

PRACE ORYGINALNE ORIGINAL PAPERS

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2016), 25 (3), 255–263
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2016), 25 (3)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2016), 25 (3), 255–263
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2016), 25 (3)
http://iks_pn.sggw.pl

Ewa WOJNICKA-JANOWSKA

Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski
w Zielonej Górze
Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering,
University of Zielona Góra

Badania wpływu konsolidacji na wytrzymałość gytii z Międzyrzecza **Research of the impact of consolidation on the strength of gytija from Międzyrzecz**

Słowa kluczowe: konsolidacja, wytrzymałość na ścinanie, aparat bezpośredniego ścinania, gytia
Key words: consolidation, shear strength, direct shear apparatus, gytija

się podłoża budowlanego w aspekcie optymalnego projektowania i bezpieczeństwa eksploatacji.

Wprowadzenie

Mała wytrzymałość oraz duża ścisłość gytii powoduje jej nieprzydatność do wykorzystania jako podłoża budowlane bez wcześniejszego ulepszenia. Jedną z metod ulepszenia podłoża jest jego wzmocnienie poprzez wstępną konsolidację. Tym zagadnieniem zajmowało się wielu autorów, między innymi: Mioduszewski i inni (1978); Dhowian i Edil (1980); Wolski (1984), Lechowicz, (1992). Analiza zależności między naprężeniem a odkształceniem z uwzględnieniem konsolidacji może być podstawą do poprawnej prognozy zachowania

Material badawczy

Grunty do badań pochodzą ze złoża gytii Międzyrzecz położonego w południowo-zachodniej części peryferyjnej miasta Międzyrzecz w dolinie Obry. Próbkę gytii o stopniu wilgotności bliskiemu $S_r = 1$, pobrano z głębokości 0,8–1,0 m p.p.t. w metalowe cylindry o średnicy 10 cm. Pełną charakterystykę złoża Międzyrzecz zawarto u Wojnicka-Janowska (2002). W celu scharakteryzowania osadów wykorzystano metody opisane w literaturze (PN-88/B-04481:1988; Myślińska, 2001), pozwalające oznaczyć parametry fizyczne zestawione w tabeli.

TABELA. Właściwości fizyczne gytii ze złoża Międzyrzecz
 TABLE. Physical properties of gyttia from the deposit Międzyrzecz

Właściwości Properties	Symbol Symbol	Jednostka Unit	$x_{\min}-x_{\max}$	\bar{x}
Zawartość frakcji Content of fraction	$f_p (f_{Sa})$	%	7–14	11
	$f_{\pi} (f_{Si})$		61–72	66,3
	$f_i (f_{Cl})$		20–26	22,7
Popielność Ash content	A_c	%	57,62–97,30	79,59
Zawartość części organicznych Organic matter content	I_{om}	%	41,56–2,3	20,06
Zawartość CaCO ₃ Content of CaCO ₃	–	%	55,24–95,80	74,58
Wilgotność naturalna Natural water content	w_n	%	42,36–95,86	74,62
Gęstość objętościowa Bulk density	ρ	g/cm ³	1,13–1,73	1,49
Gęstość właściwa Density of solid particles	ρ_s	g/cm ³	2,40–2,75	2,56
Wskaźnik plastyczności Plasticity index	I_p	%	11,02–20,59	15,82
Stopień plastyczności Liquidity index	I_L	–	1,21–3,11	2,23

Badania wytrzymałościowe

Wytrzymałością na ścinanie określa się opór, jaki stawia grunt naprężeniom stycznym w rozpatrywanym punkcie ośrodka. Po przekroczeniu oporu ścinania gruntu, następuje przesunięcie pewnego jego fragmentu względem pozostałej masy ośrodka.

Wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych gruntów organicznych ze względu na ich niejednorodność i właściwości fizyczne jest zagadnieniem trudnym.

Określenie w gruntach organicznych momentu ścicia jest często niejednoznaczne w związku z występowaniem dużych i nieodwracalnych odkształceń. W ogólnie stosowanych hipotezach wy-

trzymałościowych występują parametry uważane za stałe materiałowe. W takich gruntach jak gytia i kreda jeziorna parametry są zależne między innymi od wilgotności, stopnia skonsolidowania, zawartości substancji organicznej oraz metodyki badań. Powszechnie stosowane badania gruntów normalnie konsolidowanych, tzn. ścinanych przy naprężeniach równych naprężeniom konsolidującym, pozwalają na otrzymanie zamiast kątów tarcia (φ) kąty ścicia (φ_s), czyli kąty nachylenia prostych ścinania, i spójności pozornej (c_s), oszacowanych na podstawie obwiedni oporu ścinania. Przyjęta metodyka badań pozwala na ustalenie kierunków zmian parametrów wytrzymałościowych, a nie ich ścisłych wartości liczbowych.

Badania w aparacie bezpośredniego ścinania

Badania wytrzymałości na ścinanie na próbkach gytii z Międzyrzecza wykonano w aparacie AB-1 produkcji ZAN-UJ Kraków. Zasady badań i opracowanie wyników przygotowano na podstawie metodyki przedstawionej w normie PN-88/B-04481:1988 oraz w literaturze (Piaskowski, 1979; Myślińska, 2001; Pieczyrak, 2014). Badanie wytrzymałości w aparacie bezpośredniego ścinania ma wiele wad, na co zwraca uwagę wielu autorów, między innymi Pieczyrak (2014). Biorąc jednak pod uwagę jego dostępność oraz prostotę i prędkość badania, aparat ten jest chętnie wykorzystywany w laboratoriach geotechnicznych.

Na potrzeby niniejszej pracy wykonano badania na próbkach o wymiarach $6,0 \times 6,0 \times 2,0$ cm przy prędkości ścinania $v_s = 1$ mm/min. Ich podstawowym celem było określenie wpływu konsolidacji na wytrzymałość gytii. Badania zrealizowano w dwóch seriach:

- Seria I – próbki gytii z Międzyrzecza o strukturze nienaruszonej (NNS), konsolidowane i ścinane w aparacie AB-1 przy naprężeniach $\sigma_n = 36,18; 58,60$ oraz $196,80$ kPa. Stosowano następujące czasy konsolidacji: 0, 5, 15, 30, 120 i 5340 min. Wilgotność początkowa próbek mieściła się w zakresie $w = 85,1\text{--}92,6\%$, przy gęstości objętościowej $\rho_o = 1,30\text{--}1,37$ g/cm³.
- Seria II – próbki gytii z Międzyrzecza o strukturze naruszonej (NS). Próbki zostały uformowane z gruntu przetartego przez sito o oczkach $\phi = 2$ mm. Próbki konsolidowano przy naprężeniach $\sigma_n = 36,18; 58,60; 63,37$ kPa, w czasie: 0, 15, 30, 120,

1440, 5520 min. Wilgotność początkowa badanych próbek mieściła się w zakresie $w = 78,6\text{--}88,2\%$, przy gęstości objętościowej $\rho_o = 1,34\text{--}1,40$ g/cm³.

Stopień wilgotności próbek obydwu serii był zbliżony do $S_r = 1$. Najdłuższe czasy konsolidacji odpowiadały umownej stabilizacji osiadania przyjętego w badaniach jako zmianę wysokości próbki nieprzekraczającą w ciągu doby 0,005 mm.

Bezpośrednio po ustalonych czasach konsolidacji próbki były ścinane przy naprężeniach odpowiadających naprężeniom konsolidacyjnym. W czasie badań rejestrowano w odstępach co 30 s wartości odkształceń: dynamometru (pomiar siły poziomej), wysokości próbki i wzajemnych przemieszczeń dwudzielnej skrzynki. Na podstawie odczytów obliczono naprężenia ścinające (τ_f) oraz naprężenia normalne (σ_n). Wykonane badania pozwoliły na oznaczenie kątów nachylenia prostych ścinania (ϕ_s) oraz spójności pozornej (c_s).

Wyniki

Zasadniczym celem badań było ustalenie wpływu obciążeń zewnętrznych oraz czasu konsolidacji na wytrzymałość próbek gytii w stanie nienaruszonym NNS, a także przerobionych NS oraz zagęszczonych do stanu zbliżonego do stanu naturalnego zagęszczenia. Wyniki badań przedstawiono w formie graficznej.

Kąt oporu ścinania (ϕ_s) i spójność pozorna (c_s)

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wyniki badań kąta oporu ścinania (ϕ_s)

oraz spójności (c_s) oznaczone w aparacie bezpośredniego ścinania z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów oraz z wykorzystaniem równania Coulomba:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi_s + c_s$$

gdzie:

τ – maksymalna wartość wytrzymałości na ścinanie przyjęta umownie przy odkształceniu poziomym próbki $\varepsilon = 10\%$ [kPa],

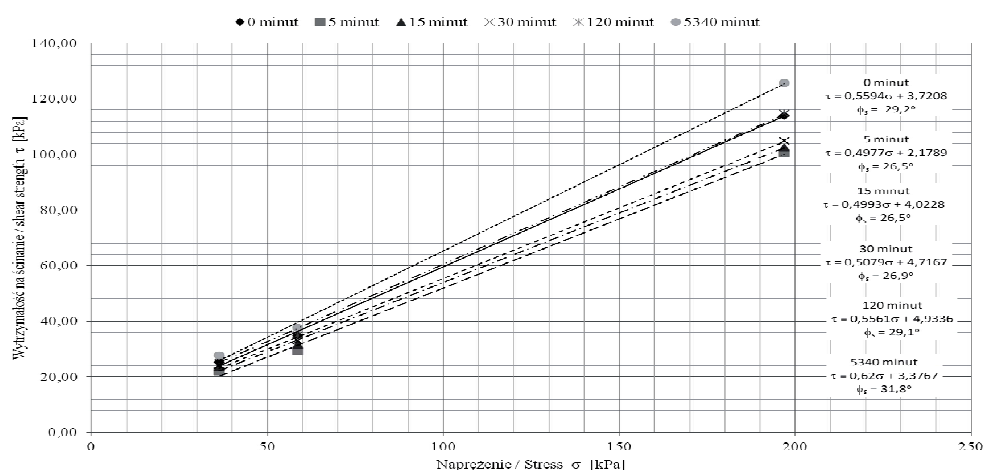
σ – naprężenia normalne [kPa].

W hipotezie Coulomba wartość naprężenia stycznego (τ) zależna jest od naprężenia normalnego (σ). Parametry φ i c nie są wielkościami stałymi, ale zależą od stanu fizycznego badanej próbki.

Próbki NNS – seria I. Kąty oporu ścinania (φ_s) dla tych próbek są zależne od czasu konsolidacji i zmieniają się w granicach $26,5$ – $31,8^\circ$ (rys. 1). Próbki niekonsolidowane wykazują kąt ścinania $\varphi_s = 29,2^\circ$. W pierwszej fazie konsolidacji

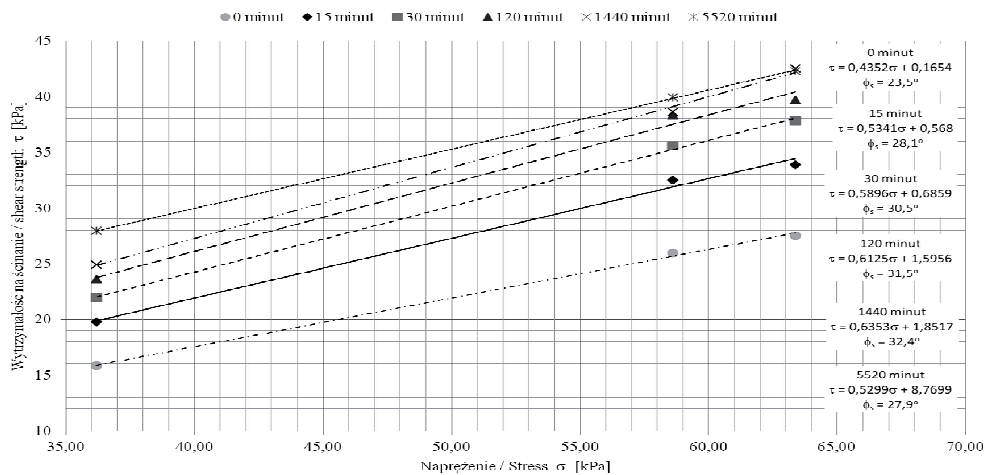
(5 min) zaobserwowano obniżenie kąta ścinania (φ_s) do wartości $26,5^\circ$, a następnie jego stopniowy wzrost do wartości $31,8^\circ$ przy pełnej umownej konsolidacji. Świadczy to o początkowym naruszeniu struktury gruntu, która po upływie około 120 min osiągnęła wartość pierwotną. Dalsza konsolidacja spowodowała wzmocnienie gęstościowe gruntu i wpłynęła na zwiększenie kąta oporu ścinania. Spójność pozorna zmieniła się w wąskich granicach $2,2$ – $4,9$ kPa i nie wykazała jednoznacznej zależności od czasu konsolidacji.

Próbki NS – seria II. Próbki wykazały stopniowy wzrost kąta ścinania φ_s od $23,5^\circ$ do $32,4^\circ$, w zakresie czasu 0 – 1440 min (rys. 2). Przy pełnej umownej konsolidacji (5520 min) kąt ścinania uległ obniżeniu do $27,9^\circ$, co mogło być związane z jakością przygotowanej do badania próbki. Spójność pozorna (c_s) zmieniła się w granicach $0,2$ – $8,8$ kPa i wzrastała wraz z czasem konsolidacji.



RYSUNEK 1. Zależność wytrzymałości na ścinanie od naprężenia w aparacie bezpośredniego ścinania – seria I

FIGURE 1. Relations between shear strength and stress in direct shear apparatus – series I



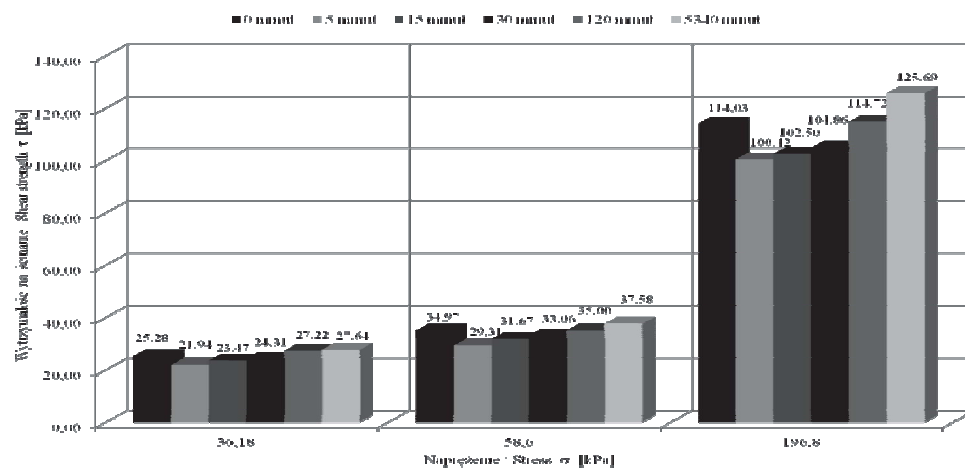
RYSUNEK 2. Zależność wytrzymałości na ścinanie od naprężenia w aparacie bezpośredniego ścinania – seria II

FIGURE 2. Relations between shear strength and stress in direct shear apparatus – series II

Wpływ obciążenia konsolidującego na wytrzymałość gytii w zależności od czasu trwania konsolidacji

Próbki NNS – seria I. Badania wykazały, że głównym czynnikiem zmian wytrzymałości gytii na ścinanie była

wartość zadawanego obciążenia konsolidacyjnego i czas jego działania (rys. 3). Próbki po zadaniu obciążenia, w pierwszej fazie do około 120 min, obniżają swoją wytrzymałość. Przy dalszej konsolidacji (powyżej 120 min) wytrzymałość wzrasta ponad jej początkową wartość



RYSUNEK 3. Porównanie wytrzymałości na ścinanie próbek serii I przy różnych naprężeniach konsolidacyjnych

FIGURE 3. Comparing the shear strength of the sample series I with different stress of consolidation

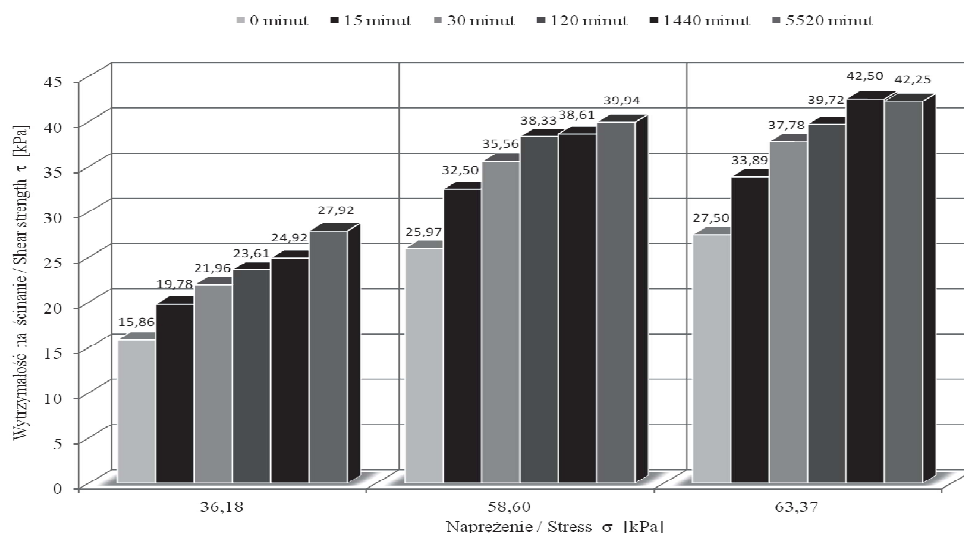
przed zadaniem obciążenia i początkiem konsolidacji.

Próbki NS – seria II. Podobnie jak w przypadku próbek NNS, na ich wytrzymałość na ścinanie wpływa głównie wielkość obciążenia konsolidacyjnego i czas jego działania (rys. 4). Po początkowym obniżeniu wytrzymałości (5 min) dalsza konsolidacja, przy każdym z obciążeń, powoduje jej stopniowy wzrost, co świadczy o wzmocnieniu struktury gruntu.

τ_{\max} – maksymalna wytrzymałość próbki po danym czasie konsolidacji [kPa],

τ_0 – wytrzymałość na ścinanie próbki, która nie była konsolidowana [kPa].

Próbki NNS – seria I. Z rysunku 5 wynika, że największe osłabienie wytrzymałości próbek na ścinanie nastąpiło w ciągu pierwszych 5 min działania obciążeń. Dalsza kontynuacja badania wskazuje na stopniową stabilizację wytrzymałości gruntu i po 120 min



RYSUNEK 4. Porównanie wytrzymałości na ścinanie próbek serii II przy różnych naprężeniach konsolidacyjnych

FIGURE 4. Comparing the shear strength of the sample series II with different stress of consolidation

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono względne zmiany wytrzymałości gytii zależne od wielkości naprężenia i czasu konsolidacji, oszacowane na podstawie wzoru:

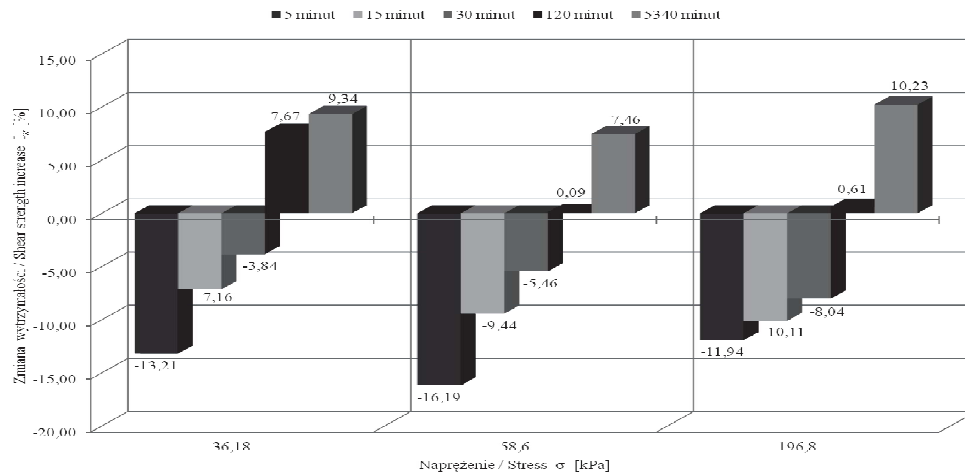
$$I_w = \frac{\tau_{\max} - \tau_0}{\tau_0} \cdot 100\%$$

gdzie:

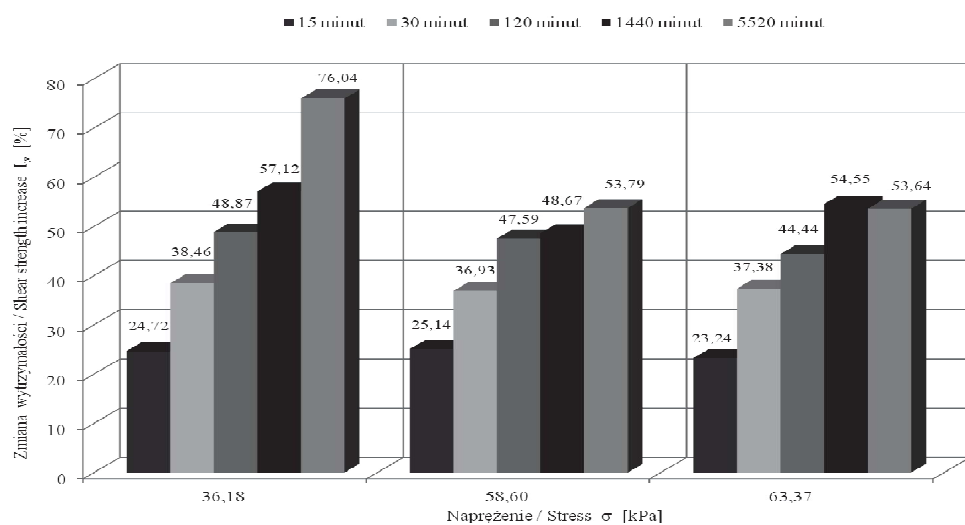
I_w – zmiana wytrzymałości na ścinanie [%],

jej względny wzrost, co świadczy o zniszczeniu struktury gruntu w początkowej fazie, a następnie o jej odbudowie i wzmocnieniu gytii.

Próbki NS – seria II. Gytia była badana w zakresie naprężeń konsolidacyjnych 36,18–63,37 kPa. Podobnie jak w próbkach NNS głównym czynnikiem wzrostu wytrzymałości na ścinanie było obciążenie zewnętrzne próbek. Wzrost czasu konsolidacji przy każdym z badanych obciążeń



RYSUNEK 5. Zależność względnych zmian wytrzymałości na ścinanie od naprężenia – seria I
 FIGURE 5. Relations between shear strength increase and stress – series I



RYSUNEK 6. Zależność względnych zmian wytrzymałości na ścinanie od naprężenia – seria II
 FIGURE 6. Relations between shear strength increase and stress – series II

powodował stopniowy, względny wzrost wytrzymałości, co obrazuje rysunek 6.

Wpływ obciążenia konsolidującego na wytrzymałość gytii

Założono, że w rozpatrywanym zakresie obciążeń istnieje prostoliniowa

zależność między wytrzymałością gruntu a obciążeniem w postaci ogólnego równania (Borys, 1988; Mioduszewski, 1988):

$$\tau_i = \tau_0 + \Delta\sigma \cdot \operatorname{tg} \beta$$

gdzie:

τ_i – wytrzymałość gruntu po jego obciążeniu o wartość $\Delta\sigma$ [kPa],

τ_0 – wytrzymałość początkowa gruntu w podłożu [kPa],
 $\Delta\sigma$ – przyrost naprężenia [kPa],
 β – kąt wzrostu wytrzymałości na ścinanie [°].

Wpływ obciążenia zewnętrznego (σ) na wytrzymałość (τ) gytii obliczono dla próbek ścinanych po zakończeniu konsolidacji:

- dla próbki NNS – przy zakresie naprężeń $\sigma = 36,18\text{--}196,80$ kPa, gdzie $\tau = 3,38 + 0,62 \cdot \Delta\sigma$ [kPa], a kąt wzrostu wytrzymałości na ścinanie wyniósł $\beta = 31,8^\circ$,
- dla próbki NS – przy zakresie naprężeń $\sigma = 36,18\text{--}63,37$ kPa, gdzie $\tau = 8,77 + 0,53 \cdot \Delta\sigma$ [kPa], a kąt wzrostu wytrzymałości na ścinanie wyniósł $\beta = 27,9^\circ$.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań gytii stwierdzono:

1. Kąt oporu ścinania (φ_s) dla próbek o nienaruszonej strukturze (NNS), konsolidowanych w czasie krótszym niż 120 min, wykazuje mniejsze wartości niż próbek bez konsolidacji. Dłuższa konsolidacja powoduje wzrost wytrzymałości. Świadczy to o początkowym uszkodzeniu struktury gruntu, która przy dłuższym czasie konsolidacji zostaje odbudowana. Kąt oporu ścinania zmieniał się w granicach $26,5^\circ\text{--}31,8^\circ$. Spójność pozorna zmieniała się w zakresie 2,2–4,9 kPa i nie wykazywała jednoznacznej zależności od czasu konsolidacji.
2. Próbki o strukturze przerobionej (NS) wykazują w miarę wzrostu czasu konsolidacji stopniowy wzrost

kąta ścinania (φ_s) w granicach $23,4^\circ\text{--}32,4^\circ$ wywołany wzmocnieniem gęstościowym badanego gruntu. Spójność pozorna (c_s) wzrasta wraz z czasem konsolidacji od 0,2 do 8,8 kPa.

3. Obciążenie próbek NNS (w zakresie 36,2–196,8 kPa), w początkowej fazie konsolidacji do 120 min, powoduje obniżenie wytrzymałości gytii w granicach 11,9–16,2%. Wydłużenie czasu konsolidacji powoduje względny wzrost wytrzymałości sięgający 10,2% przy pełnej konsolidacji (5340 min) i maksymalnym naprężeniu 196,8 kPa.
4. Próbki o strukturze przerobionej (NS) pod wpływem naprężeń w zakresie 36,2–63,4 kPa, wykazują postępujący względny wzrost wytrzymałości w granicach 23,2–76,0%. Największy względny wzrost wytrzymałości podczas konsolidacji następuje dla najmniejszego naprężenia, tj. 36,2 kPa.
5. W badaniach wpływu obciążenia konsolidacyjnego na wytrzymałość gytii uzyskano prostoliniowe zależności wytrzymałości gruntu od naprężeń w badanym zakresie:
 - próbki NNS: $\tau = 3,38 + 0,62 \cdot \Delta\sigma$ [kPa], kąt wzrostu wytrzymałości na ścinanie $\beta = 31,8^\circ$,
 - próbki NS: $\tau = 8,77 + 0,53 \cdot \Delta\sigma$ [kPa], kąt wzrostu wytrzymałości na ścinanie $\beta = 27,9^\circ$.

W aspekcie praktycznym zależności te dają możliwość określenia, na podstawie badań laboratoryjnych, przybliżonego wzrostu wytrzymałości podłoża pod wpływem konsolidacji przy założeniu, że badania będą prowadzone dla takiego zakresu naprężeń, jaki będzie występował pod projektowaną budowlą.

Literatura

- Borys, M. (1988). Właściwości geotechniczne podłoża torfowego pod budowlami melioracyjnymi. *Wiadomości Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych, XVI (1)*, 135-151.
- Dhowian, A.W. i Edil, T.B. (1980). Consolidation behavior of peats. *Geotechnical Testing Journal*, 105-114.
- Lechowicz, Z. (1992). *Ocena wzmocnienia gruntów organicznych obciążonych nasypem*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Mioduszeński, W. (1988). Analiza stanu nasypu ziemnego posadowionego na podłożu organicznym. *Wiadomości Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych, XVI (1)*, 153-169.
- Mioduszeński, W., Kosecki, W. i Walczak, H. (1978). Badania właściwości fizycznych i mechanicznych torfów pod starymi nasypami ziemnymi. *Wiadomości Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych, XIV (1)*, 149-156.
- Myślińska, E. (2001). *Laboratoryjne badania gruntów*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Piaskowski, A. (1979). *Wytyczne oznaczania spójności i kąta tarcia wewnętrznego gruntów budowlanych*. Warszawa: Instrukcja ITB 225.
- Pieczyrak, J. (2014). *Wprowadzenie do geotechniki*. Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne.
- PN-88/B-04481: 1988. *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*.
- Wojnicka-Janowska, E. (2002). Charakterystyka złóż węglanowych osadów jeziornych Środkowego Nadodrza. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego, 129, Inżynieria Lądowa i Środowiska 37*, 209-220.
- Wolski, W. (1984). Wzmacnianie gruntów organicznych za pomocą wstępnej konsolidacji. *Mechanika gruntów w zastosowaniach inżynierskich*, 111-124. Warszawa: Naczelna Organizacja Techniczna.

Streszczenie

Badania wpływu konsolidacji na wytrzymałość gytii z Międzyrzecza. Artykuł

zawiera wyniki badań wytrzymałości próbek gytii wapiennej z Międzyrzecza (woj. lubuskie). Badania wykonano w aparacie bezpośredniego ścinania, w dwóch seriach, na próbkach NNS i NS, konsolidowanych naprężeniem $\sigma_n = 36,2-196,8$ kPa. Czas konsolidacji poszczególnych próbek zawierał się w przedziale 0–96 h. W celach porównawczych część próbek była konsolidowana do umownego osiadania przyjętego jako zmiana wysokości próbki nieprzekraczająca w ciągu doby 0,005 mm. Badania zostały uzupełnione kompleksową charakterystyką geotechniczną badanego gruntu.

Summary

Research of the impact of consolidation on the strength of gyttja from Międzyrzecz. The article contains the results of strength tests of gyttja samples from Międzyrzecz (Lubuskie Voivodeship). The study was made in the direct shear apparatus, in two series for the undisturbed and disturbed samples, consolidated stress $\sigma_n = 36.2-196.8$ kPa. The time of consolidation of individual samples was in the range of 0–96 h. For purposes of comparison, part of the samples was consolidated to the contractual settlement adopted as a change of sample height not exceeding the 0.005 mm per day. The tests were complemented by geotechnical characteristics of the tested soil.

Author's address:

Ewa Wojnicka-Janowska
Uniwersytet Zielonogórski
Instytut Budownictwa
65-516 Zielona Góra, ul. Prof. Z. Szafrana 1
Poland
e-mail: e.wojnicka@ib.uz.zgora.pl