

# ANIZOTROPIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE BEZ ODPLYWU GRUNTÓW SPOISTYCH W CYLINDRYCZNYM APARACIE SKRĘTNYM

Dariusz KIZIEWICZ, Zbigniew LECHOWICZ\*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w cylindrycznym aparacie skrętnym HCA (*Hollow Cylinder Apparatus*) na gruncie spoistym o wskaźniku plastyczności  $I_p = 10,5\%$ . Celem badań było wyznaczenie wytrzymałości na ścinanie bez odpływu przy różnych wartościach kąta obrotu kierunków naprężeń głównych  $\alpha$ . Badania przeprowadzono przy kątach  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  i  $90^\circ$  dla rekonstruowanego gruntu spoistego (piasku ilastego cISa) o współczynniku prekonsolidacji  $OCR = 1$  i  $8$ . Badania w cylindrycznym aparacie skrętnym realizowane były z konsolidacją anizotropową oraz ścinaniem w warunkach bez odpływu przy ścieżce naprężenia polegającej na wzroście dewiatora naprężenia  $q$  przy stałej wartości naprężenia średniego  $p$  oraz stałej wartości współczynnika pośredniego naprężenia głównego  $b$ . Uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę wpływu zmiany kierunku naprężeń głównych na wartość wytrzymałości na ścinanie bez odpływu.

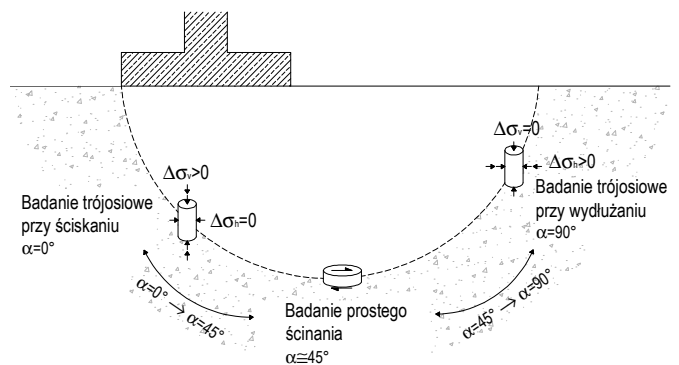
*Słowa kluczowe:* wytrzymałość na ścinanie bez odpływu, cylindryczny aparat skrętny, grunt spoisty.

## 1. Wprowadzenie

W przypadku posadowienia fundamentów bezpośrednich na gruntach spoistych, zgodnie z Eurokodem 7, konieczna jest ocena nośności podłoża w warunkach bez odpływu. W praktyce zakłada się, że wytrzymałość na ścinanie bez odpływu  $\tau_{fu}$  wzdłuż całej potencjalnej powierzchni zniszczenia jest jednakowa. W rzeczywistości, w poszczególnych jej strefach obserwuje się różne mechanizmy mobilizowania wytrzymałości na ścinanie wynikające ze zmiany kierunków naprężeń głównych, z którymi związane są różne wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu. Zjawisko obrotu kierunków naprężeń głównych jest powszechną cechą ścieżek naprężenia obserwowanych *in situ* nie tylko w przypadku fundamentów bezpośrednich, ale również w przypadku nasypów, wykopów czy tuneli (Bjerrum, 1973; Pradhan i in., 1988; Jardine, 1995, Neher i in., 2002).

Rozwiązaniem tego problemu może być użycie odpowiedniej kombinacji wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu  $\tau_{fu}$ , otrzymanych z badań odpowiadających różnym strefom powierzchni poślizgu (rys. 1). Istnieją też metody, które w sposób sformalizowany uwzględniają zmianę wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu w zależności

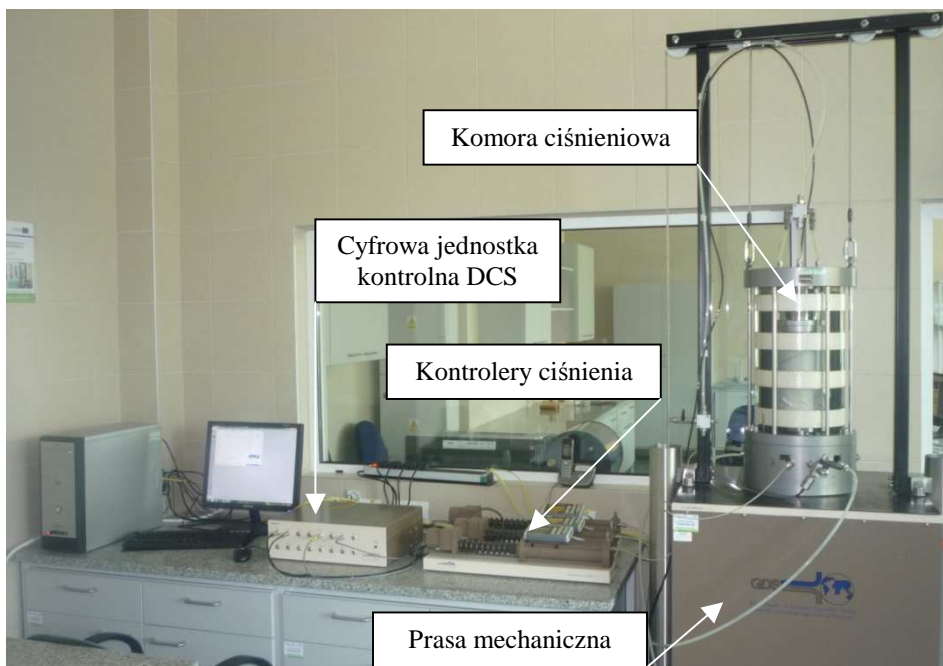
od kąta  $\alpha$  w mechanizmie górnego oszacowania nośności podłoża (Kiziewicz, 2012).



Rys. 1 Różne mechanizmy zniszczenia w podłożu fundamentu bezpośredniego

Urządzeniem, które pozwala na uzyskanie w warunkach laboratoryjnych kontrolowanego obrotu kierunków naprężeń głównych jest cylindryczny aparat skrętny HCA (*Hollow Cylinder Apparatus*), pokazany na rysunku 2. Wykorzystany w badaniach aparat HCA, który jest na wyposażeniu „Centrum Wodnego” Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie, zakupiono w ramach Programu

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: zbigniew\_lechowicz@sggw.pl



Rys. 2. Ogólny widok cylindrycznego aparatu skrętnego (Kiziewicz, 2012)

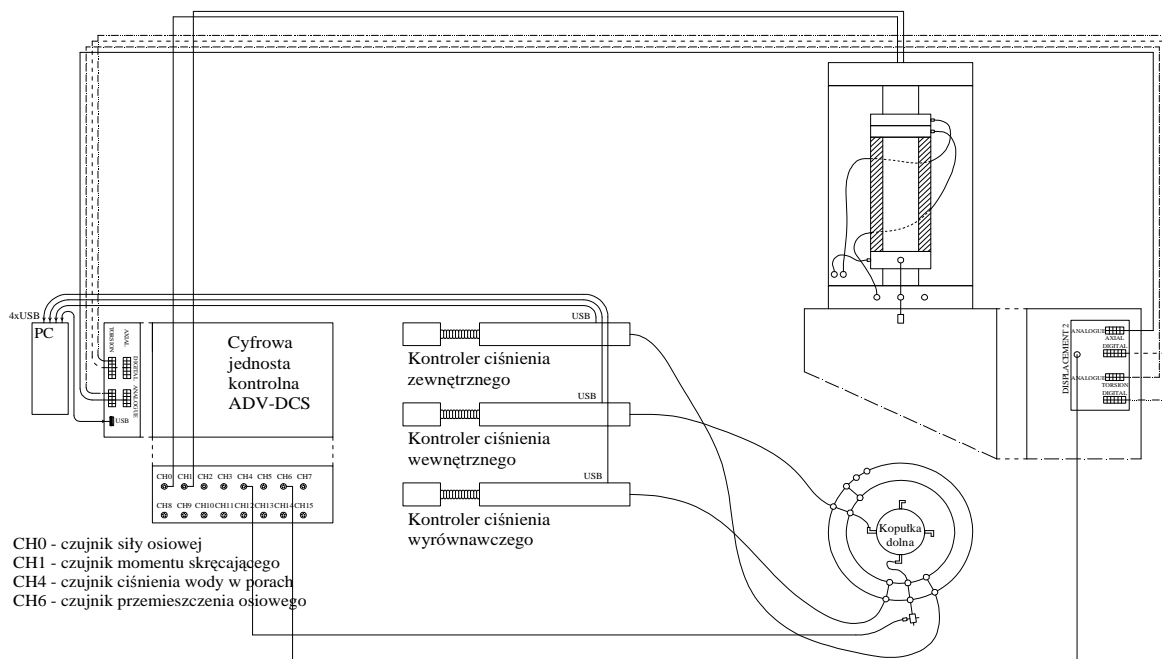
Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko, Działanie 13.1 priorytet XIII w 2010 roku.

Głównymi elementami urządzenia są prasa mechaniczna, komora ciśnieniowa, trzy kontrolery ciśnienia, jednostka sterująca oraz komputer z zainstalowanym oprogramowaniem (rys. 3). Badane próbki są w kształcie wydrążonego walca o wysokości 200 mm oraz średnicach zewnętrznej i wewnętrznej wynoszących odpowiednio 100 mm i 60 mm (rys. 4). Dzięki zastosowanemu w aparacie HCA systemowi obciążenia, którego głównymi elementami są możliwość przekazania na próbkę momentu skręcającego oraz zadania dwóch różnych składowych bocznych naprężenia

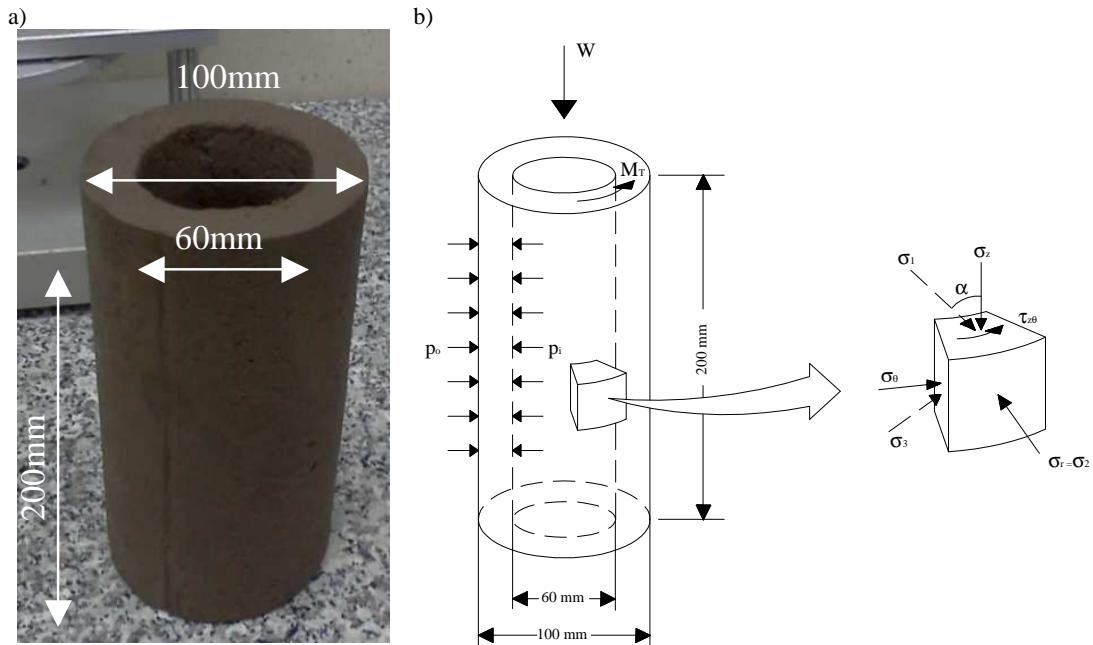
– wewnętrznej i zewnętrznej, możliwe jest otrzymanie w ścianie próbki czterech różnych wartości składowych tensora naprężenia (rys. 4):

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_z & \tau_{z\theta} & 0 \\ \tau_{\theta z} & \sigma_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_r \end{pmatrix} \text{ przy czym } \tau_{z\theta} = \tau_{\theta z} \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma_z$  jest składową pionową naprężenia,  $\sigma_r$  jest składową promieniową naprężenia,  $\sigma_\theta$  jest składową obwodową naprężenia, a  $\tau_{z\theta}$  i  $\tau_{\theta z}$  są składowymi stycznymi naprężenia.



Rys. 3. Schemat elementów składowych cylindrycznego aparatu skrętnego (Kiziewicz, 2012)



Rys. 4. Próbkę w kształcie wydrążonego walca: a) widok, b) schemat obciążeń

Element pierwszy powoduje powstawanie w płaszczyźnie prostopadłej do osi próbki składowej stycznej naprężenia. Element drugi umożliwia otrzymanie trzech różnych wartości naprężeń głównych. Pod tym względem cylindryczny aparat skrętny posiada przewagę względem aparatu trójosiowego, który pozwala na niezależną kontrolę jedynie dwóch składowych tensora naprężenia.

Przekazanie na próbkę momentu skręcającego realizowane jest poprzez obrót podstawy próbki. Możliwe jest to dzięki połączeniu pręta, podpierającego podstawę, na którym znajduje się wałek wielowypustowy za pośrednictwem paska zębatego z silnikiem elektrycznym wywołującym jego ruch obrotowy. Za drugi ze stopni swobody podstawy próbki – ruch osiowy odpowiedzialny jest drugi silnik elektryczny, który również poprzez pasek zębate, połączony jest z podstawą śruby kulowej przymocowanej do podstawy prasy mechanicznej. Obrót śruby powoduje ruch pionowy nakrętki, który dalej przekazywany jest na pręt połączony z podstawą próbki (Bilé Serra i Hooker, 2003). Wykorzystanie próbek w kształcie wydrążonego walca, przy szczelnym oddzieleniu gumowymi membranami objętości wewnętrznej próbki od objętości wewnętrznej komory, umożliwia obciążenie ścianki próbki dwiema różnymi składowymi bocznymi naprężeniami, kontrolowanymi przez dwa kontrolery ciśnienia.

## 2. Metodyka badań w cylindrycznym aparacie skrętnym

Badania w cylindrycznym aparacie skrętnym wykonano w dwóch seriach charakteryzujących się różnymi wartościami wskaźnika prekonsolidacji  $OCR = 1$  oraz  $8$ . Pojedyncza seria składała się z pięciu badań typu CAU, to znaczy z konsolidacją anizotropową i ścinaniem

w warunkach bez odptywu. Podczas każdego etapu ścinania utrzymywana była stała wartość kąta obrotu kierunków naprężeń głównych  $\alpha$ , które wynosiły  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $90^\circ$ . Badania wykonane zostały przy stałej wartości współczynnika pośredniego naprężenia głównego  $b$ :

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (2)$$

gdzie:  $\sigma_1$  jest największym naprężeniem głównym,  $\sigma_2$  jest pośrednim naprężeniem głównym, a  $\sigma_3$  jest najmniejszym naprężeniem głównym.

Współczynnik pośredniego naprężenia głównego  $b$  we wszystkich badaniach, oprócz przypadku gdy  $\alpha = 45^\circ$ , wynosił  $0,5$ . Przy takiej wartości  $b$  obserwuje się warunki płaskiego stanu odkształcenia (Zdravković i Jardine, 2001). W celu uniknięcia niejednorodności stanu naprężenia i odkształcenia w próbce gruntowej, dla  $\alpha = 45^\circ$  przyjęto wartość  $b = 0,3$ . Pozwala to na uniknięcie tak zwanych stref „no-go” określonych w przestrzeni  $b$ - $\alpha$  przez Sayao i Vaida (1991), w których występuje nasilenie tego zjawiska.

Badanie w aparacie HCA było rozpoczynane od etapu nasączenia, który polegał na jednoczesnym podnoszeniu izotropowego obciążenia zewnętrznego działającego na próbkę oraz ciśnienia wyrównawczego podawanego do wnętrza próbki, przy utrzymywaniu stałej wartości izotropowego naprężenia efektywnego. Proces nasączenia kończony był w momencie uzyskania wartości parametru Skemptonu  $B$  większej niż  $0,9$ . Etap konsolidacji w przypadku  $OCR = 1$  przeprowadzany był w dwóch etapach, natomiast przy  $OCR = 8$  w trzech. Pierwszy z nich polegał na przyroście wartości efektywnego naprężenia pionowego do wartości dwukrotnie większej niż efektywne naprężenie poziome. Drugi etap stanowił właściwy proces konsolidacji, który prowadzony był

w warunkach anizotropowego stanu naprężenia przy współczynniku parcia spoczynkowego  $K_0 = 0,5$ . Przy  $OCR = 8$  dalej następował trzeci etap, polegający na odciążeniu próbki do wartości współczynnika  $K_0 = 1,4$ . Podczas powyżej opisanych etapów ruch wody w próbce umożliwiony był jedynie do góry. Po zakończeniu procesu konsolidacji lub konsolidacji i odciążania, rozpoczynane były etapy zmiany parametru  $b$  oraz kąta  $\alpha$ . Proces ścinania próbek przeprowadzany był przy ścieżce naprężenia, polegającej na przyroście dewiatora naprężenia  $q$  przy stałej wartości średniego naprężenia głównego  $p$  w warunkach bez odpływu, przy stałych wartościach parametru pośredniego naprężenia głównego  $b$  oraz kąta obrotu kierunków naprężeń głównych  $\alpha$ .

### 3. Charakterystyka badanego gruntu

W badaniach wykorzystywano grunt rekonstruowany – piasek ilasty (clSa) o wartości granicy plastyczności  $w_p = 8,7\%$ , granicy płynności  $w_L = 19,2\%$  i wynikającej z nich wartości wskaźnika plastyczności  $I_p = 10,5\%$ . Krzywą uziarnienia wykorzystywanego materiału gruntowego pokazano na rysunku 5.

W tabeli 1 przedstawione zostały początkowe parametry charakteryzujące próbki poddane badaniom przed etapem ścinania – wskaźnik prekonsolidacji  $OCR$ , wilgotność  $w_n$ , wskaźnik konsystencji  $I_C$ , składowa

pienowa naprężenia efektywnego  $\sigma'_{vo}$ , naprężenie prekonsolidacji  $\sigma'_p$  oraz współczynnik parcia spoczynkowego  $K_0$ .

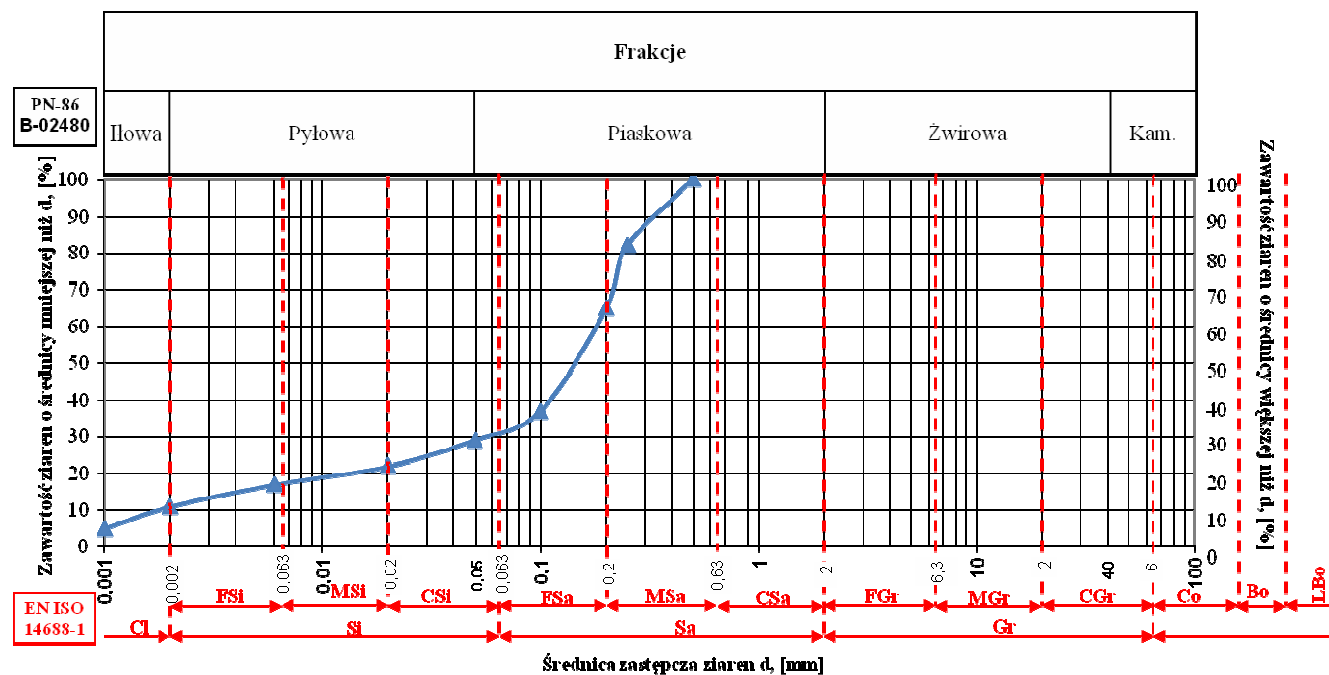
### 4. Wyniki badań wytrzymałościowych w cylindrycznym aparacie skrętnym

W sumie wykonano 10 badań typu CAU, przy czym każda ze ścieżek naprężenia w obrębie jednej serii badań w HCA, w układzie osi  $p$ - $q$ - $\alpha$  realizowana była w innej płaszczyźnie ze względu na różną, stałą na etapie ścinania, wartość kąta obrotu kierunków naprężeń głównych  $\alpha$ . Podstawowe charakterystyki, które przedstawiono dla każdej serii (rys. 6-8 oraz 9-11) to:

- dewiator naprężenia w zależności od odkształcenia pionowego,
- ścieżki naprężenia efektywnego w układzie osi  $p'$ - $q$ ,
- ścieżki naprężenia efektywnego w układzie osi  $(\sigma'_z - \sigma'_\theta)/2 - \tau_{z\theta}$ .

Ze względu na progresywny charakter procesu mobilizowania wytrzymałości na ścinanie wstępnie wykorzystano trzy kryteria zniszczenia próbek:

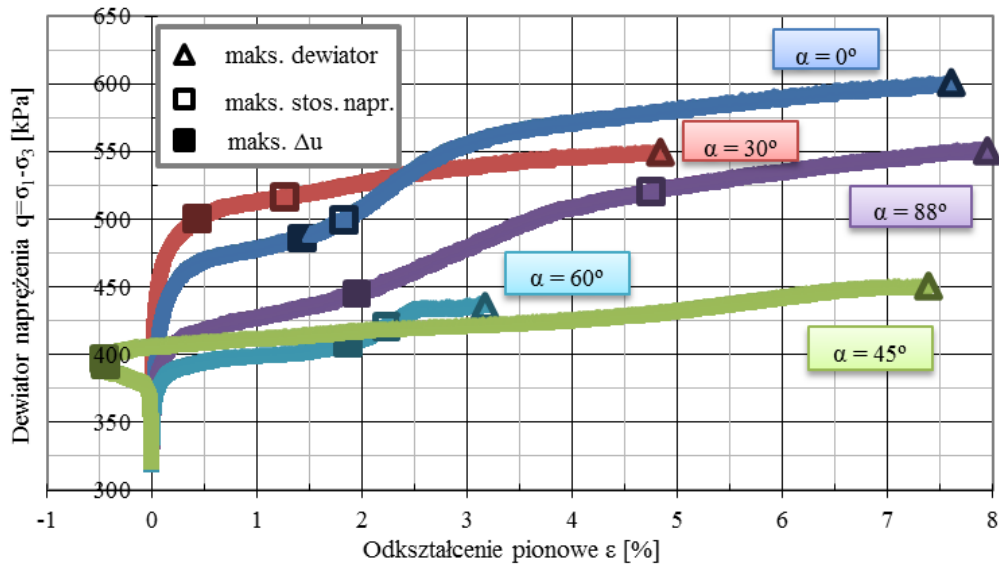
- maksymalną wartość dewiatora naprężenia,
- maksymalną wartość stosunku naprężeń głównych,
- maksymalną wartość przyrostu ciśnienia wody w porach.



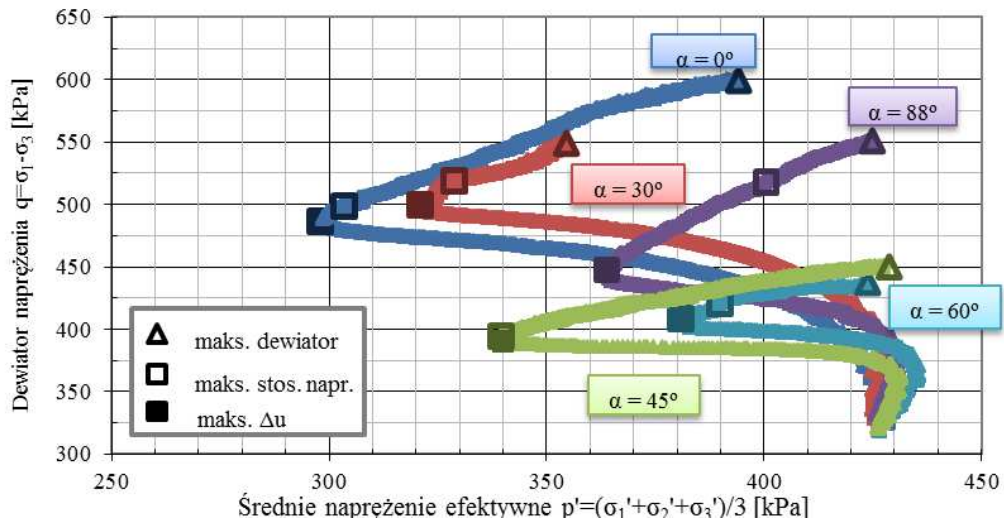
Rys. 5. Krzywa uziarnienia badanego gruntu

Tab. 1 Początkowe parametry i właściwości fizyczne próbek poddanych badaniom

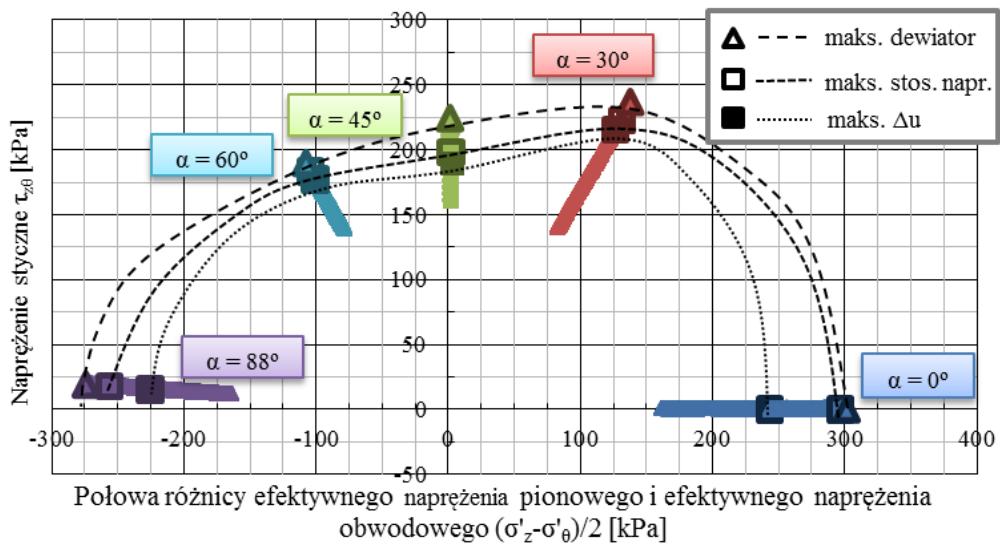
$OCR$ [-]	$w_n$ [%]	$I_C$ [-]	$\sigma'_{vo}$ [kPa]	$\sigma'_p$ [kPa]	$K_0$ [-]
1	9,7	0,90	640	-	0,5
8	10,0	0,87	80	640	1,4



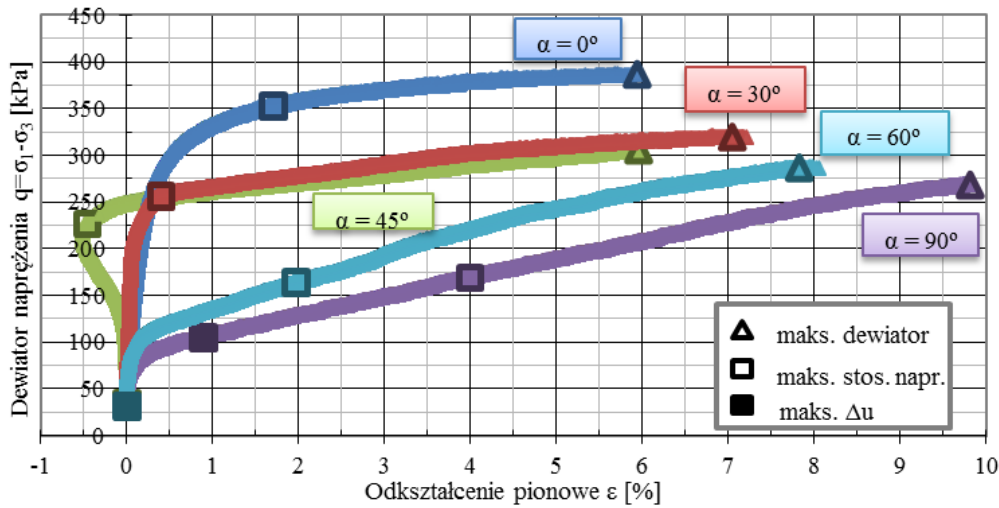
Rys. 6. Charakterystyka deviator naprężenia – odkształcenie pionowe z badań HCA CAU przy  $OCR = 1$



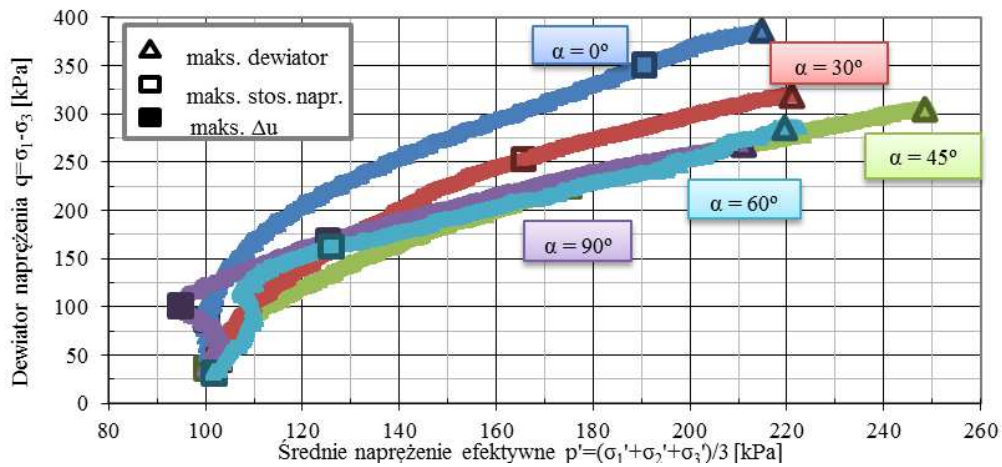
Rys. 7. Ścieżki naprężenia efektywnego z badań HCA CAU przy  $OCR = 1$



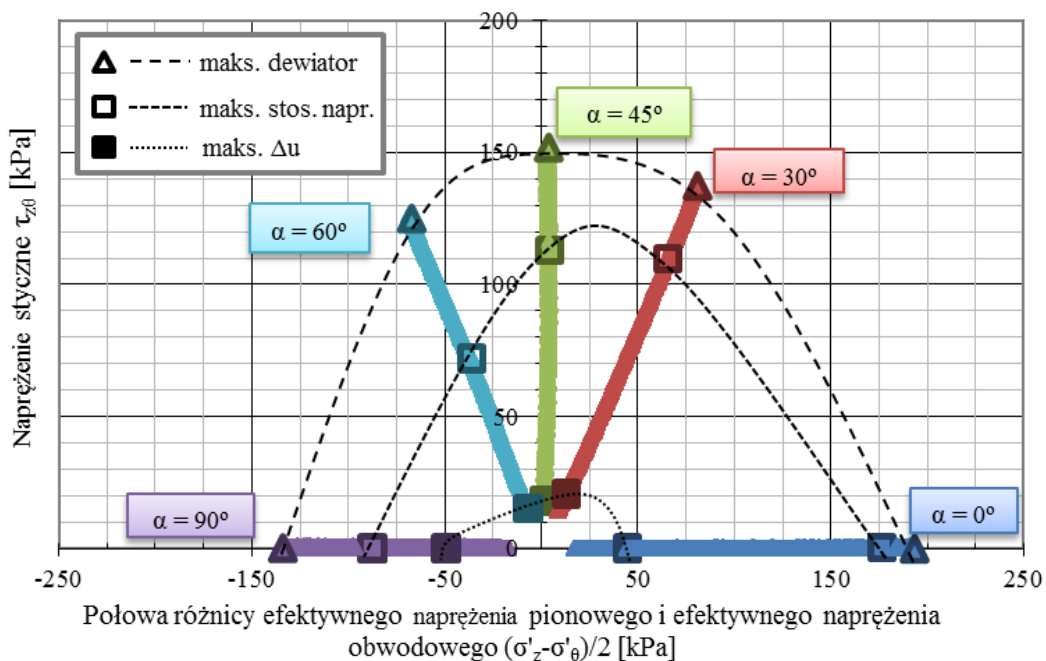
Rys. 8. Ścieżki naprężenia efektywnego w układzie osi  $(\sigma'_z - \sigma'_\theta)/2 - \tau_{\theta 0}$  z badań HCA CAU przy  $OCR = 1$



Rys. 9. Charakterystyka dewiator naprężenia – odształcenie pionowe z badań HCA CAU przy  $OCR = 8$



Rys. 10. Ścieżki naprężenia efektywnego z badań HCA CAU przy  $OCR = 8$



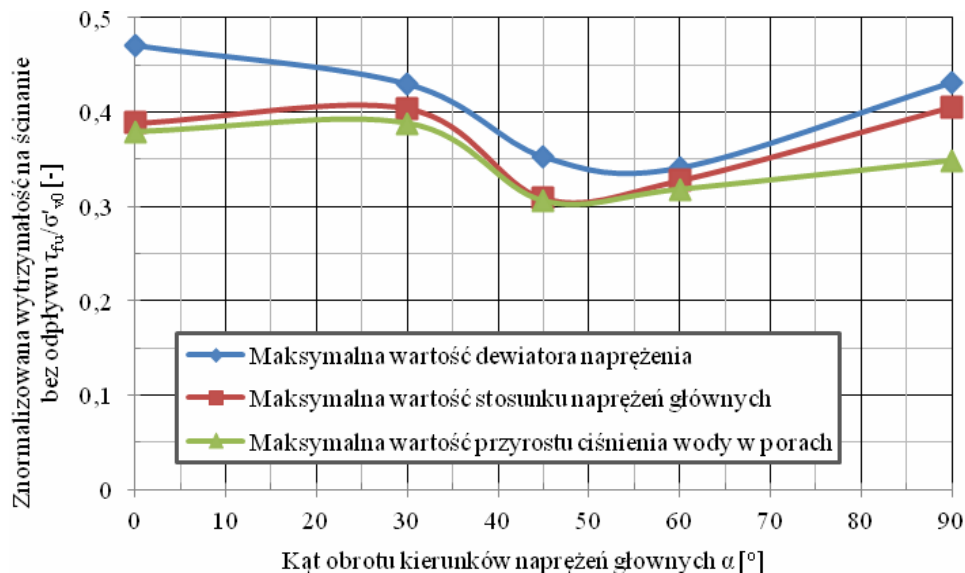
Rys. 11. Ścieżki naprężenia efektywnego w układzie osi  $(\sigma'_z - \sigma'_\theta)/2 - \tau_{z\theta}$  z badań HCA CAU przy  $OCR = 8$

Wyniki poszczególnych badań pokazują wyraźnie odmienny przebieg charakterystyk w zależności od wartości kąta obrotu kierunków naprężeń głównych na etapie ścinania. Anizotropia właściwości mechanicznych badanego gruntu jest szczególnie widoczna na rysunkach 8 oraz 11, które przedstawiają ścieżki naprężenia efektywnego oraz obwiednie zniszczenia w układzie osi  $(\sigma'_z - \sigma'_\theta)/2 - \tau_z\theta$ .

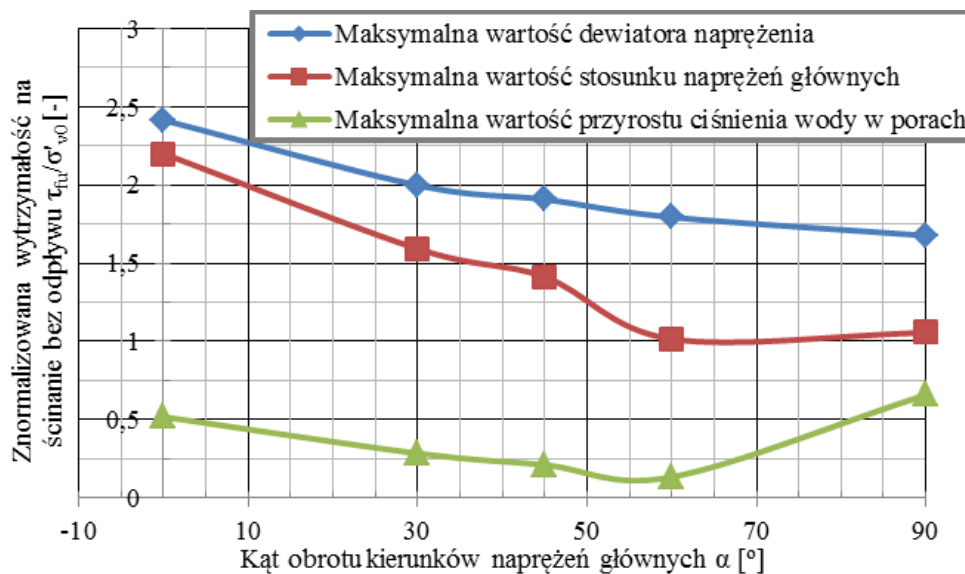
## 5. Ocena anizotropii wytrzymałości na ścinanie bez odpływu $\tau_{fu}$

Najczęściej stosowanym kryterium zniszczenia jest wystąpienie maksymalnej wartości dewiatora naprężenia, jednakże z uwagi na prowadzenie badania w warunkach kontroli naprężenia i związany z tym przyrost różnicy efektywnych naprężeń głównych  $\sigma'_1$  i  $\sigma'_3$  przy dużych odkształceniach, bardziej odpowiednie okazało się

kryterium maksymalnej wartości stosunku efektywnych naprężeń głównych. Rysunki 12 i 13 stanowią podsumowanie obu serii badań wykonanych w aparacie HCA. Potwierdzają one występowanie anizotropii wytrzymałości na ścinanie bez odpływu badanego materiału gruntowego. Na uwagę zasługuje fakt odmiennego przebiegu zmian wartości  $\tau_{fu}$  wraz ze wzrostem kąta  $\alpha$  przy różnych wartościach OCR. W przypadku  $OCR = 1$  wartość wytrzymałości na ścinanie bez odpływu nieznacznie wzrasta przy zmianie  $\alpha$  od  $0^\circ$  do  $30^\circ$ , następnie osiąga wartość minimalną dla  $\alpha = 45^\circ$  i dalej rośnie do  $\alpha = 90^\circ$ . Wartości  $\tau_{fu}$  przy poszczególnych kątach  $\alpha$  zmieniają się względem wartości przy  $\alpha = 0^\circ$  w zakresie do około 20%. Przy  $OCR = 8$  wraz ze wzrostem wartości  $\alpha$  wytrzymałość na ścinanie bez odpływu maleje o około 50% względem wartości referencyjnej.



Rys. 12. Zmiana znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie bez odpływu w zależności od kąta  $\alpha$  z badań HCA CAU przy  $OCR = 1$



Rys. 13. Zmiana znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie bez odpływu w zależności od kąta  $\alpha$  z badań HCA CAU przy  $OCR = 8$

## 6. Wnioski

Wyniki badań wykonanych w cylindrycznym aparacie skrętnym wykazały, iż historia naprężenia gruntu jest czynnikiem, który istotnie wpływa na charakter anizotropii wytrzymałości na ścinanie bez odpływu. Dla kątów  $\alpha$  równych  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $90^\circ$  przy  $OCR = 1$  wartości znormalizowanej wytrzymałości bez odpływu  $\tau_{fi}/\sigma'_{vo}$  wynosiły odpowiednio 0,39; 0,40; 0,31; 0,33; 0,41 natomiast przy  $OCR = 8$  odpowiednio 2,20; 1,59; 1,41; 1,02; 1,06. W przypadku  $OCR = 1$  największe wartości znormalizowanej wytrzymałości na ścinanie bez odpływu otrzymano przy kątach  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$  i  $\alpha = 90^\circ$ , najmniejszą natomiast przy  $\alpha = 45^\circ$ . Przy  $OCR = 8$  największą wytrzymałość otrzymano przy  $\alpha = 0^\circ$ , najmniejszą natomiast przy  $\alpha = 60^\circ$ , przy czym wartość ta była bardzo zbliżona do wartości przy  $\alpha = 90^\circ$ .

## Literatura

- Bjerrum L. (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others). W: *Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow 1973, 111-159.
- Bilé Serra J. P., Hooker P. (2003). A new computer controlled hollow cylinder torsional shear apparatus. W: *Proc. 13<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Prague 2003, Vol. 2, 471-478.
- Pradhan T. B. S., Tatsuoka F., Horii N. (1988). Simple shear testing on sand in a torsional shear apparatus. *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 2, 95-112.
- Jardine R. J. (1995). One perspective of the pre-failure deformation characteristics of some geomaterials. W: *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Shibuya, Mitachi & Miura (eds.). *Balkema*, Rotterdam, 855-885.
- Kiziewicz D. (2012). Wyznaczanie wytrzymałości na ścinanie gruntów spoistych w warunkach niestandardowej ścieżki naprężenia. Rozprawa doktorska, *Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*, Warszawa.
- Neher H. P., Cudny M., Wiltafsky C., Schweiger H. F. (2002). Modeling principal stress rotation effects with multilaminate type constitutive models for clay. W: *Proc. 8<sup>th</sup> International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, Rome 2002; 41-47.
- Sayao A., Vaid Y. P. (1991). A critical assessment of stress nonuniformities in hollow cylinder test specimens. *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 1, 60-72.
- Zdravković L., Jardine R. J. (2001). The effect on anisotropy of rotating the principal stress axes during consolidation. *Géotechnique*, Vol. 51, No. 1, 69-83.

## TESTING OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH IN HOLLOW CYLINDER APPARATUS

**Abstract:** The paper is a summarises test results performed in hollow cylinder apparatus HCA on cohesive soil characterised by plasticity index  $I_p = 10,5\%$ . An objective of tests was to determine undrained shear strength under different values of principal stresses rotation angle  $\alpha$ . The tests were performed with angles  $\alpha = 0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$  for reconstituted cohesive soil (clayey sand cISa) characterised by overconsolidation ratio  $OCR = 1$  and 8. The tests in hollow cylinder apparatus were conducted with use of CAU method (with anisotropic consolidation and shearing in undrained conditions) with stress path consisting of increment of deviator stress  $q$  alongside constant values of mean principal stress  $p$  and intermediate principal stress ratio  $b$ . Obtained results allowed to assess the influence of principal stresses rotation on the value of undrained shear strength  $\tau_{fi}$ .