

TƯƠNG QUAN GIỮA SỨC KHÁNG CẮT DƯ CỦA ĐẤT, CÁC GIỚI HẠN ATTERBERG VÀ HÀM LƯỢNG HẠT SÉT

Nguyễn Thành Dương*, Nguyễn Thị Nụ, Phạm Thị Ngọc Hà

Trường Đại học Mở - Địa chất

Tóm tắt

Việc xác định sức kháng cắt dư của đất trong nhiều trường hợp sẽ gặp khó khăn, đặc biệt là ở các nước đang phát triển như Việt Nam do hạn chế về thiết bị thí nghiệm. Do đó, việc xây dựng các tương quan xác định sức kháng cắt dư của đất từ các chỉ tiêu cơ bản của đất như giới hạn Atterberg, hàm lượng hạt sét là rất cần thiết. Đây là các chỉ tiêu cũng thường được sử dụng để xây dựng tương quan xác định một số tính chất cơ học của đất. Các tương quan xác định sức kháng cắt dư sẽ đặc biệt hữu ích trong những trường hợp hạn chế về mặt thời gian và thiết bị thí nghiệm. Trong bài báo này, nhóm tác sẽ tổng hợp, phân tích và đánh giá các tương quan giữa góc ma sát trong dư, các giới hạn Atterberg và hàm lượng hạt sét. Đồng thời, dựa trên các giá trị giới hạn chảy (LL), chỉ số dẻo (PI), hàm lượng hạt sét (CF), tỷ số giữa giới hạn dẻo/giới hạn chảy (PL/LL) và chỉ số hoạt động (A) để xây dựng tương quan xác định góc ma sát trong dư. Các số liệu sử dụng để xây dựng tương quan được thu thập từ các kết quả thí nghiệm cắt vòng trên nhiều loại đất khác nhau ở cấp áp lực nhỏ hơn 200 kPa.

Từ khóa: Sức kháng cắt dư, giới hạn Atterberg, hàm lượng hạt sét, tương quan hồi quy.

1. Mở đầu

Các giới hạn Atterberg (giới hạn chảy LL, chỉ số dẻo PI) và hàm lượng hạt sét (CF) là những chỉ tiêu cơ bản và phổ biến của đất. Nhiều tác giả đã sử dụng các giới hạn Atterberg để xây dựng các tương quan xác định các chỉ tiêu cơ học của đất như chỉ số nén C_c , chỉ số nở C_s , hệ số cố kết thẳng đứng C_v (ví dụ Di Maio và nnk., 2004; Yukselen-Aksoy và nnk., 2008; Tiwari và Ajmera, 2012; Duong và Hao, 2020). Liên quan đến sức kháng cắt của đất, nhiều tương quan xác định góc ma sát trong dư của đất từ các giới hạn Atterberg và hàm lượng hạt sét cũng đã được thành lập (Skempton, 1964, 1985; Bishop và nnk., 1971; Lupini và nnk., 1981; Mesri và Cepeda-Diaz, 1986; Gibo và nnk., 1987; Collotta và nnk., 1989; Tsiambaos, 1991; Stark và Eid, 1994; Wesley, 2003; Suzuki và nnk., 2005; Stark và Hussain, 2013; Fang và nnk., 2019). Trong phòng thí nghiệm, thiết bị cắt vòng (Ring shear apparatus) thường được sử dụng để xác định sức kháng cắt dư của đất vì nó cho phép cắt mẫu đất đến mức biến dạng cắt bất kỳ theo một phương cắt nhất định nên kết quả xác định sức kháng cắt dư gần với thực tế nhất (Bishop và nnk., 1971). Tuy nhiên, ở nhiều nơi, đặc biệt là các nước đang phát triển như Việt Nam, thiết bị cắt vòng chưa phổ biến. Do đó, các tương quan xác định sức kháng cắt dư từ các chỉ tiêu cơ bản của đất rất hữu ích trong những trường hợp khẩn cấp và thiết bị thí nghiệm hạn chế. Hiện nay, có nhiều các tương quan xác định sức kháng cắt dư từ các chỉ tiêu cơ bản của đất và các tương quan này được sử dụng cho những loại đất khác nhau, phụ thuộc vào nguồn gốc của đất, loại đất, thành phần khoáng vật và áp lực hữu hiệu. Trong bài báo này, nhóm tác giả sẽ tổng hợp, phân tích và đánh giá các tương quan xác định sức kháng cắt dư của đất từ giới hạn chảy, chỉ số dẻo, và hàm lượng

* Ngày nhận bài: 01/3/2022; Ngày phản biện: 21/3/2022; Ngày chấp nhận đăng: 12/4/2022

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

hạt sét. Đồng thời, nhóm tác giả cũng sẽ đưa ra tương quan xác định sức kháng cắt dư mới từ các chỉ tiêu này dựa trên việc thu thập, tổng hợp các kết quả thí nghiệm từ các loại đất khác nhau trên máy cắt vòng.

2. Tổng quan các tương quan xác định sức kháng cắt dư từ các giới hạn Atterberg và hàm lượng hạt sét

Sau bài giảng Rankine của Skempton (1964), việc xác định sức kháng cắt dư từ các thí nghiệm trong phòng và các tương quan xác định góc ma sát trong dư từ các chỉ tiêu cơ bản của đất như giới hạn chảy (LL), chỉ số dẻo (PI) và hàm lượng hạt sét (CF) ($<2\mu\text{m}$) đã được nhiều tác giả quan tâm nghiên cứu. Trong đó, có nhiều tác giả đã xây dựng và đề xuất tương quan mối quan hệ giữa góc ma sát trong dư và hàm lượng hạt sét (Skempton, 1964; Lupini và nnk., 1981; Skempton, 1984; Suzuki và nnk., 2005; Tiwari và Marui, 2005); tương quan giữa góc ma sát trong dư và giới hạn chảy (Mesri và Cepeda-Diaz, 1986; Stark và Eid, 1994; Collotta và nnk., 1989; Suzuki và nnk., 2005; Tiwari và Marui, 2005; Fang và nnk., 2019); tương quan giữa góc ma sát trong dư và chỉ số dẻo (Kanji 1974, Tsiambaos et al., 1991; Suzuki và nnk., 2005; Tiwari và Marui, 2005; Fang và nnk., 2019); tương quan giữa góc ma sát trong dư với các giá trị giới hạn chảy, chỉ số dẻo và hàm lượng hạt sét (Collotta và nnk., 1989; Wesley, 2003; Suzuki và nnk., 2005).

Skempton (1964) đã xây dựng đường bao mối quan hệ giữa góc ma sát trong dư của đất và hàm lượng hạt sét. Theo đó, góc ma sát trong dư của đất giảm không đáng kể khi hàm lượng hạt sét tăng lớn hơn 50%. Lupini và nnk (1981) dựa trên hàm lượng hạt sét đã chia ứng xử cắt của đất thành 3 loại: chuyển động trượt ($\text{CF} > 50\%$), chuyển động rời ($\text{CF} < 25\%$) và chuyển động trung gian ($25\% \leq \text{CF} \leq 50\%$). Trong đó, chuyển động rời có góc ma sát trong dư lớn nhất và chuyển động trượt có góc ma sát trong dư nhỏ nhất. Tiwari và nnk (2005) cũng đã xây dựng đường bao quan hệ giữa góc ma sát trong dư và hàm lượng hạt sét cho các nhóm khoáng vật khác nhau (kaolinite, smectite và quartz). Nhìn chung, mối quan hệ giữa góc ma sát trong dư của đất và hàm lượng hạt sét chủ yếu được xây dựng trên các biểu đồ đường bao định tính. Quan hệ định lượng giữa góc ma sát trong dư và CF không rõ ràng, các tương quan này thường có hệ số xác định (R) thấp (Suzuki và nnk., 2015).

Liên quan đến các giới hạn Atterberg, nhiều tương quan giữa góc ma sát trong dư và các chỉ tiêu riêng lẻ như LL, PL, PI đã được xây dựng. Theo Kanji (1974) mối quan hệ giữa góc ma sát trong dư của đất xác định từ thí nghiệm cắt trực tiếp và chỉ số dẻo có thể biểu diễn qua biểu thức: $\varphi_r = 44.6/\text{PI}^{0.446}$ (với $5\% < \text{PI} < 350\%$). Tsiambaos (1991) đã xây dựng mối tương quan giữa góc ma sát trong dư và chỉ số dẻo cho đất sét vôi: $\tan \varphi_r = -0.120 \cdot \log \text{PI} + 0.934$ ($R = 0.88$). Stark và Eid (1994) cũng đã xây dựng đường cong quan hệ giữa góc ma sát trong dư và giới hạn chảy của đất với các hàm lượng sét khác nhau ($\text{CF} \leq 20\%$, $25\% \leq \text{CF} \leq 45\%$ và $\text{CF} \geq 50\%$). Các đường cong này cũng được xây dựng ở các cấp áp lực khác nhau từ 100 kPa đến 700 kPa. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi hàm lượng hạt sét lớn hơn 50% và giá trị LL lớn hơn 120%, góc ma sát trong dư của đất giảm không đáng kể (từ $1-2^\circ$) khi áp lực cắt tăng từ 100 kPa đến 700 kPa. Đối với đất có chứa khoáng vật smectite, Suzuki và nnk (2005) đã đưa ra tương quan xác định góc ma sát trong dư dựa trên giới hạn chảy LL và chỉ số dẻo PI: $\tan \varphi_r = 22.26 \cdot \text{LL}^{-1.094}$ ($R = 0.837$) và $\tan \varphi_r = 3.449 \cdot \text{PI}^{-0.737}$ ($R = 0.855$). Stark và Hussain (2013) đã xây dựng các tương quan xác định góc ma sát trong dư của đất dựa trên giới hạn chảy ở các cấp áp lực hữu hiệu khác nhau từ 50 kPa đến 700 kPa. Theo đó, nhóm tác giả đã xây dựng các tương quan theo 3 nhóm: Nhóm 1 đối với

đất có hàm lượng hạt sét nhỏ hơn 25% ($CF < 25\%$), giá trị giới hạn chảy từ 30% đến 80% ($30\% \leq LL \leq 80\%$); Nhóm 2 đối với đất có hàm lượng hạt sét trong khoảng 25% đến 45% ($25\% \leq CF \leq 45\%$), giá trị giới hạn chảy từ 30% đến 130% ($30\% \leq LL \leq 130\%$); Nhóm 3 đối với đất có hàm lượng hạt sét lớn hơn 50% ($CF > 50\%$), giá trị giới hạn chảy từ 30% đến 130% ($30\% \leq LL \leq 130\%$); và từ 120% đến 300% ($120\% \leq LL \leq 300\%$). Gần đây, dựa trên kết quả sức kháng cắt dư của một số mẫu đất đắp đập, Fang và nnk (2019) cũng đã xây dựng tương quan xác định góc ma sát trong dư theo các giá trị riêng lẻ LL, PL và PI: $\varphi_r = -0.9031 \cdot LL + 51.726$ ($R = 0.99$); $\varphi_r = -1.66 \cdot PL + 51.139$ ($R = 0.92$); $\varphi_r = -1.4925 \cdot PI + 45.197$ ($R = 0.92$). Tuy nhiên, các tương quan này được xây dựng dựa trên số lượng mẫu đất hạn chế (8 mẫu).

Nhìn chung, tương quan giữa góc ma sát trong dư của đất với các chỉ tiêu riêng lẻ (CF, LL, PI) thường không rõ ràng hoặc có hệ số xác định (R) thấp, ngoại trừ một số loại đất đặc trưng như đất sét vôi, đất có chứa khoáng vật smectite hoặc đất phân bố ở một khu vực nhất định. Do đó, nhiều tác giả trên thế giới đã xây dựng các tương quan xác định góc ma sát trong dư dựa trên mối quan hệ giữa nhiều chỉ tiêu. Collotta (1989) đã đưa ra biểu thức xác định góc ma sát trong dư của đất là một hàm của 3 chỉ tiêu CF, LL, and PI: $\varphi_r = f(CALIP)$, trong đó: $CALIP = (CF)^2 \times LL \times PI \times 10^{-5}$. Nghiên cứu của Collotta (1989) cho thấy góc ma sát trong dư của đất xác định từ thí nghiệm cắt trực tiếp và cắt vòng gần tương đương nhau khi giá trị CALIP lớn hơn 60. Với giá trị CALIP nhỏ hơn 60, giá trị góc ma sát trong dư xác định từ thí nghiệm cắt trực tiếp lớn hơn khoảng 15 - 20% so với khi xác định từ thí nghiệm cắt vòng. Wesley (2003) đã xây dựng đường bao quan hệ giữa góc ma sát trong dư, chỉ số dẻo và giới hạn chảy dựa trên đường thẳng A của biểu đồ quan hệ giữa PI và LL: $\Delta PI = PI - 0.73(LL - 20)$. Đường bao này phù hợp cho cả đất loại sét thông thường và đất sét có nguồn gốc tro núi lửa. Dựa trên tỷ số giới hạn dẻo/giới hạn chảy (PL/LL), Suzuki và nnk (2005) đã xây dựng tương quan cho đất có chứa khoáng vật smectite: $\tan \varphi_r = 1.045 \cdot (PL/LL) - 0.077$ ($R = 0.874$). Nhóm tác giả cũng đã xây dựng các tương quan hồi quy bội để xác định góc ma sát trong dư từ các chỉ tiêu CF, LL, PL, PI, và tỷ số PL/LL. Kết quả nghiên cứu cho thấy sức kháng cắt dư của đất có thể được ước lượng từ các chỉ tiêu CF, LL, PL, và PI, đặc biệt là cho đất có chứa khoáng vật smectite. Trong đó, tương quan xác định góc ma sát trong dư: $\tan \varphi_r = 10^{1.143 CF - 0.582 PI - 0.531}$ có hệ số xác định cao nhất ($R = 0.924$). Các tương quan xác định góc ma sát trong dư từ các giới hạn Atterberg và hàm lượng hạt sét CF được tổng hợp trong bảng 1.

Bảng 1. Tổng hợp các tương quan xác định φ_r từ giới hạn Atterberg và hàm lượng hạt sét

Tác giả	Tương quan	Loại đất
Kanji (1974)	$\varphi_r = 44.6/PI^{0.446}$	5%<PI<350%
Collotta (1989)	$\varphi_r = f(CALIP)$, $CALIP = (CF)^2 \times LL \times PI \times 10^{-5}$	Đất sét ở Italia
Tsiambaos (1991)	$\tan \varphi_r = -0.120 \cdot \log PI + 0.934$ (R = 0.88)	Đất sét vôi
Suzuki và nnk (2005)	$\tan \varphi_r = 22.26 \cdot LL^{-1.094}$ (R = 0.837) $\tan \varphi_r = 3.449 \cdot PI^{-0.737}$ (R = 0.855) $\tan \varphi_r = 1.045 \cdot (PL/LL) - 0.077$ (R = 0.874) $\tan \varphi_r = 0.201 \cdot A^{-0.715}$ (R = 0.646) $\tan \varphi_r = 10^{1.143} \cdot CF^{-0.582} \cdot PI^{-0.531}$ (R=0.924)	Đất sét có chứa khoáng vật smectite
Stark và Hussain (2013)	$(\varphi_r)_{\sigma'_n=50kPa} = 39.71 - 0.29LL + 6.63 \cdot 10^{-4}(LL)^2$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=100kPa} = 39.41 - 0.298LL + 6.81 \cdot 10^{-4}(LL)^2$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=400kPa} = 40.24 - 0.375LL + 1.36 \cdot 10^{-3}(LL)^2$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=700kPa} = 40.34 - 0.412LL + 1.683 \cdot 10^{-3}(LL)^2$	CF<25%, 30%≤LL≤80%
	$(\varphi_r)_{\sigma'_n=50kPa} = 31.4 - 6.7 \cdot 10^{-3}LL - 3.616 \cdot 10^{-3}(LL)^2 + 1.864 \cdot 10^{-5}(LL)^3$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=100kPa} = 29.8 - 3.627 \cdot 10^{-4}LL - 3.584 \cdot 10^{-3}(LL)^2 + 1.854 \cdot 10^{-5}(LL)^3$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=400kPa} = 28.4 - 5.622 \cdot 10^{-2}LL - 2.952 \cdot 10^{-3}(LL)^2 + 1.721 \cdot 10^{-5}(LL)^3$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=700kPa} = 28.05 - 0.2083LL - 8.183 \cdot 10^{-4}(LL)^2 + 9.372 \cdot 10^{-6}(LL)^3$	25%≤CF≤45%, 30%≤LL≤130%
	$(\varphi_r)_{\sigma'_n=50kPa} = 33.5 - 0.31LL + 3.9 \cdot 10^{-4}(LL)^2 + 4.4 \cdot 10^{-6}(LL)^3$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=100kPa} = 30.7 - 0.2504LL - 4.2053 \cdot 10^{-4}(LL)^2 + 8.0479 \cdot 10^{-6}(LL)^3$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=400kPa} = 29.42 - 0.2621LL - 4.011 \cdot 10^{-4}(LL)^2 + 8.718 \cdot 10^{-6}(LL)^3$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=700kPa} = 27.7 - 0.3233LL + 2.896 \cdot 10^{-4}(LL)^2 + 7.1131 \cdot 10^{-6}(LL)^3$	CF≥50%, 30%≤LL≤120%
	$(\varphi_r)_{\sigma'_n=50kPa} = 12.03 - 0.0215LL$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=100kPa} = 10.64 - 0.0183LL$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=400kPa} = 8.32 - 0.0114LL$ $(\varphi_r)_{\sigma'_n=400kPa} = 5.84 - 0.0049LL$	CF≥50%, 120%≤LL≤300%
Fang và nnk (2019)	$\varphi_r = -0.9031 \cdot LL + 51.726$ (R=0.99) $\varphi_r = -1.66 \cdot PL + 51.139$ (R=0.92) $\varphi_r = -1.4925 \cdot PI + 45.197$ (R=0.92)	Đất đắp đập hồ chứa

3. Xây dựng tương quan xác định sức kháng cắt dư của đất

3.1. Thu thập, xử lý số liệu

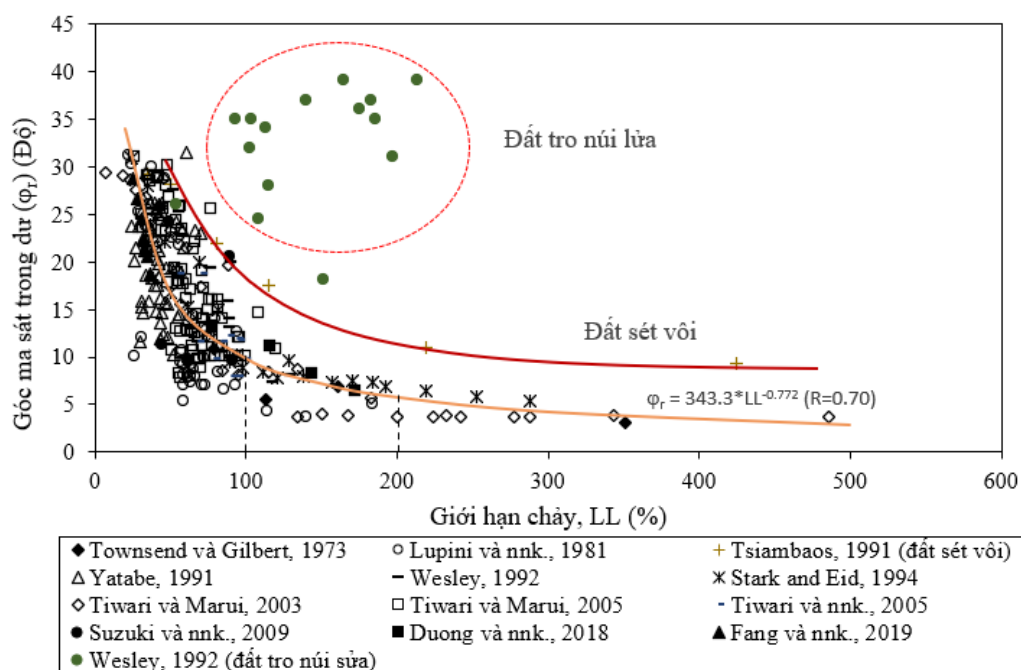
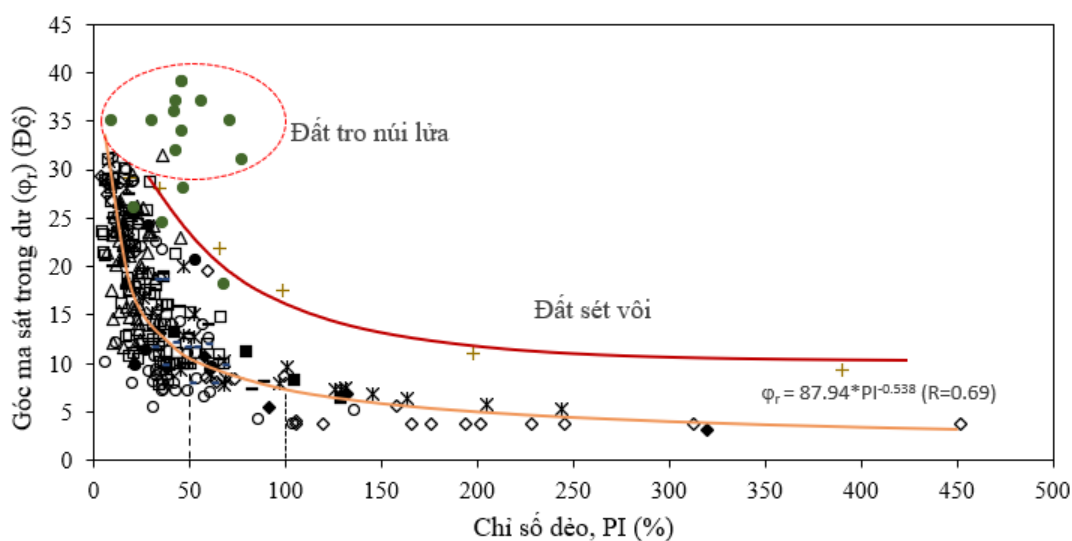
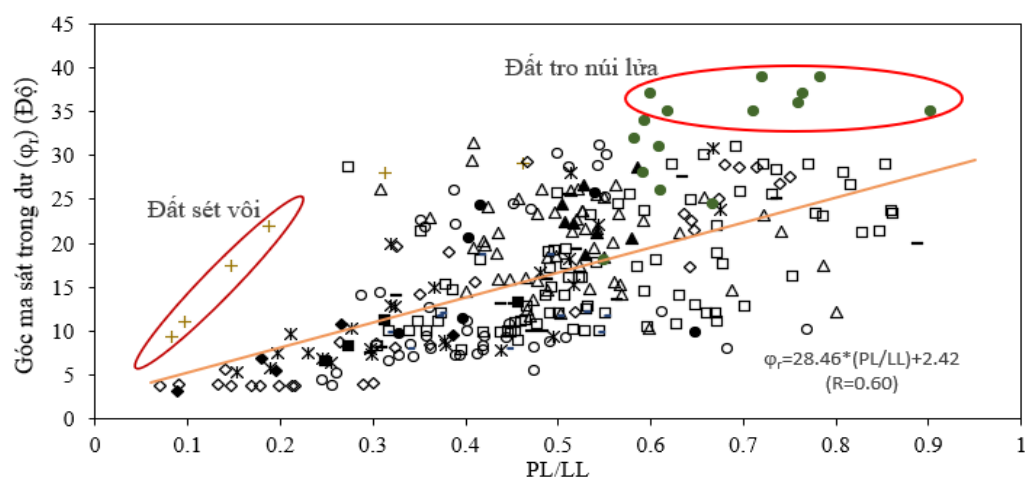
Các số liệu sử dụng trong bài báo này được thu thập từ các nghiên cứu trước đây trên các loại đất sét tự nhiên và hỗn hợp đất chế bị. Trong đó, nhóm tác giả chỉ thu thập các giá trị sức kháng cắt dư của đất xác định từ thí nghiệm cắt vòng. Do sức kháng cắt dư phụ thuộc vào cấp áp lực cắt, nó giảm khi áp lực cắt tăng nên trong nghiên cứu này nhóm tác giả sẽ sử dụng kết quả sức kháng cắt dư xác định ở cấp áp lực nhỏ hơn 200 kPa. Các dữ liệu thu thập từ các nghiên cứu trước được tóm tắt và tổng hợp trong bảng 2. Các tương quan giữa góc ma sát trong dư, giới hạn Atterberg và hàm lượng hạt sét được xây dựng dựa trên các phân tích hồi quy đơn giản và phân tích hồi quy bội.

Bảng 2. Dữ liệu thu thập từ các nghiên cứu trước

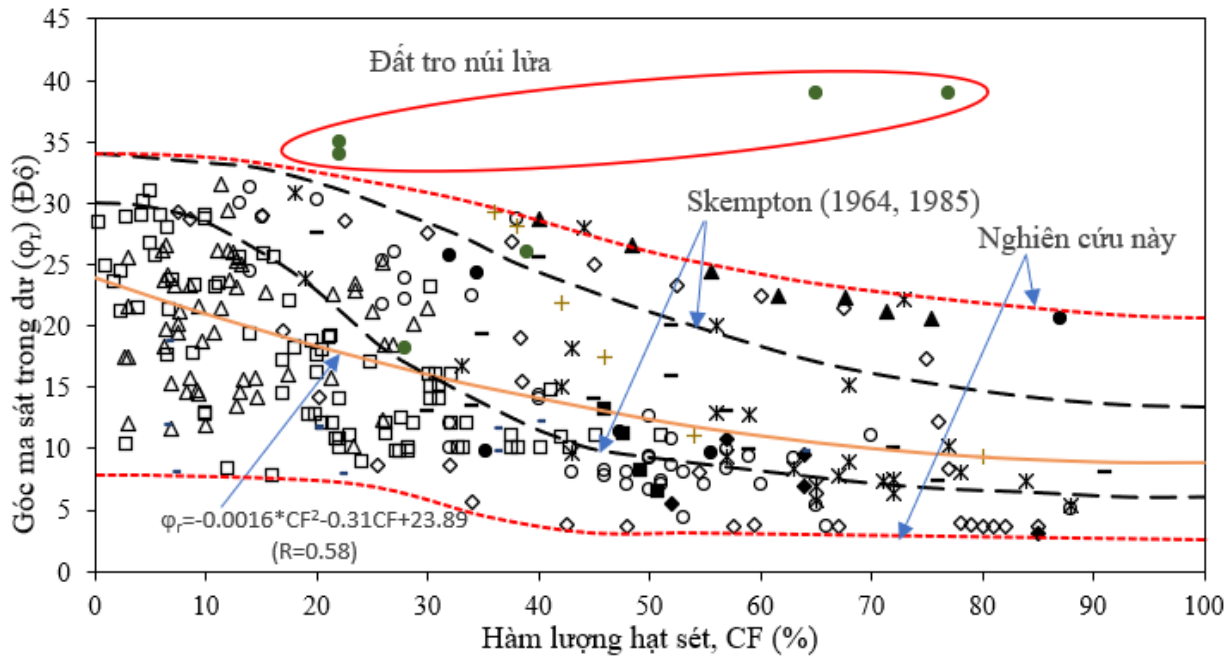
Tài liệu tham khảo	Số lượng dữ liệu	Loại đất
Townsend và Gilbert, 1973	5	Đất phiến sét
Lupini và nnk., 1981	41	Đất sét tự nhiên + Đất chế bị
Yatabe và nnk., 1991	55	Đất sét tự nhiên
Tsiambaos, 1991	6	Đất phong hóa (sét vôi)
Wesley, 1992	14	Đất sét phong hóa từ bột kết
Wesley, 1992	15	Đất sét bụi (tro bụi núi lửa)
Stark và Eid, 1994	34	Đất sét tự nhiên và phiến sét
Tiwari và Marui, 2003	32	Đất chế bị (kaolin+cát+bentonite)
Tiwari và Marui, 2005	82	Đất tự nhiên
Tiwari và nnk., 2005	11	Đất tự nhiên
Suzuki và nnk., 2009	6	Đất tự nhiên+sét kaolin
Duong và nnk., 2018	4	Đất chế bị (kaolin+bentonite)
Fang và nnk., 2019	8	Đất đắp đập
Tổng	311	

3.2. Kết quả phân tích hồi quy đơn giản

Mối quan hệ giữa góc ma sát trong dư với các giới hạn Atterberg (LL, PI), tỷ số PL/LL, hàm lượng hạt sét (CF) và chỉ số hoạt động ($A = PI/CF$) được thể hiện trên các hình 1-5. Hình 1 và 2 cho thấy góc ma sát trong dư của đất giảm khi tăng dần giới hạn chảy và chỉ số dẻo PI, ngoại trừ đất tro núi lửa. Đối với đất tro núi lửa, sự phụ thuộc của góc ma sát trong dư vào các giá trị LL và PI là không rõ ràng. Ngoài ra, đất tro núi lửa và đất sét vôi có sức kháng cắt dư nhìn chung cao hơn các loại đất khác khi có cùng giá trị LL và PI, đặc biệt là đất tro núi lửa. Điều này là do đất tro núi lửa thường chứa các khoáng vật halloysite và allophone, đây là những khoáng vật có sức kháng cắt dư lớn (Wesley, 2003). Nhìn chung, xu hướng giảm góc ma sát trong dư của đất thể hiện rõ nhất khi LL tăng đến 100% và PI tăng đến 50%; xu hướng này giảm dần khi LL tăng từ 100% đến 200% và PI tăng từ 50% đến 100%; khi $LL > 200\%$ và $PI > 100\%$, góc ma sát trong dư của đất giảm không đáng kể với giá trị ϕ_r nhỏ nhất khoảng 4° . Tương quan hồi quy đơn giản giữa góc ma sát trong dư của đất (ngoại trừ đất tro núi lửa và đất sét vôi), giới hạn chảy LL và chỉ số dẻo PI được thể hiện qua các biểu thức: $\phi_r = 343.3 \cdot LL^{-0.772}$ ($R = 0.70$); $\phi_r = 87.94 \cdot PI^{-0.538}$ ($R = 0.69$). Hình 1 và 2 cũng cho thấy đường cong quan hệ giữa góc ma sát trong dư với giá trị LL và PI của đất sét vôi và các loại đất khác (trừ đất tro núi lửa) là khá tương đồng nhau.

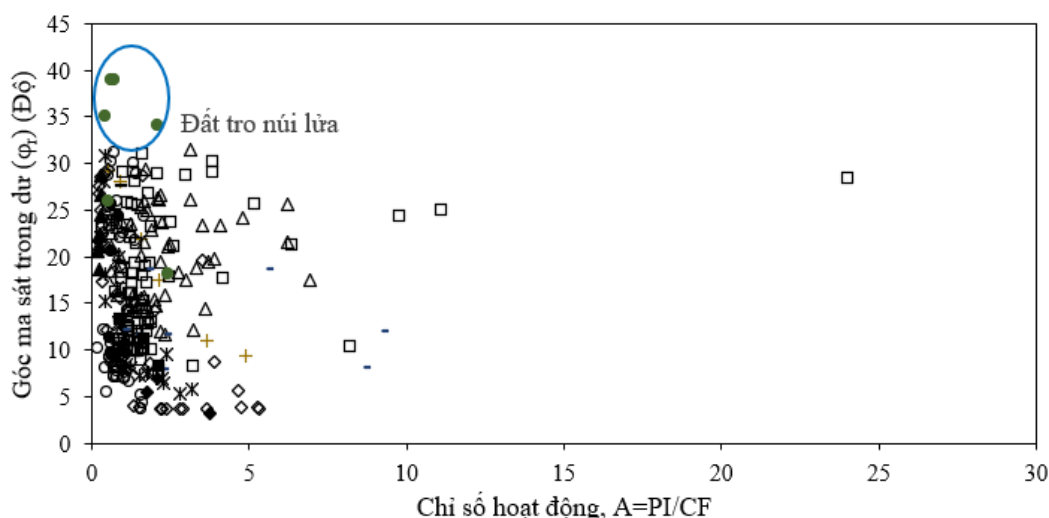
Hình 1. Quan hệ giữa ϕ_r và giá trị LLHình 2. Quan hệ giữa ϕ_r và giá trị PIHình 3. Quan hệ giữa ϕ_r và tỷ số PL/LL

Dựa trên giá trị PL và LL, mối quan hệ giữa góc ma sát trong dư của đất và tỷ số PL/LL được thể hiện trên hình 3. Có thể thấy, giá trị góc ma sát trong dư của đất tăng khi tỷ lệ PL/LL tăng, ngoại trừ đất tro núi lửa. Đối với đất tro núi lửa, sự phụ thuộc của góc ma sát trong dư vào tỷ số PL/LL là không rõ ràng. Xét về quy luật chung, góc ma sát trong dư của đất sét vôi tăng nhanh hơn các loại đất khác khi tỷ số PL/LL tăng. Mối quan hệ giữa ϕ_r và tỷ số PL/LL cũng đã được Suzuki và nnk (2005) đề cập đến và cho thấy ϕ_r tăng khi tỷ số PL/LL tăng. Dựa trên hình 3, tương quan hồi quy đơn giản giữa ϕ_r và PL/LL (ngoại trừ đất tro núi lửa và đất sét vôi) có thể được thể hiện qua biểu thức: $\phi_r = 28.46*(PL/LL)+2.42$ ($R = 0.60$).



Hình 4. Quan hệ giữa ϕ_r và CF

Mối quan hệ giữa góc ma sát trong dư và hàm lượng hạt sét được thể hiện trên hình 4. Nhìn chung, góc ma sát trong dư giảm khi hàm lượng hạt sét tăng, ngoại trừ đất tro núi lửa. Đối với đất tro núi lửa, một số mẫu cho thấy ϕ_r tăng khi hàm lượng hạt sét CF tăng. Theo Skempton (1964, 1985), khi hàm lượng hạt sét trong đất $CF \geq 50\%$, trạng thái dư của đất được hình thành chủ yếu do chuyển động trượt của các hạt sét và khi tăng hàm lượng hạt sét lớn hơn 50%, sức kháng cắt dư của đất ít có sự thay đổi. Kết quả trên hình 4 cũng cho thấy khi hàm lượng hạt sét trong đất (ngoại trừ đất tro núi lửa) lớn hơn 50%, góc ma sát trong dư của đất giảm không đáng kể. Tương quan hồi quy đơn giản giữa góc ma sát trong dư của đất và hàm lượng hạt sét có thể được thể hiện qua biểu thức: $\phi_p = -0.0016*CF^2 - 0.31*CF + 23.89$ ($R = 0.58$). Tương quan này cho thấy góc ma sát trong dư của đất lớn nhất là 23.89° và nhỏ nhất là 8.8° . Điều này không phù hợp với thực tế, vì vậy tương quan giữa góc ma sát trong dư của đất và hàm lượng hạt sét ít được sử dụng. Dựa trên biểu đồ hình 4, nhóm tác giả đã xây dựng đường bao quan hệ giữa góc ma sát trong dư và hàm lượng sét CF. Có thể thấy rằng, đường bao này bao trùm đường bao do Skempton (1964) đề xuất.



Hình 5. Quan hệ giữa ϕ_r và giá trị chỉ số hoạt động A

Mối quan hệ giữa góc ma sát trong dư và chỉ số hoạt động A được thể hiện trên hình 5. Chỉ số hoạt động A đặc trưng cho khả năng giữ nước của đất loại sét và được xác định là tỷ số giữa chỉ số dẻo và hàm lượng hạt sét ($A = PI/CF$). Hình 5 cho thấy các số liệu phân tán và do đó, góc ma sát trong dư của đất gần như không phụ thuộc (độc lập) vào chỉ số hoạt động A . Suzuki và nnk (2005) cũng cho thấy góc ma sát trong dư và chỉ số hoạt động A gần như không có tương quan với nhau, ngoại trừ đất có chứa khoáng vật smectite. Với đất có chứa smectite, Suzuki và nnk (2005) đã xây dựng tương quan: $\tan\phi_r = 0.201A^{-0.715}$ ($R = 0.646$).

3.3. Kết quả phân tích hồi quy bội

Tương quan hồi quy bội được xây dựng dựa trên 2 hoặc nhiều biến trong các biến $LL(X1)$, $PI(X2)$, $CF(X3)$, $PL/LL(X4)$ và $A(X5)$. Các tương quan này được xây dựng cho đất tự nhiên hoặc đất chế bị (ngoại trừ đất tro bụi núi lửa và đất sét vôi) với tổng số dữ liệu $N = 283$. Tương quan hồi quy tuyến tính bội có dạng:

$$\phi_r = C + aX1 + bX2 + cX3 + dX4 + eX5 \quad (1)$$

Trong đó, C là hằng số; a, b, c, d và e là hệ số hồi quy; $X1-X5$ là các biến.

Kết quả phân tích hồi quy tuyến tính bội được thể hiện trong bảng 3. Có thể thấy, các tương quan hồi quy bội được xây dựng dựa trên các biến LL , PI , CF , PL/LL và A có hệ số xác định R từ 0.65 đến 0.77. Dựa trên kết quả ở bảng 2, góc ma sát trong dư của đất có thể được xác định dựa trên các tương quan hồi quy bội sau:

$$\phi_r = 14.0 - 0.302LL + 0.307PI - 0.047CF + 26.03(PL/LL) \quad (R = 0.77) \quad (2)$$

$$\phi_r = 13.5 - 0.305LL + 0.307PI - 0.039CF + 26.28(PL/LL) + 0.141A \quad (R = 0.77) \quad (3)$$

Bảng 3. Kết quả phân tích hồi quy tuyến tính bội

	C	LL (X1)	PI (X2)	CF (X3)	PL/LL (X4)	A = PI/CF (X5)	R
ϕ_r (độ)	25.4	-0.206	0.136	-	-	-	0.65
	22.4	-	-0.056	-0.114	-	-	0.66
	10.5	-	-	-0.113	19.47	-	0.67
	1.68	-	-	-	28.81	0.318	0.61
	26.6	-0.170	0.121	-0.097	-	-	0.69
	14.0	-0.302	0.307	-0.047	26.03	-	0.77
	13.5	-0.305	0.307	-0.039	26.28	0.141	0.77

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã tổng hợp, phân tích và đánh giá các tương quan xác định góc ma sát trong dư của đất dựa vào các chỉ tiêu Atterberg và hàm lượng hạt sét, đồng thời thiết lập tương quan mới xác định sức kháng cắt dư của đất dựa trên các chỉ tiêu này. Kết quả nghiên cứu rút ra một số kết luận sau:

Tương quan xác định góc ma sát trong dư của đất từ các chỉ tiêu riêng lẻ (LL, PI, CF) thường có hệ số xác định (R) không cao, ngoại trừ một số loại đất đặc trưng. Trong đó, tương quan giữa góc ma sát trong dư và CF ít được sử dụng vì ngoài hàm lượng hạt sét, góc ma sát trong dư của đất còn phụ thuộc nhiều yếu tố khác, đặc biệt là thành phần khoáng vật.

Góc ma sát trong dư của các loại đất nhìn chung giảm dần khi hàm lượng hạt sét, giới hạn chảy và chỉ số dẻo tăng, ngoại trừ đất có nguồn gốc tro bụi núi lửa. Trong đó, mức độ giảm giá trị ϕ_r thể hiện rõ nhất khi giá trị LL tăng đến 100% và PI tăng đến 50%; mức độ giảm giá trị ϕ_r giảm dần khi LL tăng từ 100% đến 200% và PI tăng từ 50% đến 100%; khi LL > 200% và PI > 100%, góc ma sát trong dư của đất giảm không đáng kể. Ngoài ra, góc ma sát trong dư của đất tăng tuyến tính với tỷ số PL/LL ($R = 0.60$) và nó gần như không phụ thuộc vào chỉ số hoạt động A của đất.

Góc ma sát trong dư của đất có thể được xác định dựa trên hàm tương quan tuyến tính bội từ các chỉ tiêu LL, PI, CF, PL/LL và A. Tuy nhiên, cần chú ý giá trị ϕ_r xác định từ các tương quan chỉ mang tính chất tham khảo vì không có tương quan nào đúng cho tất cả các loại đất và có thể dùng nó trong giai đoạn thiết kế sơ bộ.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong Đề tài mã số 105.08-2019.315.

Tài liệu tham khảo

- Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andresen, A., Brown, J.D., 1971. A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength. *Geotechnique* 21, 273-328.
- Collotta, T., Cantoni, R., Pavesi, U., Ruberl, E., Moretti, P.C., 1989. A correlation between residual friction angle, gradation and the index properties of cohesive soils. *Geotechnique* 39, 343-346.
- Di Maio, C., Santoli, L., Schiavone, P., 2004. Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state. *Mechanics of materials* 36, 435-451.
- Duong, N.T., Hao, D.V., 2020. Consolidation Characteristics of Artificially Structured Kaolin-Bentonite Mixtures with Different Pore Fluids. *Advances in Civil Engineering* 2020.
- Duong, N. T., Suzuki, M., Hai, N.V., 2018. Rate and acceleration effects on residual strength of kaolin and kaolin-bentonite mixtures in ring shearing. *Soils. Found.* 58 (5), 1153-1172.
- Fang, C., Shimizu, H., Nishiyama, T., Nishimura, S.-I., 2019. Predicting residual frictional angle by atterberg limits for reservoir embankment soils. *GEOMATE Journal* 17, 111-118.
- Gibo, S., Egashira, K., Ohtsubo, M., 1987. Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan. *Canadian Geotechnical Journal* 24, 456-462.
- Lupini, J.F., Skinner, A.E., Vaughan, P.R., 1981. The drained residual strength of cohesive soils. *Geotechnique* 31, 181-213.

- Mesri, G., Cepeda-Diaz, A.F., 1986. Residual shear strength of clays and shales. *Geotechnique* 36, 269-274.
- Skempton, A.W., 1985. Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique* 35, 3-18.
- Skempton, A.W., 1964. Long-term stability of clay slopes, *Geo-technique. XIV*.
- Stark, T.D., Eid, H.T., 1994. Drained residual strength of cohesive soils. *Journal of Geotechnical Engineering* 120, 856-871.
- Stark, T.D., Hussain, M., 2013. Empirical correlations: drained shear strength for slope stability analyses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139, 853-862.
- Suzuki, M., Tsuzuki, S., Yamamoto, T., 2005. Physical and chemical index properties of residual strength of various soils. *Memoirs Fac. Engineering Yamaguchi University* 56, 1-11.
- Tiwari, B., Ajmera, B., 2012. New correlation equations for compression index of remolded clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138, 757-762.
- Tsiambaos, G., 1991. Correlation of mineralogy and index properties with residual strength of Iraklion marls. *Engineering Geology* 30, 357-369.
- Wesley, L.D., 2003. Residual strength of clays and correlations using Atterberg limits. *Geotechnique* 53, 669-672.
- Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A., Ören, A.H., 2008. Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. *Engineering Geology* 102, 54-61.