tối đa (diện tích phần gạch đứng) được xác định dựa vào ứng suất cắt (τ) và biến dạng cắt (γ):

$$\Delta W = \int \tau d\gamma \quad (3)$$

$$W = \frac{1}{2} \tau_a \gamma_a = \frac{1}{2} f(\gamma_a) \gamma_a \quad (4)$$

Trong đó, τ_a - biên độ của ứng suất cắt; γ_a - biên độ của biến dạng cắt.

3. Tích lũy biến dạng của đất rời do tác dụng của tải trọng chu kỳ và các thông số ảnh hưởng

3.1. Hiện tượng tích lũy biến dạng của đất rời

Khi đất chịu tác dụng lặp đi lại của tải trọng, với biên độ biến dạng cắt nhỏ, biến dạng của đất là hoàn toàn đàn hồi và có thể phục hồi. Với biên độ biến dạng cắt trung bình hoặc lớn, biến dạng của đất là không phục hồi hoàn toàn với mỗi chu kỳ gia tải và dỡ tải. Nghĩa là, biến dạng không thể phục hồi tăng khi số chu kỳ tải trọng tăng, hiện tượng này được gọi là hiện tượng tích lũy biến dạng. Dựa vào các kết quả thực nghiệm trong phòng, sự tích lũy biến dạng dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ có thể được giải thích là do cách sắp xếp lại các hạt, quá trình thoát nước lỗ rỗng và sự mài mòn của các hạt đất.

Về khía cạnh kỹ thuật xây dựng, tích lũy biến dạng do tải trọng chu kỳ dẫn đến sự gia tăng tổng độ lún và độ lún lệch. Công trình bị lún và nghiêng quá giới hạn, làm mất ổn định và mất an toàn khi sử dụng. Trong trường hợp đất bão hòa chịu tải trọng chu kỳ trong điều kiện nén không thoát nước (tải trọng tăng nhanh trong thời gian ngắn), áp lực nước lỗ rỗng tăng lên. Đặc biệt, khi áp lực lỗ rỗng bằng ứng suất tổng, (ứng suất hữu hiệu bằng không), nền hoạt động giống như một hệ thống treo. Hiện tượng này được gọi là đất hóa lỏng. Hiện tượng đất hóa lỏng làm tăng nguy cơ phá hủy và giảm khả năng làm việc của đất.

Sự tích lũy biến dạng của đất rời dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ do sự hình thành các vòng lặp không hoàn toàn khép kín. Nhìn chung, sự tích lũy biến dạng của đất phụ thuộc vào điều kiện tải trọng chu kỳ, các chỉ tiêu vật lý và trạng thái ứng suất. Các điều kiện tải trọng chu kỳ bao gồm số chu kỳ tải trọng, biên độ ứng suất/biến dạng và tần số. Nhóm các chỉ tiêu vật lý bao gồm độ chặt tương đối ban đầu (hoặc hệ số rỗng), chỉ số dẻo, hình dạng hạt, phân bố kích thước hạt và cấu trúc của đất. Trạng thái ứng suất xem xét ảnh hưởng của ứng suất hông hữu hiệu.

3.2. Ảnh hưởng của một số thông số đến sự tích lũy biến dạng của đất rời

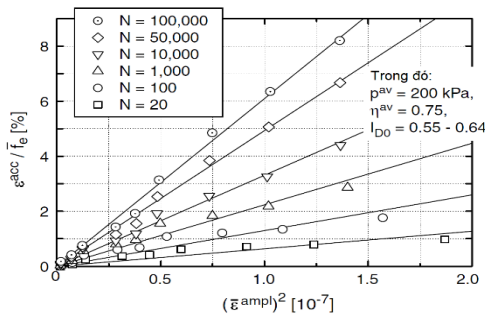
3.2.1. Ảnh hưởng của biên độ ứng suất/biến độ biến dạng

Trong khi các thí nghiệm cắt thuần túy theo chu kỳ thường thực hiện bằng cách thay đổi biên độ biến dạng cắt, thì các thí nghiệm cắt ba trục theo chu kỳ được thực hiện bằng cách thay đổi cường độ ứng suất cắt. Youd (1973) đã thấy rằng sự gia tăng đáng kể của tốc độ tích lũy biến dạng khi tăng biên độ biến dạng cắt. Trong khi, không có sự tích lũy biến dạng khi biên độ biến dạng nhỏ hơn 10^{-4} . Silver và Seed (1971a) thí nghiệm thay đổi biên độ biến dạng cắt và kết quả thu được của tương đồng với thí nghiệm của Youd (1973). Thí nghiệm thay đổi biên độ biến dạng cắt trên các mẫu cát, Sawicki và Swidzinski (1987,

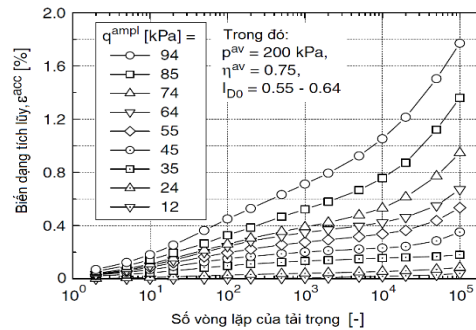
1989) đã xây dựng được mối quan hệ giữa tích lũy biến dạng, ε^{acc} , với số chu kỳ, $\tilde{N} = N(\gamma^{ampl} / 2)^2$. Từ các thí nghiệm nén ba trục, Wichtmann và nnk, (2005) thấy rằng tích lũy biến dạng tăng tỷ lệ thuận với bình phương biên độ biến dạng (hình 3). Ngoài ra, xuất phát từ đường cong quan hệ giữa tích lũy biến dạng so với logarit của số chu kỳ tải trọng (N), tác giả thấy rằng tích lũy biến dạng tăng tuyến tính với logarit (N) lên tới $N = 10.000$, và sau đó tăng nhanh hơn (hình 4). Dựa trên phân tích các nghiên cứu trước đây, dễ dàng để nhận thấy khi biên độ ứng suất/biến dạng càng lớn thì tốc độ tích lũy biến dạng càng nhanh.

3.2.2. Ảnh hưởng của số chu kỳ tải trọng (N)

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng số chu kỳ tải trọng ảnh hưởng đáng kể đến sự tích lũy biến dạng. Khi số chu kỳ tải trọng tăng, biến dạng dư tăng lên. Lentz và Baladi (1980) thấy rằng tích lũy biến dạng tỷ lệ thuận với logarit của N . Suiker (1999) nhận thấy rằng tốc độ tích lũy biến dạng giảm đi tỷ lệ thuận với $1/N$ thông qua hai hệ số, c_1 khi $N < 1000$ và c_2 khi $N > 1000$ với $c_1 > c_2$. Thí nghiệm nén ba trục trên một số mẫu đá dăm, Gotschol (2002) cho ra kết quả tương đồng với các kết quả nghiên cứu trước đây. Marr và Christian (1981) đã xây dựng được mối tương quan $\varepsilon^{acc} = a\zeta^b$, trong đó b từ 1,91 đến 2,32 với N từ 10 đến 1.000, ζ là tỷ số biên độ. Wichtmann và nnk, (2005) cũng chỉ ra rằng tích lũy biến dạng tăng tỷ lệ thuận với logarit của số chu kỳ tải trọng lên tới 10.000 (hình 4).



Hình 3. Mối quan hệ giữa tích lũy biến dạng với bình phương biên độ biến dạng (Wichtmann và nnk, 2005).



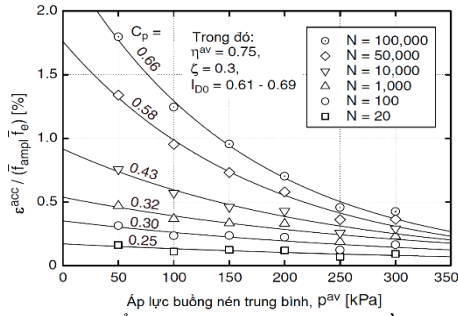
Hình 4. Tích lũy biến dạng trong thí nghiệm nén ba trục với biên độ ứng suất khác nhau (Wichtmann và nnk, 2005).

3.2.3. Ảnh hưởng của áp lực buồng nén

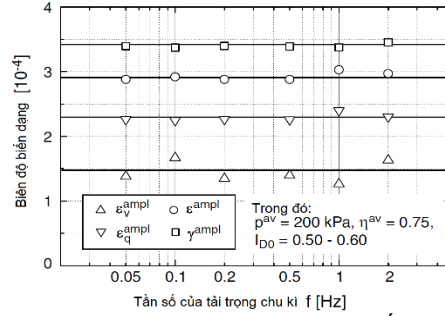
Dựa vào thí nghiệm nén ba trục có thoát nước, Wichtmann và nnk, (2005) nhận thấy rằng biên độ biến dạng tăng không đáng kể khi áp lực buồng nén tăng. Lý do có thể là do ảnh hưởng của độ cứng cắt G đến áp lực buồng nén trung bình p^n (ở đây $n = 0,75$). Hình 5 biểu diễn mối quan hệ giữa tích lũy biến dạng với ứng suất trung bình p^{av} khi tải trọng chu kỳ khác nhau. Các biến dạng được chia thành hàm của biên độ f_{ampl} và hàm của hệ số rỗng f_e . Có thể thấy rằng, tích lũy biến dạng tăng đáng kể khi ứng suất trung bình giảm và ngược lại.

3.2.4. Ảnh hưởng của tần số của tải trọng chu kỳ

Ảnh hưởng của tần số của tải trọng chu kỳ đến tốc độ biến dạng đã được báo cáo trong một số nghiên cứu. Youd (1972) và Shenton (1985) không quan sát thấy ảnh hưởng của tần số đến sự tích lũy biến dạng. Tương tự, Wichtmann và nnk, (2005) thấy rằng không có ảnh hưởng của tần số đến biên độ biến dạng hình 6. Dựa vào các thí nghiệm nén ba trục trên các mẫu sỏi, Kempfert và nnk, (2000) nhận ra rằng tăng tần số có thể tăng tốc độ biến dạng ở một số vòng lặp đầu tiên, trong khi đó tốc độ biến dạng đã giảm trong các lần lặp sau. Khi thí nghiệm thay đổi tần số $0,05 \leq f \leq 2,0$, kết quả thu được phù hợp với kết quả của Youd (1972) và Shenton (1985).



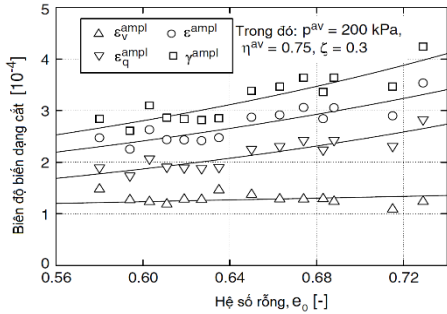
Hình 5. Ảnh hưởng của áp lực buồng nén trung bình đến tích lũy biến dạng chuẩn hóa (Wichtmann và nnk, 2005)



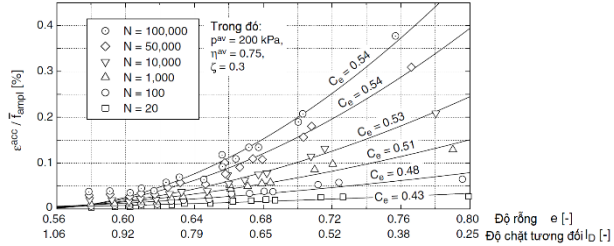
Hình 6. Sự phụ thuộc của biên độ biến dạng vào tần số của tải trọng chu kỳ (Wichtmann và nnk, 2005).

3.2.5. Ảnh hưởng của hệ số rỗng

Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả Silver và Seed (1971b); Youd (1972); Marr và Christian (1981) cho thấy rằng độ chặt của đất rời ảnh hưởng đáng kể đến tích lũy biến dạng. Khi thí nghiệm tải trọng chu kỳ trên các mẫu cát rời, tốc độ tích lũy biến dạng nhanh hơn. Thí nghiệm nén ba trục các mẫu đất bão hòa có hệ số rỗng $0,58 \leq e_0 \leq 0,80$, Wichtmann và nnk, (2005) chỉ ra rằng hệ số rỗng càng nhỏ, biên độ biến dạng càng nhỏ (hình 7), và tích lũy biến dạng của cát rời lớn hơn so với cát chặt (hình 8).



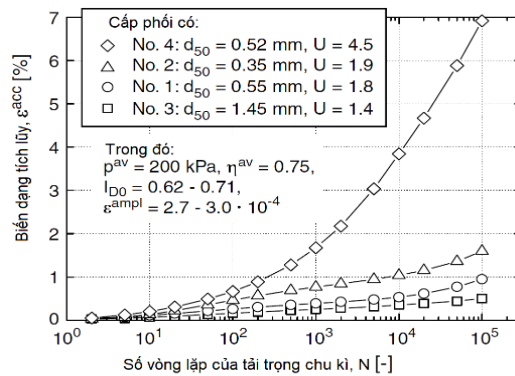
Hình 7. Ảnh hưởng của hệ số rỗng đến biên độ biến dạng cát (Wichtmann và nnk, 2005).



Hình 8. Ảnh hưởng của hệ số rỗng (tỷ trọng tương đối, I_D) với tích lũy biến dạng (Wichtmann và nnk, 2005).

3.2.6. Ảnh hưởng của thành phần cấp phối hạt

Nghiên cứu các mẫu cát với thành phần hạt khác nhau chịu tác dụng của tải trọng chu kỳ, Wichtmann và nnk, (2005) đã nhận thấy tốc độ tích lũy biến dạng phụ thuộc đáng kể vào sự phân bố kích thước hạt (hình 9). Hệ số đồng nhất của mẫu cát tăng dẫn đến tích lũy biến dạng tăng. Điều đó có nghĩa là cát có thành phần cấp phối tốt tích lũy nhanh hơn so với các loại cát có thành phần cấp phối xấu, điều này đã giải thích tại sao một cấp phối tối ưu dễ dàng đạt được độ chặt đầm nén yêu cầu. Khi giảm đường kính trung bình (d_{50}) với mức độ đồng đều không đổi ($U = \text{const}$) dẫn đến tích lũy biến dạng tăng. Một khuyến nghị đã được đưa ra rằng các nghiên cứu tiếp theo nên xem xét ảnh hưởng của phân bố kích cỡ hạt, hình dạng hạt và hàm lượng hạt mịn đến sự tích lũy biến dạng cũng như tốc độ tích lũy.



Hình 9. Tích lũy biến dạng cho các cấp độ hạt khác nhau theo tải trọng chu kỳ (Wichtmann và nnk, 2005).

4. Kết luận

Bài báo tập trung phân tích những ứng xử cơ học của đất rời dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ. Đường cong quan hệ ứng suất – biến dạng thường được thiết lập. Mô đun cắt và hệ số giảm chấn là hai tham số cơ bản để xây dựng đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng theo tải trọng chu kỳ.

Biên độ biến dạng cắt rất quan trọng khi xem xét ứng xử của đất dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ. Khi biên độ biến dạng cắt của đất trung bình và nhỏ ($<10^{-2}$), biến dạng của đất ít phụ thuộc vào tải trọng chu kỳ. Khi biên độ biến dạng cắt lớn ($>10^{-2}$), Mô đun cắt và hệ số giảm chấn phụ thuộc vào cả biến dạng cắt và số chu kỳ tải trọng. Quan hệ ứng suất - biến dạng phụ thuộc của các thông số của tải trọng, tính chất vật lý của đất và lịch sử ứng suất lên đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng theo tải trọng chu kỳ.

Nghiên cứu cũng đã chỉ ra rằng, biên độ và số lần lặp của tải trọng chu kỳ ảnh hưởng đáng kể đến hiện tượng tích lũy biến dạng, tích lũy biến dạng tỷ lệ với logarit của N và bình phương biên độ biến dạng. Trong khi đó, tần số của tải trọng chu kỳ ít ảnh hưởng đến sự tích lũy biến dạng. Ngoài ra, đất có cấp phối càng tốt và đất trạng thái rời sẽ tích lũy biến dạng nhanh hơn dưới tác dụng của tải trọng chu kỳ.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn nhóm nghiên cứu mạnh “Địa kỹ thuật, vật liệu và phát triển bền vững, GESCC”, Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mỏ - Địa chất đã định hướng và đóng góp hoàn thiện bản thảo.

Tài liệu tham khảo

Gotschol, A., 2002. Veranderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Boden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung. Universitat Gh Kassel.

Habib, S., Dehnavi, Y., Alavi, A., 2010. Numerical modeling of stress-strain behavior of sand under cyclic loading. *Engineering Geology*, 116, 53–72.

Ishihara, K., 1996. Soil behavior in earthquake geotechnics. Clarendon Press, 350 pages.

Kempfert, H.G., Gotschol, A., Stocker, T., 2000. Kombiniert zyklische und dynamische Elementversuche zur Beschreibung des Kurz- und Langzeitverhaltens von Schotter und granularen.

Lentz, R.W., Baladi, G.Y., 1980. Simplified procedure to characterize permanent strain in sand subjected to cyclic loading, in: Soils under Cyclic and Transient Loading, Volume 1. *Processing International Symposium*, pp. 89–95.

Marr, W.A., Christian, J.T., 1981. Permanent displacements due to cyclic wave loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(8), 1129–1149.

Chen, Q., Indraratna, B., Carter, P.J. and Nimbalkar, S. 2015. Isotropic-kinematic hardening model for coarse granular soils capturing particle breakage and cyclic loading under triaxial stress space. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(4).

Sawicki, A., Swidzinski, W., 1989. Mechanics of a sandy subsoil subjected to cyclic loadings. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 13, 511–529.

Sawicki, A., Swidzinski, W., 1987. Compaction curve as one of basic characteristics of granular soils, in: D. Cordary, I.E.F. and (Ed.), *4th Colloque Franco-Polonais de Mechanique Des Sols Appliquee. Grenoble*, pp. 103–115.

Shenton, M.J., 1985. Ballast deformation and track deterioration. In: *Track Technology, Proceedings of a Conference Held at University of Nottingham*, Pergamon Press, 253–265.

Silver, M.L., Seed, H.B., 1971a. Volume changes in sands during cyclic loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1171–1182.

Silver, M.L., Seed, H.B., 1971b. Deformation characteristics of sands under cyclic loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(8).

Suiker, A.S.J., 1999. Static and cyclic loading experiments on non-cohesive granular materials. *TU Delft report no.1-99-DUT-1*.

Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, T., Pobleto, M., 2005. Correlation of cyclic preloading with the liquefaction resistance. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(12), 923–932.

Youd, T., 1973. Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands. in: *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils*. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959.

Youd, T.L., 1972. Compaction of sands by repeated shear straining. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(7), 709–725.

ABSTRACT

Study on the mechanical behavior of granular soil subjected to vertical cyclic loading

Pham Van Hung*, Vu Minh Ngan, Pham Thi Nhan
Hanoi University of Mining and Geology

Structures are subjected to cyclic loads due to changes in the magnitude of the applied loads over time. In the case, when the variation of the load over time is large enough, the effect of the cyclic load on the structure and the soil cannot be neglected. Theoretical studies related to soil behavior under cyclic loading are considered to provide an in-depth overview of soil mechanics. The paper analyzes the relationship between stress and strain under a number of load cycles. Two fundamental parameters affecting soil behavior under cyclic loading including the shear modulus and the damping ratio are presented. In addition, the various parameters which are cyclic loading conditions, physical-mechanical parameters and primary stress states influent on the strain accumulation of granular soil are studied.

Keywords: mechanical behavior; granular soil; cumulative strain; cyclic loading.