

Grzegorz WRZESIŃSKI¹
Zbigniew LECHOWICZ²
Maria Jolanta SULEWSKA³

WPŁYW ŚCIEŻKI NAPRĘŻENIA NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE BEZ ODPŁYWU GRUNTÓW SPOISTYCH

Artykuł prezentuje wyniki badań wytrzymałości na ścinanie bez odpływu przy zastosowaniu dwóch różnych ścieżek naprężenia całkowitego podczas ścinania gruntu w aparacie trójosiowym. Wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu wyznaczono dla rekonstruowanego gruntu spoistego o wskaźnikach: plastyczności $I_p = 34,7\%$ i prekonsolidacji $OCR = 2,7$. Badania wykonano z konsolidacją anizotropową oraz izotropową w warunkach bez odpływu. Uzyskane wyniki umożliwiły stwierdzenie, że przebieg ścieżki naprężenia całkowitego ma istotny wpływ na wytrzymałość na ścinanie bez odpływu.

Słowa kluczowe: wytrzymałość na ścinanie bez odpływu, grunt spoisty, ścieżka naprężenia, aparat trójosiowy

1. Wprowadzenie

Wytrzymałość na ścinanie jest podstawową cechą mechaniczną każdego gruntu spoistego i określa graniczny opór jaki grunt stawia naprężeniom stycznym. Na wartość wytrzymałości na ścinanie wpływają czynniki warunkujące zależność naprężenie-odkształcenie podczas ścinania, czyli: rodzaj i konsystencja gruntu, jego struktura, stan i historia naprężenia oraz warunki obciążenia i odpływu [1, 2, 6]. Szczególnym przypadkiem wytrzymałości na ścinanie gruntu jest wytrzymałość na ścinanie bez odpływu, która określa wartość zmobilizo-

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Grzegorz Wrzesiński, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, tel. 22 5935210, grzegorz_wrzesinski@sggw.pl

² Zbigniew Lechowicz, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, tel. 22 5935220, zbigniew_lechowicz@sggw.pl

³ Maria Jolanta Sulewska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok, tel. 85 7469596, m.sulewska@pb.edu.pl

waną bez rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody w porach. Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu jest więc parametrem opisującym reakcję gruntu obciążonego w warunkach bez odpływu, czyli przy uniemożliwionym odkształceniu objętościowym [3]. Z punktu widzenia inżynierskiego jest to jeden z podstawowych parametrów charakteryzujących właściwości mechaniczne gruntu spoistego, wykorzystywany do projektowania różnego typu konstrukcji geotechnicznych.

W warunkach laboratoryjnych wytrzymałość na ścinanie bez odpływu wyznacza się za pomocą różnych urządzeń; najczęściej wykorzystuje się aparat trójosiowy [4]. Nowoczesny aparat trójosiowy, dzięki odpowiedniej budowie oraz hydraulicznemu sposobowi zadawania obciążenia, pozwala na kontrolowanie naprężeń i warunków brzegowych, co umożliwia poprawne modelowanie zmian obciążenia w warunkach naturalnych. Cechy te sprawiają, że aparat trójosiowy ma przewagę nad pozostałymi urządzeniami laboratoryjnymi do badań wytrzymałościowych gruntu.

Podczas ścinania próbki gruntu w badaniach trójosiowych przy ściskaniu (*TC*) powszechnie wykorzystywana jest ścieżka naprężenia całkowitego polegająca na zwiększaniu naprężenia pionowego przy stałym naprężeniu poziomym. W takim przypadku ścieżka naprężenia całkowitego charakteryzuje się przyrostem dewiatora naprężenia $q = \sigma_1 - \sigma_3$ oraz średniego naprężenia całkowitego $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ przy nachyleniu 3:1. W rzeczywistych warunkach występują jednak różne schematy obciążania podłoża. W związku z powyższym w badaniach laboratoryjnych prowadzonych w aparacie trójosiowym powinno stosować się ścieżkę naprężenia, która możliwie najwierniej odzwierciedli rzeczywiste warunki obciążenia podłoża.

Celem artykułu jest przedstawienie wpływu dwóch wybranych ścieżek naprężenia całkowitego, realizowanych podczas ścinania próbek gruntu spoistego w badaniach przy ściskaniu w aparacie trójosiowym, na wartość wytrzymałości na ścinanie bez odpływu.

2. Badany grunt

Badania przeprowadzono na próbkach gruntu rekonstruowanego, przygotowanych z materiału pobranego z wykopu z głębokości 13,0 m p.p.t., podczas budowy II linii metra w Warszawie, stacji Centrum Nauki Kopernik.

Na podstawie badania składu granulometrycznego analizowanego materiału gruntowego określono zawartości poszczególnych frakcji (tabela 1) i dokonano klasyfikacji gruntu według norm PN-EN ISO 14688-2:2006 i PN-EN ISO 14688-2:2006/Am2:2012 [10] oraz PN-86/B-02480:1986 [8]. Badania wykonano zgodnie z zasadami metody Casagrandego w modyfikacji Prószyńskiego, określając skład granulometryczny metodą sedymentacyjną poprzedzoną metodą sitową. Uzyskane wyniki wskazują, że analizowanym gruntem spoistym według

Tabela 1. Zestawienie wybranych właściwości fizycznych badanego gruntu [7]

Table 1. Index properties of tested soil [7]

w_n [%]	w_L [%]	w_P [%]	I_P [%]	I_L [-]	I_C [-]	Zawartość frakcji wg PN-EN ISO 14688:2006 [%]				Zawartość frakcji wg PN-86/B-02480 [%]			
						gr	sa	si	cl	f_z	f_p	f_π	f_i
28,7	59,0	24,3	34,7	0,13	0,87	0	21	50	29	0	25	46	29

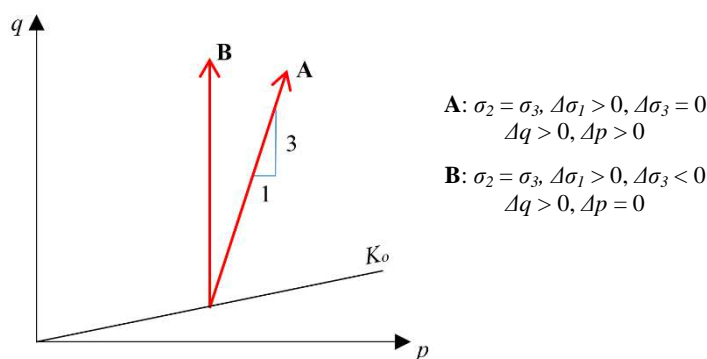
Objaśnienia: w_n – wilgotność naturalna; w_L – granica płynności; w_P – granica plastyczności; I_P – wskaźnik plastyczności; I_L – stopień plastyczności; I_C – wskaźnik konsystencji; f_z , gr – frakcja żwirowa; f_p , sa – frakcja piaszkowa; f_π , si – frakcja pyłowa; f_i , cl – frakcja łuwa.

PN-EN ISO 14688-2:2006 oraz PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012 był ił z pyłem i piaskiem (*sasiCl*), natomiast według PN-86/B-02480:1986 grunt określono jako glinę zwięzłą (G_c). Wilgotność naturalną gruntu pobranego z wykopu oraz granice Atterberga w_L i w_P zbadano według PN-88/B-04481:1988 [9].

3. Metoda badań

Badania rozpoczynano od przygotowania próbek gruntu rekonstruowanego o parametrach zestawionych w tabeli 1. Metodę przygotowania próbek rekonstruowanych w kształcie walca o wysokości 100 mm i średnicy 50 mm szczegółowo przedstawiono w rozprawie doktorskiej [7]. Badania zasadnicze w aparacie trójosiowym przeprowadzono w Laboratorium Centrum Wodne SGGW w Warszawie. Proces badawczy każdej próbki gruntu składał się z kilku kolejnych etapów: wstępne nasączenie czyli tzw. *flushing*, właściwe nasączenie, konsolidacja, odprężenie oraz ścinanie próbki. Wstępne nasączenie polegało na przepuszczeniu wody przez próbkę przy otwartym zaworze wody połączonym przewodem z górną częścią próbki. Na tym etapie próbka obciążana była izotropowo naprężeniem równym 80 kPa, przy ciśnieniu wyrównawczym wynoszącym 50 kPa, będącym czynnikiem wymuszającym przepływ wody przez próbkę. Proces ten prowadzono do momentu usunięcia większych pęcherzyków powietrza z przewodów ciśnieniowych. Następnie wykonywano właściwe nasączenie próbki gruntu metodą ciśnienia wyrównawczego, tzw. *back pressure* [5]. Podczas tego etapu badania próbka była obciążana izotropowo przy stałej wartości naprężenia efektywnego wynoszącej 30 kPa. Etap ten składał się z kilku faz, podczas których ciśnienie w komorze oraz ciśnienie wyrównawcze zwiększano równocześnie w taki sposób, aby naprężenie efektywne w próbce było stałe. Na koniec każdej fazy sprawdzano wartość parametru Skemptonia B jako reakcję próbki na zmianę przyłożonego obciążenia. Etap nasączenia kończono, gdy parametr Skemptonia B osiągał wartość powyżej 0,95. Po zakończonym etapie nasączenia przeprowadzano konsolidację, która trwała do całkowitego rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody w porach. Konsolidację przeprowadzano w warunkach K_o przy naprężeniach efektywnych 2,7 razy większych od wartości

pionowego naprężenia efektywnego występującego w warunkach *in situ*, tzn. przy $\sigma'_1 = \sigma'_3 = 594$ kPa. Wartości te były zdefiniowane przez istniejące w warunkach *in situ* wskaźnik prekonsolidacji $OCR = 2,7$. Po zakończeniu etapu konsolidacji następowało odprężenie próbki gruntu do wartości naprężeń efektywnych $\sigma'_1 = 220$ kPa i $\sigma'_3 = 183$ kPa w badaniach *TXCAU* (z konsolidacją anizotropową i ścinaniem w warunkach bez odpływu) oraz wartości naprężeń efektywnych $\sigma'_1 = \sigma'_3 = 220$ kPa w badaniach *TXCIU* (z konsolidacją izotropową i ścinaniem w warunkach bez odpływu). Etap ten trwał do ustabilizowania się dopływu wody do próbki. Kolejny etap polegał na ścinaniu próbek z prędkością 1,2 mm/h przy uniemożliwionym odpływie wody. W badaniach *TXCAU* próbkę ścinano stosując dwie różne ścieżki naprężenia całkowitego: podstawową zaznaczoną jako *A* na rysunku 1, charakteryzującą się przyrostem dewiatora naprężenia q i średniego naprężenia całkowitego p przy nachyleniu 3:1 oraz ścieżkę zaznaczoną jako *B* na rysunku 1, polegającą na przyroście dewiatora naprężenia q przy stałym średnim naprężeniu całkowitym $p = const$. W badaniu *TXCIU* przyjęto wyłącznie podstawową ścieżkę naprężenia całkowitego *A*.



Rys. 1. Schematy *A* i *B* ścieżek naprężenia całkowitego stosowanych przy ścinaniu próbek gruntu w aparacie trójosiowym

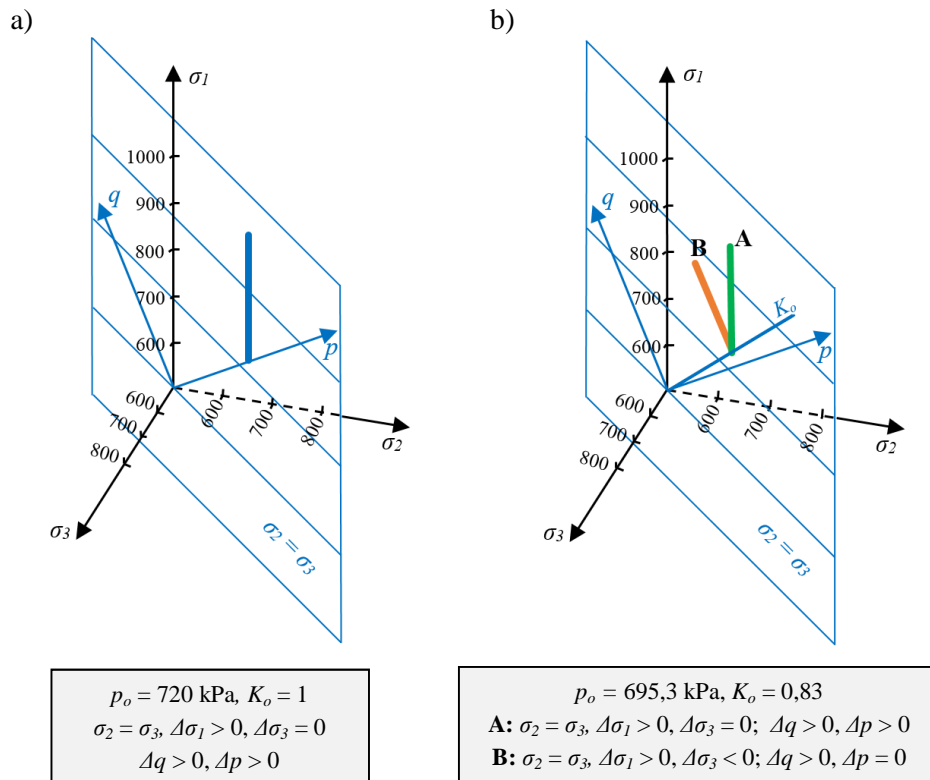
Fig. 1. Scheme *A* and *B* of total stress paths applied during shearing of the soil samples in triaxial tests

4. Wyniki badań

Badania wykonane w aparacie trójosiowym umożliwiły uzyskanie charakterystyk naprężenie-odkształcenie, które posłużyły do określenia wytrzymałości gruntu na ścinanie bez odpływu. Wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu wyznaczono, przyjmując dwa kryteria zniszczenia: maksymalną wartość dewiatora naprężenia oraz maksymalną wartość stosunku efektywnych naprężeń głównych. Ścieżki naprężenia całkowitego przedstawione w przestrzeni naprężeń głównych (σ_1 - σ_2 - σ_3) przy początkowej wartości średniego naprężenia całkowitego p_o przedstawiono na rysunku 2, natomiast ścieżki naprężenia efektywne-

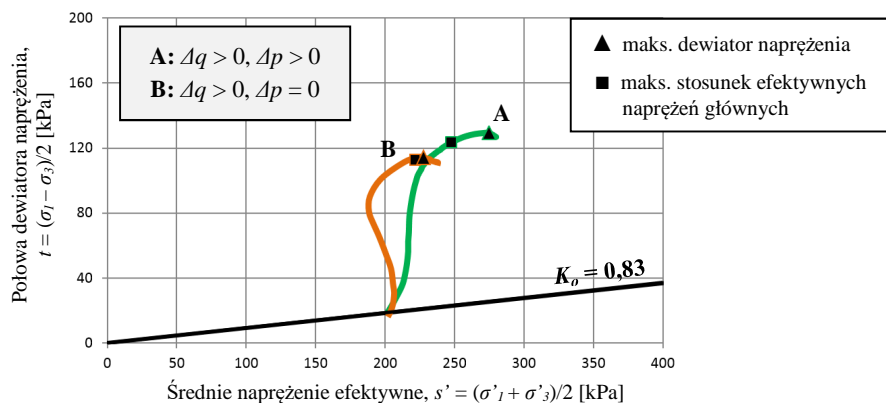
go pokazano na płaszczyźnie połowa dewiatora naprężenia-średnie naprężenie efektywne ($t-s'$) na rysunku 3. W tabeli 2 zestawiono otrzymane wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu oraz wartości znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie bez odpływu przy przyjęciu poszczególnych kryteriów zniszczenia dla badań typu *TXCIU* oraz *TXCAU*.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że na wartość wytrzymałości na ścinanie bez odpływu wpływają warunki konsolidacji oraz przyjęta ścieżka naprężenia całkowitego podczas ścinania gruntu. Największą wartość wytrzymałości na ścinanie bez odpływu otrzymano w badaniu, w którym przeprowadzono izotropową konsolidację i ścinano próbki stosując podstawową ścieżkę naprężenia całkowitego A, charakteryzującą się przyrostem dewiatora naprężenia q i średniego naprężenia całkowitego p przy nachyleniu 3:1 dla oby-



Rys. 2. Ścieżki naprężenia całkowitego w odniesieniu do przestrzeni naprężeń głównych (σ_1 - σ_2 - σ_3) dla rekonstruowanego łu z pyłem i piaskiem (*sasiCl*) w badaniach typu: a) *TXCIU*, b) *TXCAU* [7]

Fig. 2. Total stress paths in principal stress space (σ_1 - σ_2 - σ_3) for reconstituted sandy silty clay (*sasiCl*): a) *TXCIU* test, b) *TXCAU* tests [7]



Rys. 3. Ścieżki naprężenia efektywnego na płaszczyźnie połowa dwiatora naprężenia-średnie naprężenie efektywne ($t-s'$) dla rekonstruowanego iłu z pyłem i piaskiem (*sasiCl*) w badaniach typu *TXCAU* [7]

Fig. 3. Effective stress paths in half of deviator stress-effective mean stress plane ($t-s'$) for reconstituted sandy silty clay (*sasiCl*) in *TXCAU* tests [7]

Tabela 2. Wyniki badań przeprowadzonych w aparacie trójosiowym rekonstruowanego iłu z pyłem i piaskiem (*sasiCl*) [7]

Table 2. Triaxial test results for reconstituted sandy silty clay (*sasiCl*) [7]

Kryterium zniszczenia	Typ konsolidacji	Ścieżka naprężenia całkowitego podczas ścinania	Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu τ_{fu} [kPa]	Znormalizowana wytrzymałość na ścinanie bez odpływu τ_{fu}/σ'_{v0} [-]
Maksymalny dwiator naprężenia q	Izotropowa $\sigma'_1 = \sigma'_3 = 220$ kPa	$\Delta q > 0, \Delta p > 0$	132,6	0,603
	Anizotropowa $\sigma'_1 = 220$ kPa $\sigma'_3 = 183$ kPa	$\Delta q > 0, \Delta p > 0$	129,2	0,587
		$\Delta q > 0, \Delta p = 0$	113,9	0,518
Maksymalny stosunek efektywnych naprężeń głównych σ'_1/σ'_3	Izotropowa $\sigma'_1 = \sigma'_3 = 220$ kPa	$\Delta q > 0, \Delta p > 0$	128,3	0,583
	Anizotropowa $\sigma'_1 = 220$ kPa $\sigma'_3 = 183$ kPa	$\Delta q > 0, \Delta p > 0$	123,1	0,560
		$\Delta q > 0, \Delta p = 0$	111,4	0,506

dwu przyjętych kryteriów zniszczenia. W badaniu z zastosowaniem tej samej ścieżki naprężenia całkowitego przy ścinaniu próbki, ale przy konsolidacji anizotropowej, otrzymano wytrzymałość na ścinanie bez odpływu mniejszą o około 3% stosując maksymalną wartość dwiatora naprężenia jako kryterium znisz-

czenia (Tabela 2). W przypadku badania z anizotropową konsolidacją, ale z zastosowaniem ścieżki naprężenia całkowitego B polegającej na przyroście dewiatora naprężenia q przy stałym średnim naprężeniu całkowitym p otrzymano wartość analizowanego parametru o prawie 15% mniejszą w porównaniu z badaniem w warunkach konsolidacji izotropowej przy zastosowaniu maksymalnej wartości dewiatora naprężenia jako kryterium zniszczenia. Większych różnic w wartościach wytrzymałości na ścinanie bez odpływu w porównaniu z otrzymanymi należy spodziewać się przy wartościach współczynnika parcia bocznego w spoczynku mniejszych niż $K_o = 0,83$.

5. Podsumowanie

Ocenę wpływu ścieżki naprężenia całkowitego na wytrzymałość na ścinanie bez odpływu przeprowadzono na przykładzie badań trójosiowych wykonanych na rekonstruowanym gruncie spoistym o wskaźnikach: plastyczności $I_p = 34,7\%$ oraz prekonsolidacji $OCR = 2,7$. Badania wykazały, że przebieg ścieżki naprężenia podczas ścinania próbki oraz warunki konsolidacji wpływają istotnie na wartość wytrzymałości na ścinanie bez odpływu. Największą wartość wytrzymałości na ścinanie gruntu otrzymano w badaniu, w którym przeprowadzono izotropową konsolidację i ścinano próbki stosując ścieżkę naprężenia całkowitego charakteryzującą się przyrostem dewiatora naprężenia q i średniego naprężenia całkowitego p przy nachyleniu 3:1. Najmniejszą wartość wytrzymałości na ścinanie otrzymano w badaniu z anizotropową konsolidacją i ścinaniem próbki przy ścieżce naprężenia polegającej na przyroście dewiatora naprężenia q przy stałym średnim naprężeniu całkowitym p .

Otrzymane wyniki badań wskazują, że wykonując badania wytrzymałości na ścinanie bez odpływu w aparacie trójosiowym, wskazane jest stosowanie ścieżki naprężenia całkowitego odzwierciedlającej schemat obciążenia gruntu w warunkach terenowych. Umożliwia to w warunkach laboratoryjnych odtworzenie rzeczywistego zachowania się gruntu.

Badania wytrzymałości na ścinanie bez odpływu należy rozszerzyć o inne ścieżki naprężenia całkowitego, możliwe do zrealizowania w aparacie trójosiowym. W celu określenia wpływu naturalnej struktury gruntów spoistych na wytrzymałość na ścinanie bez odpływu przy zastosowaniu poszczególnych ścieżek naprężenia, należy wykonać badania w aparacie trójosiowym na próbkach o nienaruszonej strukturze (NNS) charakteryzujących się różnymi wartościami następujących parametrów: wskaźnika prekonsolidacji OCR , współczynnika parcia bocznego w spoczynku K_o oraz wskaźnika plastyczności I_p .

Literatura

- [1] Jardine R.J.: One perspective of the pre-failure deformation characteristics of some geomaterials. *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Rotterdam, 1995, pp. 855-885.
- [2] Lechowicz Z.: Badania doświadczalne, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4, 2003, s. 111-118.
- [3] Lipiński M.J.: Wybrane kryteria określania parametrów geotechnicznych, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4, 2012, s. 267-277.
- [4] Lipiński M.J.: Kryteria wyznaczania parametrów geotechnicznych, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2013.
- [5] Lipiński M.J., Wdowska M.: Saturation criteria for heavy overconsolidated cohesive soils, *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW*, No. 42 (2), 2010, pp. 295-302.
- [6] Tymiński W., Kiełczewski T.: Wpływ wskaźnika plastyczności na parametry wytrzymałościowe gruntów, *Acta Scientiarum Polonorum Architectura*, nr 12 (2), 2013, s. 73-82.
- [7] Wrzeński G.: Analiza stateczności nasypu z uwzględnieniem zmiany kierunków składowych głównych naprężeń na wytrzymałość na ścinanie podłoża gruntowego, Praca doktorska, SGGW, Warszawa 2016 [maszynopis].
- [8] PN-86/B-02480:1986 - Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- [9] PN-88/B-04481:1988 - Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- [10] PN-EN ISO 14688-2:2006 - Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania. + PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012.

Badania zostały zrealizowane w ramach prac nr S/WBiŚ/6/2013 oraz nr 505200052800 M00434-99 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW

INFLUENCE OF STRESS PATH ON UNDRAINED SHEAR STRENGTH IN COHESIVE SOILS

Summary

The paper presents triaxial test results of undrained shear strength applying two selected stress paths during shearing of the cohesive soil. The undrained shear strength τ_{fu} was determined for reconstituted sandy silty clay (*sasiCl*) characterized by overconsolidation ratio $OCR = 2.7$ and plasticity index $I_p = 34.7\%$. Anisotropic and isotropic consolidation in consolidated-undrained triaxial compression tests were performed. The test results allow to assess influence of the stress path and consolidation condition on the undrained shear strength in the triaxial compression tests.

Keywords: undrained shear strength, cohesive soil, stress path, triaxial apparatus

Przesłano do redakcji: 07.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2016 r.

DOI: 10.7862/rb.2016.68