

Badania laboratoryjne kierunkowej wytrzymałości gruntu warstwowego

Mgr inż. Matylda Tankiewicz

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Iły warwowe to grunty zastoiskowe charakteryzujące się bardzo wyraźnym warstwowaniem w postaci naprzemiennie ułożonych lamin jasnych i ciemnych. Struktura warstwowa tego materiału jest efektem określonych warunków sedymentacji. W wyniku występowania uprzywilejowanego kierunku orientacji struktury i odmiennych właściwości poszczególnych warstw iły warwowe charakteryzują się silną anizotropią. W przypadku konstrukcji wykonywanych w gruntach warstwowych nieuwzględnienie niejednorodności w strukturze i zachowaniu materiału może prowadzić do awarii. Osady zastoiskowe, w tym iły warwowe, występują na znacznym obszarze Polski oraz na świecie – w obrębie występowania zlodowaceń. Badania iłów warwowych prowadzili między innymi: Myślińska [8], De-Groot i Lutenecker [2, 3], Sambhandharaksa [10].

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych iłu warwowego występującego w pobliżu Bełchatowa. Do rozpoznania struktury gruntu wykorzystano nowoczesną technikę tomografii komputerowej. Skanowanie prób pozwoliło na, w sposób nieniszczący, zidentyfikowanie warstwowania gruntu. W celu określenia właściwości wytrzymałościowych gruntu wykonano serię standardowych badań trójosiowego ściskania. Badania wykonano dla 7 różnych orientacji struktury oraz 5 różnych ciśnień komorowych. Efektem tak zaprogramowanych badań są kierunkowe charakterystyki wytrzymałości gruntu, które wyraźnie wykazują anizotropię badanego materiału.

OPIS MATERIAŁU

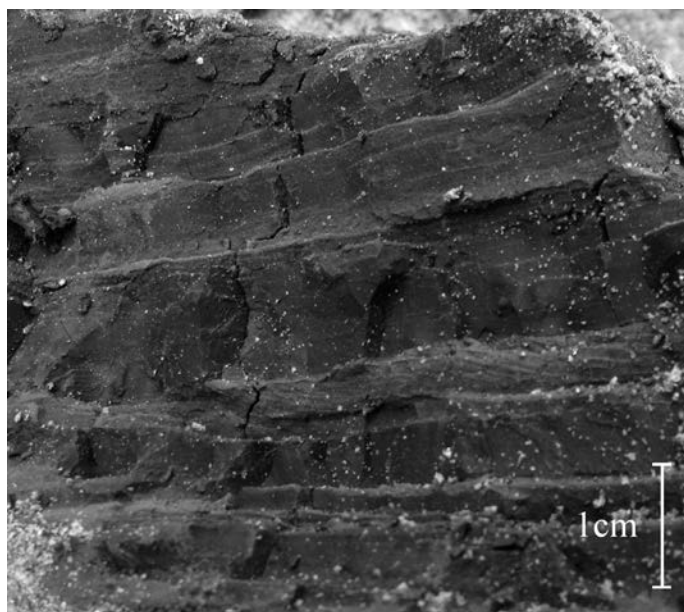
Iły warwowe powstały w jeziorach zastoiskowych, które tworzyły się w obniżeniach terenu lub w strefach odcięcia odpływu rzek przez lodowiec lub jego moreny. Grubszy ma-

teriał gromadził się głównie przy ujściu rzek i brzegów jeziora, a drobniejsze cząstki były unoszone przez prądy w głąb jeziora i deponowane w postaci iłów i mułków. Powtarzające się zmiany w dostawie materiału związane z rocznym cyklem klimatycznym doprowadziły do powstawania utworów warwowych. W okresach ciepłych, to jest topnienia lodowca, powstały jasne laminy z przewagą grubszych frakcji – piaskowych i pylastych. W okresach zimnych, gdy zbiornik zamarzał, z zawiesiny wytrącały się najdrobniejsze osady, tworząc ciemne warstwy, składające się głównie z mułu i łu. Miąższość oraz skład poszczególnych warw zależy przede wszystkim od warunków klimatycznych w trakcie sedymentacji oraz od położenia zbiornika względem czoła lodowca. W pracy analizowano iły warwowe występujące w okolicy miasta Bełchatów, w południowo-zachodniej części województwa łódzkiego. Materiał do badań pobrano na terenie Kopalni Węgla Brunatnego „Bełchatów”, z wyrobiska „Szczerców”. Osady zastoiskowe na terenie pola „Szczerców” charakteryzują się dużą zmiennością i są reprezentowane głównie przez odmiany piaszczyste i mułkowe. Są to osady o laminacji poziomej lub o niewielkim nachyleniu pod kątem $5 \div 20^\circ$, niezaburzone, a ich miąższość wynosi od kilku do 30 m. Profil serii zastoiskowych na tym terenie charakteryzuje się następstwem poszczególnych odmian litologicznych odpowiadającym sedymentacji w cyklu transgresywnym, to jest nasuwania się lodowca.

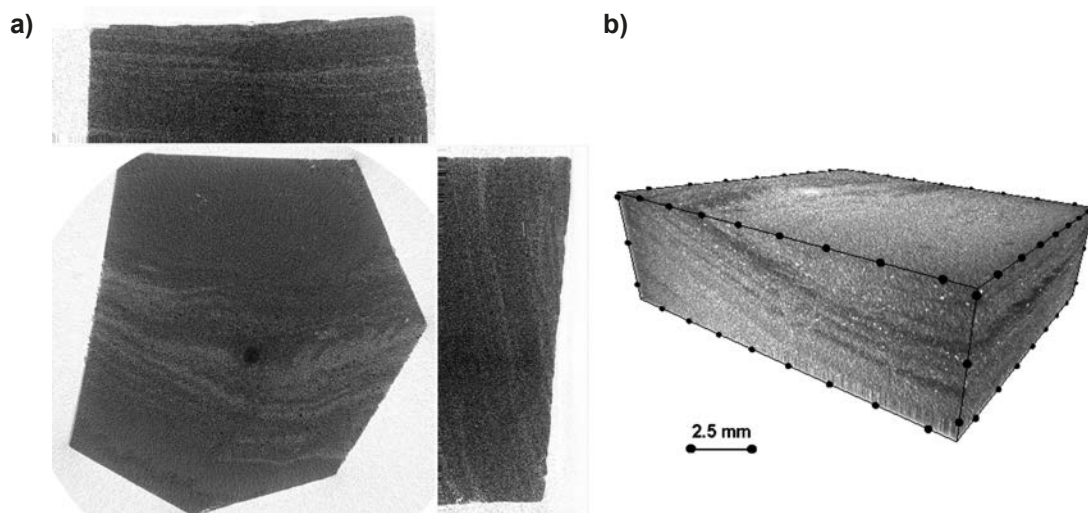
Próby gruntu o nienaruszonej strukturze pobrano bezpośrednio ze skarpy z głębokości około 25 m poniżej pierwotnego poziomu terenu. Analizowany grunt składał się z ciemnych warstw ilastych o miąższości do 1 cm oraz bardzo cienkich jasnych warstw pylasto-piaszczystych. Strukturę warstwową materiału przedstawiono na rys. 1. Badania granulometryczne wykazały, że ciemne warwy składały się głównie z frakcji ilastej ($d < 0,002$ mm) i pylastej ($0,002$ mm $< d < 0,063$ mm) o zawartościach procentowych wynoszących odpowiednio $48,6 \div 63,1\%$ i $36,5 \div 51,2\%$. Według klasyfikacji zgodnej z normą europejską [9] grunt określono jako ił (CI). Uziarnienie jasnych warstw było dużo bardziej zmienne. Udział frakcji ilastej wyniósł $18,7 \div 24,6\%$, pylastej $52,5 \div 71,8\%$ a piaszczystej (2 mm $> d > 0,063$ mm) $5,7 \div 22,9\%$. Grunt zakwalifikowano jako ił z pyłem (siCI) lub ił z pyłem i piaskiem (sasiCI). Gęstość objętościowa gruntu wyniosła $1,87 \div 2,01$ g/cm³ a wilgotność $20,5 \div 27,5\%$. Dokładna specyfikacja badanego materiału została przedstawiona w [7].

BADANIE STRUKTURY GRUNTU

W przypadku ośrodka uwarstwionego niewłaściwe określenie orientacji struktury materiału może prowadzić do poważnych błędów i jest częstym powodem awarii. Makroskopowe określenie laminacji materiału może być z różnych powodów niedokładne. Precyzyjne określenie wewnętrznej budowy materiału jest możliwe z wykorzystaniem nowoczesnej techniki obrazowania, jaką jest rentgenowska tomografia komputerowa. Jej pod-



Rys. 1. Ił warwowy



Rys. 2. Efekty skanowania mikrotomografem a) przekroje przez próbkę, b) model 3D

stawową zaletą jest nieniszczący charakter badania. W trakcie badania jest wykonywana seria obrazów radiograficznych wykorzystywanych następnie do rekonstrukcji trójwymiarowych modeli skanowanych obiektów. Na obrazach są odwzorowywane różnice w stopniu pochłaniania promieniowania X, które zależą głównie od gęstości badanego materiału [6]. W geotechnice tomografia komputerowa jest wykorzystywana, między innymi, do określania rozkładu porów w gruncie [5] oraz analizy deformacji powstających w trakcie badań wytrzymałościowych [11].

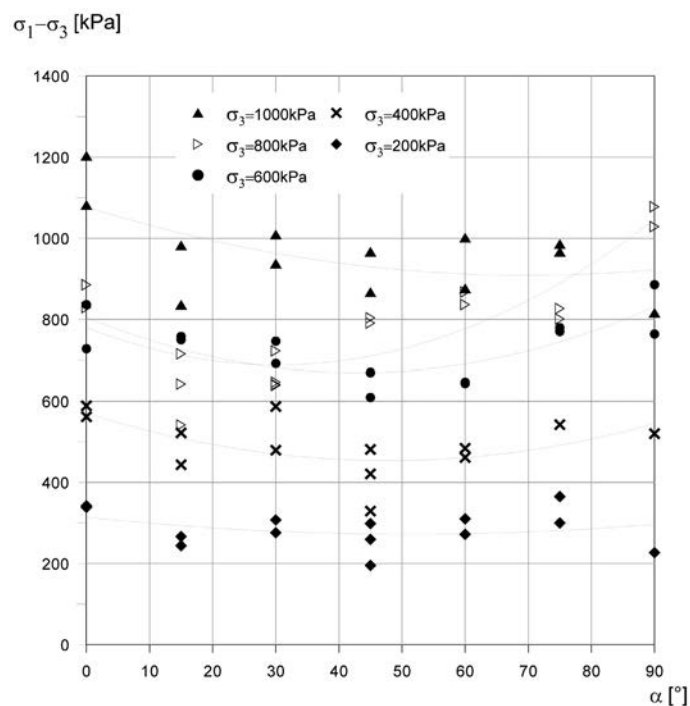
Badania struktury gruntu przeprowadzono z wykorzystaniem mikrotomografu SkyScan1172 z kamerą o rozdzielczości 11 Mp. Napięcie lampy rentgenowskiej w aparacie może wynosić od 20 do 100 kV, a stała moc źródła promieniowania X to 10 W [1]. Do badania wybrano reprezentatywną próbkę iłu warstwowego z warstwowaniem nachylonym do poziomu o 15° . Skanowanie wykonano kilkukrotnie przy różnych rozdzielczościach i parametrach skanowania w celu uzyskania jak najlepszych efektów. Wyniki skanowania przedstawiono na rys. 2, gdzie pokazano przekroje przez badaną próbkę oraz zrekonstruowany trójwymiarowy model materiału. Badanie wykonano przy napięciu lampy 89 kV czasie ekspozycji równym 960 ms i krokiem obrotu $0,15^\circ$. Zastosowano filtr wykonany z glinu i miedzi (Al + Cu). Warstwowanie badanego materiału jest dobrze widoczne i zgodne z laminacją określoną w sposób makroskopowy. W modelu 3D ciemniejsze pola odzwierciedlają materiał o mniejszej gęstości, jaśniejsze – o wyższej. Chociaż ze względu na niewielkie różnice w gęstości warstewki o najmniejszej miąższości nie mogą być zaobserwowane, to można wyznaczyć ogólny trend laminacji.

BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

Kolejnym etapem badań materiału było określenie jego właściwości mechanicznych. W tym celu wykonano serię badań trójosiowego ściskania typu TXCIU. Badania przeprowadzono zgodnie z procedurą przedstawioną przez Heada [4]. Próbkę poddano izotropowej konsolidacji pod stałym ciśnieniem komorowym σ_3 , do czasu, aż nie obserwowano zmian objętości. Następnie próbki ściskano z prędkością 1,6 mm/h z wyłączeniem odpływu wody z próbki. Do badań wykorzystano nienaruszone próby o średnicy 38 mm i wysokości 76 mm. Rdzenie wycięto

Tabl. 1. Zestawienie badanych próbek

Kąt orientacji struktury α [°]	Ciśnienie komorowe σ_3 [kPa]				
	200	400	600	800	1000
0	2	2	2	2	2
15	2	2	2	3	2
30	2	2	2	4	2
45	3	3	2	2	2
60	2	2	2	2	2
75	2	1	3	2	2
90	1	1	2	2	1
Razem	14	13	15	17	13



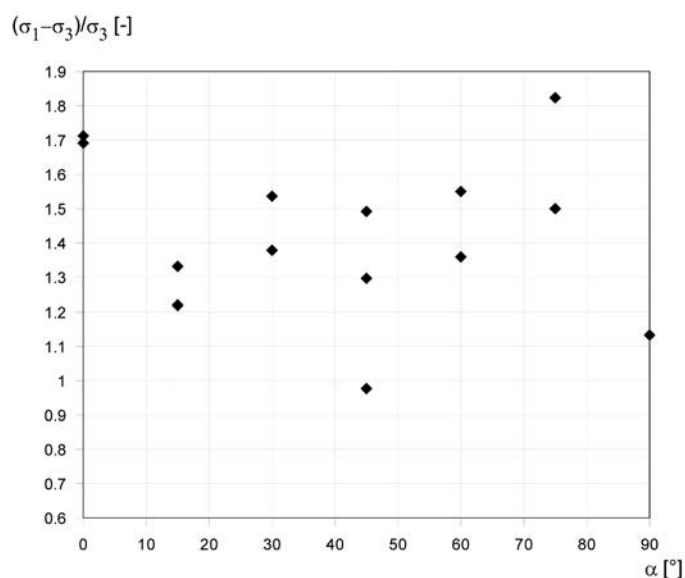
Rys. 3. Wykres zależności wytrzymałości ($\sigma_1 - \sigma_3$) od kąta orientacji struktury α

z podłoża pod 7 różnymi kątami α względem poprzecznej osi próbek, to jest: 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° . Badania przeprowadzono dla 5 różnych ciśnień okólnych, to jest: 200 kPa, 400 kPa, 600 kPa, 800 kPa i 1000 kPa. W dwóch pierwszych przypadkach zadane ciśnienie było mniejsze od pionowego naprężenia *in situ* szacowanego na 500 kPa. Wyniki badań przy ciśnieniach: 200 kPa, 400 kPa i 800 kPa prezentowano wcześniej w [7]. W sumie wykonano 72 badania, a zestawienie liczby próbek badanych w każdym przypadku przedstawiono w tabl. 1.

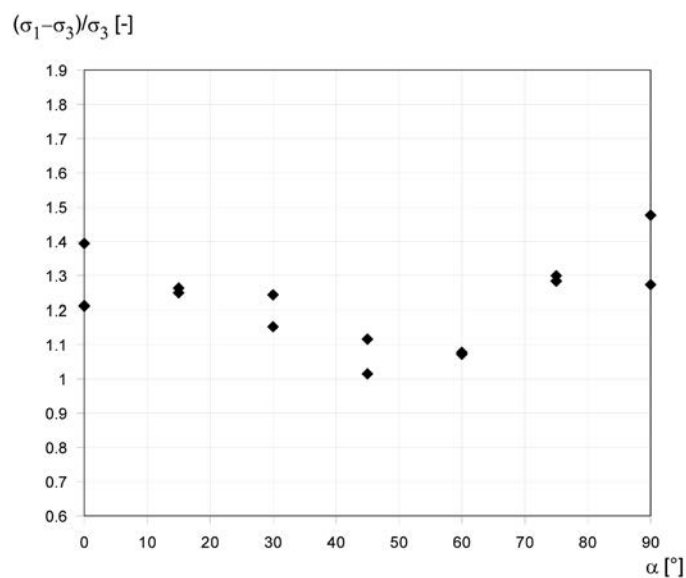
Efektom badań są kierunkowe charakterystyki wytrzymałości przedstawione na rys. 3. Na wykresie pokazano zależność wytrzymałości gruntu od kąta orientacji struktury α przy różnych ciśnieniach komorowych. Jako wytrzymałość przyjęto maksymalną wartość naprężenia różnicowego $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$. Zaobserwowano, że wraz z wzrostem ciśnienia komorowego wzrastają wartości wytrzymałości gruntu. Wyniki charakteryzują się dużą zmiennością – w obrębie jednego ciśnienia okólnego przy

różnych kątach orientacji warstwowania uzyskano odmienne wartości wytrzymałości. Maksymalne wartości uzyskano przy kątach bliskich 0° i 90° , co odpowiada poziomej i pionowej laminacji. Wartości minimalne uzyskano przy nachyleniu 45° , dla niższych wartości ciśnienia i 15° dla wyższych ciśnień. Zestawienie uzyskanych wyników przedstawiono w tabl. 2.

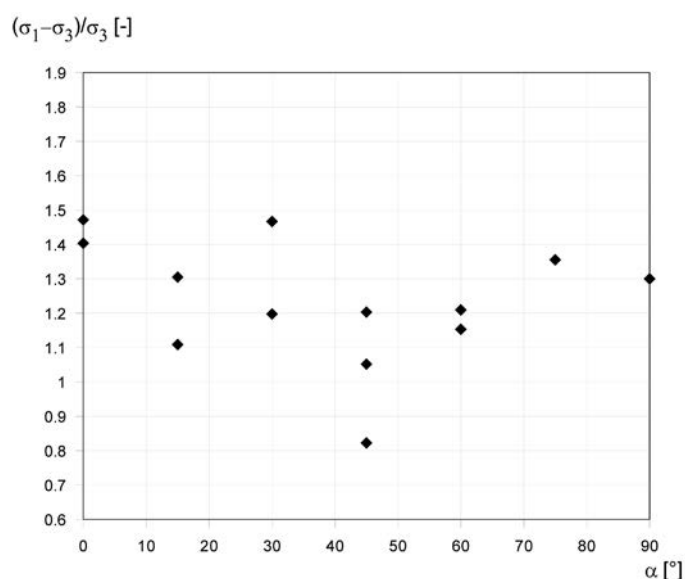
W celu lepszej analizy wyników przeprowadzono procedurę normalizacji. Uzyskane wartości wytrzymałości podzielono przez wartość ciśnienia komorowego, przy którym wykonywano oznaczenie. Uzyskane w ten sposób wyniki przedstawiono na rys. 4 ÷ 8 jako zależność wartości znormalizowanej $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \sigma_3$ od kąta uwarstwienia α . Zestawienie wyników przedstawiono w tabl. 3. Im wyższe ciśnienie okólne, tym rozbieżności w wynikach maleją i stabilizują się na poziomie bliskim jedności. Przy ciśnieniu komorowym 200 kPa różnica między wartościami minimalną i maksymalną wynosi 0,84, gdy przy ciśnieniu σ_3 równym 1000 kPa jest o połowę mniejsza i wynosi tylko 0,36.



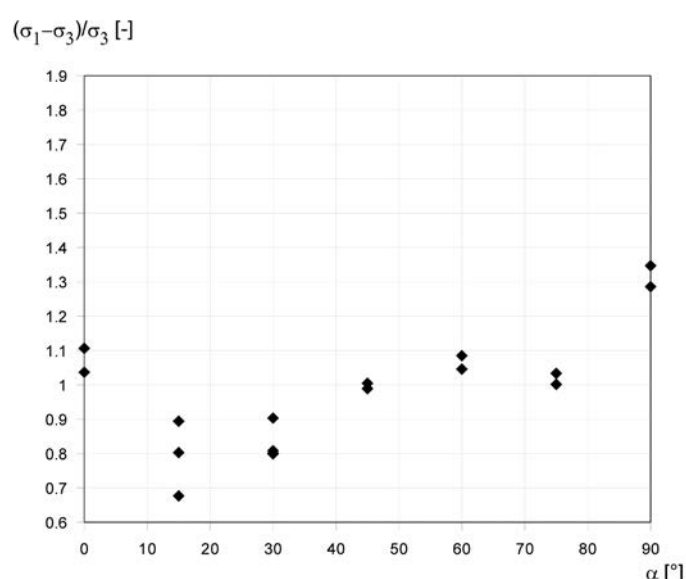
Rys. 4. Wykres zależności wytrzymałości $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \sigma_3$ od kąta orientacji struktury α przy ciśnieniu komorowym równym 200 kPa



Rys. 6. Wykres zależności wytrzymałości $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \sigma_3$ od kąta orientacji struktury α przy ciśnieniu komorowym równym 600 kPa



Rys. 5. Wykres zależności wytrzymałości $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \sigma_3$ od kąta orientacji struktury α przy ciśnieniu komorowym równym 400 kPa



Rys. 7. Wykres zależności wytrzymałości $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \sigma_3$ od kąta orientacji struktury α przy ciśnieniu komorowym równym 800 kPa

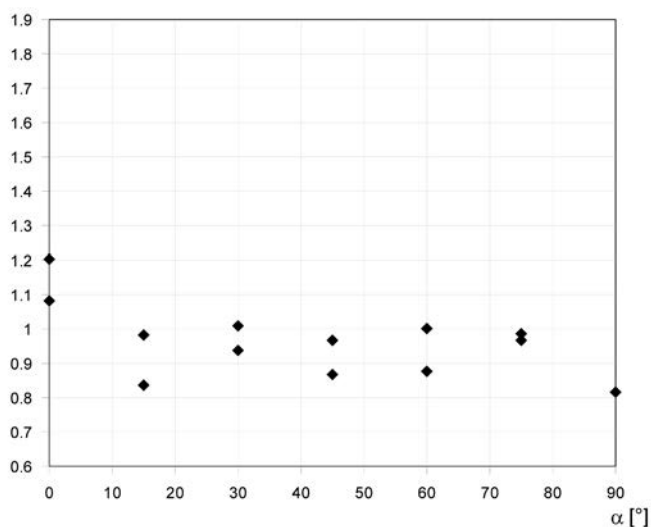
Tabl. 2. Zestawienie wyników badań trójosiowego ściskania

		Ciśnienie komorowe σ_3 [kPa]				
		200	400	600	800	1000
Minimum	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ [kPa]	195,4	328,9	608,9	541,2	836,3
	α [°]	45	45	45	15	15
Maksimum	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ [kPa]	364,6	588,5	885,6	1077,5	1203,1
	α [°]	75	0	90	90	0
Średnia	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ [kPa]	285,7	493,8	736,4	782,1	964,0

Tabl. 3. Zestawienie znormalizowanych wyników badań trójosiowego ściskania

		Ciśnienie komorowe σ_3 [kPa]				
		200	400	600	800	1000
Minimum	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \sigma_3$ [-]	0,98	0,82	1,01	0,68	0,84
	α [°]	45	45	45	15	15
Maksimum	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \sigma_3$ [-]	1,82	1,47	1,48	1,35	1,2
	α [°]	0	0	90	90	0
Średnia	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \sigma_3$ [-]	1,43	1,23	1,23	0,98	0,96

$(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_3$ [-]



Rys. 8. Wykres zależności wytrzymałości $(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \sigma_3$ od kąta orientacji struktury α przy ciśnieniu komorowym równym 1000 kPa

Widać wyraźnie, że wraz z wzrostem ciśnienia efekty wynikające z anizotropii materiału maleją.

PODSUMOWANIE

Zaprezentowane wyniki badań pokazują dyskretną kierunkową budowę łu warwowego oraz jego charakterystykę kierunkowej wytrzymałości. Zależność wytrzymałości materiału od orientacji struktury, zidentyfikowane w badaniach trójosiowych, wyznaczono dla pięciu różnych ciśnień komorowych. Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych zostaną wykorzystane do identyfikacji adekwatnego kryterium wytrzymałości gruntu ze strukturą warstwową.

LITERATURA

1. Bruker mCT, SkyScan1172. Desktop X-ray microtomograph. Instruction Manual, 2005.
2. Groot, D. J., Luttenegger A. J.: Characterization by Sampling and In Situ Testing – Connecticut Valley Varved Clay. *Studia Geotechnica et Mechanica* 27, 2005.
3. DeGroot D. J., Luttenegger A. J.: Engineering Properties of Connecticut Valley Varved Clay. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, volume 1, 2003.
4. Head, K. H.: Manual of Soil Laboratory Testing. Vol. 3. Effective Stress Tests, 1986.
5. Heijs A. W. J., de Lange J.: Determination of pore networks and water content distributions from 3-D computed tomography images of a clay soil. *Bio-imaging*, 5, 1997.
6. Ketcham, R. A., Carlton, W. D.: Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geo-sciences* 27, 2001.
7. Łydzba, D., Tankiewicz M.: Strength Anisotropy of Varved Clay: Laboratory. Results and Mathematical Modeling. XVI French-Polish Colloquium of Soil and Rock Mechanics, 2013.
8. Myślińska E.: Wpływ warunków sedimentacji i diagenety iłów warwowych złodowacenia środkowopolskiego na obszarze Mazowsza na ich właściwości inżyniersko-geologiczne. *Biuletyn Geologiczny*, tom 7, 1965.
9. PN-EN ISO 14688, Badania geotechniczne – Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów.
10. Sambhandhataksa, S.: Stress-Strain-Strength Anisotropy of Varved Clays. *ScD Thesis*, 1977.
11. Viggiani G., Lenoir N., Besuelle P., Di Michiel M., Marello S., Desrues J., Kretschmer M.: X-ray microtomography for studying localized deformation in fine-grained geomaterials under triaxial compression. *C. R. Mecanique*, 332, 2004.