

Zmiany właściwości gruntu w strefie aktywnej pęcznienia

Małgorzata Wszędyrówny-Nast¹, Wojciech Tymiński²

Changes in soil properties in the active-wetting zone of swelling. Prz. Geol., 69: 917–924; doi: 10.7306/2021.53

Abstract. Swelling is a phenomenon which occurs in high plasticity soils. It is observed immediately after the contact of not fully saturated expansive soil with water. In clays of very small coefficient of permeability, it may be concluded that swelling is a surface phenomenon – water does not need to infiltrate deep into the clay layer for swelling to start. The so-called active-wetting zone may be observed in the soil layer where the swelling process takes place. The soil conditions in the zone change during swelling and consequently result in changes in the soil strength and deformation properties. In the paper the results of swelling pressure tests are presented and analysed. The tests were carried out in oedometers. Based on the test results, the range of the active-wetting zone in the tested samples was analysed, taking into account index properties of tested soils, as well as orientation of tested samples.

Keywords: swelling, active-wetting zone, laboratory tests

Pęcznienie gruntu to wzrost jego objętości na skutek kontaktu z wodą. W przypadku gdy grunt pęczniący ma ograniczenie uniemożliwiające zwiększenie jego objętości, wytwarza się ciśnienie pęcznienia. Jednym z parametrów opisującym to zjawisko jest wskaźnik pęcznienia, który charakteryzuje przyrost objętości próbki podczas pęcznienia, wyrażony w procentach. W przypadku gdy grunt ma ograniczenie uniemożliwiające wzrost jego objętości, wytwarza się ciśnienie pęcznienia. W analizie zagadnień inżynierskich nawet niewielka zmiana wilgotności może wywołać uruchomienie się tego złożonego procesu. Za Niedzielskim (1993) można wyróżnić trzy podstawowe grupy czynników wpływających na pęcznienie gruntów:

- właściwości gruntu; np. skład granulometryczny, szczególnie zawartość frakcji ilowej, skład mineralogiczny, powierzchnia właściwa, wilgotność początkowa, rodzaj kationu wymiennego w kompleksie sorpcyjnym, stan gruntu, struktura;

- właściwości wody lub cieczy porowej, np. skład chemiczny, odczyn wody;

- czynniki zewnętrzne, np. temperatura, klimat i związane z nim opady i okresy suszy, miąższość warstwy pęczniącej, głębokość zalegania wody gruntowej, działalność człowieka naruszająca reżim gruntowo-wodny, czas.

Na skutek oddziaływania wody grunty zawierające minerały ilaste z grupy smektytu i illitu wykształcone w postaci warstw o niewielkim ładunku elektrycznym, wykazują tendencję do wzrostu swojej objętości. Pod wpływem wody następuje powiększenie odległości między pakietami w wyniku uwodnienia znajdujących się tam kationów (pęcznienie wewnątrzkrystaliczne) oraz na skutek różnicy stężeń jonów w przestrzeniach między cząstkami i w wodzie porowej (pęcznienie osmotyczne; Grabowska-Olszewska i in., 1998). Kształt cząstek minerałów ilastych (jeden wymiar jest znacznie mniejszy od dwóch pozostałych) powoduje, że podczas sedimentacji i obciążenia nadkładem układają się one w ten sposób, że tworzy się naturalna anizotropia strukturalna (Lambe, Whitman, 1969), która ma wpływ na zachowanie się gruntu. Cząstki łu osadzające się w wodzie gromadzą się na ich płaskich powierzchniach, a nie na ich krawędziach (Powrie, 1997).

W związku z tym do czynników wpływających na pęcznienie przedstawionych powyżej można dodać jeszcze anizotropię, która z punktu widzenia mechaniki gruntów, czyni to zjawisko jeszcze bardziej złożonym.

Woda nie musi infiltrować całej objętości warstwy gruntu, by zaszło zjawisko pęcznienia. Zazwyczaj zachodzi ono w strefie podlegającej zmianom wilgotności. W literaturze spotyka się różne definicje strefy aktywnej (Ronald i in., 2011). Fredlund i Rahardjo (1993) opisują ją jako strefę gruntu podlegającą corocznej zmianie objętości w wyniku zmiany wilgotności. Nelson i in. (2001) odeszli od sezonowości zjawiska, pisząc o zmianach w dowolnym czasie i głębokości, do której naprężenie pionowe nadkładu jest równe lub przewyższa ciśnienie pęcznienia gruntu. Nelson i in. (2015) strefę, w której wilgotność wzrasta pod wpływem oddziaływania zewnętrznych źródeł lub na skutek kapilarności, nazywają strefą zawilgocenia. W warunkach laboratoryjnych podczas badania ciśnienia oraz wskaźnika pęcznienia łąw obserwuje się wzrost wilgotności próbki w kontakcie z wodą. W niniejszym artykule autorzy strefę aktywną pęcznienia przyjmują jako miąższość próbki gruntu badanej w edometrze, która pod wpływem zmiany wilgotności w strefie zawilgocenia wykazuje tendencję do zmiany objętości. Al-Shamrani i Dhowian (2003) przedstawili wyniki edometrycznych badań ściśliwości i wytrzymałości, na podstawie których wykazali, że im większa jest zmiana wilgotności naturalnej (Δw) w próbce w czasie badania, tym wartość wskaźnika pęcznienia jest większa. Wzrost wilgotności gruntu pęczniącego powoduje niekorzystną zmianę jego stanu, co ma wpływ również na pogorszenie właściwości wytrzymałościowych.

Znane są zależności pomiędzy wartościami ciśnienia i wskaźnika pęcznienia a innymi parametrami gruntu takimi jak wilgotność, gęstość objętościowa szkieletu gruntowego, wartości granic Atterberga, zawartość frakcji ilowej, pęcznienie swobodne (Basma i in., 1995; Erzin, Erol, 2004; Villar, Lloret, 2008; Kumor, 2016; Cantillo i in., 2017; Radwan, Bahloul, 2019). Zazwyczaj wyniki badań pokazują, że wraz ze wzrostem początkowej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego wartość ciśnienia pęcznienia rośnie, a wraz ze wzrostem wilgotności maleje. W pracy

¹ Zakład Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu, Instytut Techniki Budowlanej, ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa; m.wszedyrowny@itb.pl

² Geoteko Projekty i Konsultacje Geotechniczne Sp. z o.o., ul. Wałbrzyska 14/16, 02-739 Warszawa; wojciech.tyminski@geoteko.com.pl

podjęto próbę znalezienia takich zależności z badań wykonanych na próbkach wyciętych w orientacji pionowej i poziomej w stosunku do kierunku pobierania prób z otworów wiertniczych.

DOTYCHCZASOWE BADANIA

Większość analiz dotyczy ciśnienia pęcznienia działającego w kierunku pionowym. Na temat anizotropii tego parametru jest znacznie mniej publikacji, a zagadnienie to wciąż jest niewystarczająco rozpoznane. O pęcznieniu działającym w kierunku poziomym pisali m.in. Chen i Huang (1987), Joshi i Katti (1984), analizując jego wpływ na zniszczenia powstałe w konstrukcjach inżynierskich, takich jak: ściany oporowe, kanały, drogi, drenaże. Niedzielski (1993) zwrócił uwagę, że czynnikiem który ma wpływ na rezultaty badań laboratoryjnych ciśnienia pęcznienia jest naturalny układ cząstek minerałów ilastych, jaki wytworzył się podczas ich sedymentacji w zastoisku polodowcowym. W badaniach opisywanych przez Niedzielskiego wartości wyznaczone w kierunku pionowym były niemal 2-krotnie większe od wyznaczonych w kierunku poziomym.

Erguler i Ulusay (2003) przedstawili wyniki badań pęcznienia w obydwu kierunkach łąków z Ankary. Na ich podstawie można stwierdzić, że wartości pęcznienia w kierunku poziomym są wyższe niż w kierunku pionowym. Avsar i in. (2009) również opisali wyniki badań pęcznienia łąków z Ankary, uwzględniając anizotropię. Wykazali, że stosunek ciśnienia pęcznienia (SR) zdefiniowany jako iloraz ciśnienia pęcznienia mierzonego w kierunku poprzecznym do ciśnienia mierzonego w kierunku pionowym (wzór poniżej) wynosi pomiędzy 0,34 a 0,98.

$$SR = \frac{\sigma_{sh}}{\sigma_{sv}}$$

gdzie:

SR – stosunek ciśnienia pęcznienia,

σ_{sh} – ciśnienie pęcznienia w kierunku poziomym [kPa],

σ_{sv} – ciśnienie pęcznienia w kierunku pionowym [kPa].

Sahin (2011) przeanalizował wpływ poziomego ciśnienia pęcznienia na rozkład poziomego parcia gruntu na ścianę oporową. Zwrócił on uwagę, że wartości przyjmowane do takich analiz na podstawie badań laboratoryjnych są zazwyczaj wyższe od rzeczywistych i zaznaczył on, że wartości ciśnienia pęcznienia poziomego są niższe od pionowego. Powoływał się na wyniki badań Sapaza (2004), na

podstawie których można stwierdzić, że stosunek ciśnienia poziomego do pionowego otrzymanego na podstawie badań gruntów w edometrze z pierścieniem cienkościennym zmienia się w przedziale 0,59÷0,86.

MATERIAŁ I METODY

W artykule przedstawiono wyniki badań pęcznienia plicieńskich łąków formacji poznańskiej pobranych z dwóch poletek zlokalizowanych w centralnej Polsce (lokalizacja A – Warszawa, lokalizacja B – Bydgoszcz). Badania wykonano na gruntach o nienaruszonej strukturze, pobranych w cylindry typu Shelby. Próbki do badań wycięte zostały w orientacji pionowej i poziomej. W tabeli 1 zestawiono rodzaje wykonanych badań laboratoryjnych, których analizę przedstawiono w niniejszym artykule.

Badania ciśnienia pęcznienia przeprowadzono w standardowych edometrach z układem dźwigniowym i automatycznych edometrach z napędem elektromechanicznym. Badania wykonano zgodnie z procedurą opisaną w specyfikacji technicznej PKN-CEN ISO/TS 17892-5:2009. W przypadku badań w standardowym edometrze metoda dopuszcza zmianę wysokości próbki w granicach 0,01 mm. Jeśli próbka zaczyna zwiększać swoją wysokość w granicach dopuszczalnych, dokłada się dodatkowe obciążenie, doprowadzając wysokość próbki zbliżoną do wysokości początkowej. W automatycznym edometrze nie dopuszczano do żadnych zmian wysokości. W czasie badania temperatura zgodnie z wymaganiami specyfikacji nie zmieniała się więcej niż $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Do badań stosowano wodę destylowaną.

Wskaźnik pęcznienia określa procentowe pęcznienie próbki i jest wyrażony jako stosunek różnicy wysokości próbki po i przed spęcznieniem (Δh) do jej wysokości początkowej (h_0). Wartości wskaźnika pęcznienia obliczono wg poniższego wzoru:

$$E_p = \frac{h - h_0}{h_0} \times 100\%$$

gdzie:

E_p – wskaźnik pęcznienia [%],

h – wysokość próbki po zakończeniu pęcznienia [mm],

h_0 – wysokość próbki przed pęcznieniem [mm].

Badanie przeprowadzono w edometrze z mocowanym pierścieniem, z podwójnym odpływem. Podczas całego badania próbka nie była obciążana, aby umożliwić jej swobodne pęcznienie. W tabeli 2 przedstawiono podstawowe cechy fizyczne badanych gruntów oraz wartości ciśnienia

Tab. 1. Zestawienie rodzajów przeprowadzonych badań w zależności od orientacji próbki
Table 1. Summary of the types of tests carried out on vertical cut and horizontal cut specimens

Orientacja próbki <i>Specimen orientation</i>	
Pionowa <i>Vertical</i>	Pozioma <i>Horizontal</i>
<ul style="list-style-type: none"> – oznaczenie ciśnienia pęcznienia metodą stałej objętości w edometrze automatycznym / <i>determination of swelling pressure by constant volume method in automatic oedometer</i> – oznaczenie ciśnienia pęcznienia z tolerancją zmiany wysokości próbki 0,01 mm w standardowym edometrze / <i>determination of swelling pressure with a tolerance of 0.01 mm change in sample height in standard oedometer</i> – oznaczenie wskaźnika pęcznienia / <i>determination of swelling strains</i> – badanie w paracie trójosiowego ściskania bez konsolidacji, bez odpływu (TXUU) / <i>unconsolidated undrained triaxial tests (TXUU)</i> 	<ul style="list-style-type: none"> – oznaczenie ciśnienia pęcznienia z tolerancją zmiany wysokości próbki 0,01 mm w standardowym edometrze z dźwigniowym układem zadawania naprężenia pionowego / <i>determination of swelling pressure with a tolerance of 0.01 mm change in sample height in standard oedometer</i> – oznaczenie wskaźnika pęcznienia / <i>determination of swelling strains</i>

pęcznienia, natomiast tabela 3 to zestawienie podstawowych cech fizycznych badanych gruntów oraz wartości wskaźnika pęcznienia. Autorzy analizowali jedynie wpływ podstawowych cech fizycznych na właściwości pęczniące gruntów.

Na rycinie 1 przedstawiono profile zmienności właściwości badanych próbek. Uwzględniono zmienność początkowej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego, zawartości frakcji ilowej, początkowej wilgotności naturalnej i ciśnienia pęcznienia. Wilgotność naturalną oraz gęstość objętościową określono dla każdej badanej próbki. Natomiast zawartość frakcji ilowej określono na podstawie analizy areometrycznej wykonanej dla ścinków gruntu pozostałych po wycięciu próbek do badań ciśnienia pęcznienia. Wszystkie badania wykonywano jednokrotnie.

Po zakończonym badaniu każdą z próbek dzielono na plastry (zaczynając od górnej powierzchni próbki) i dla każdego plastra oznaczano wilgotność. Jako pierwsze badane były próbki z lokalizacji A. Zaobserwowano, że największe zmiany wilgotności zachodzą w strefie 0÷1 mm od górnej powierzchni próbki. W związku z tym próbki z lokalizacji B po zakończonym badaniu podzielono na więcej plasterków, chcąc dokładniej wychwycić zmianę wilgotności w tej strefie. W dalszej części artykułu przedstawiono profile zmienności wilgotności naturalnej poszczególnych próbek.

Dla próbek z lokalizacji A wykonano również badania w aparacie trójosiowego ściskania w warunkach bez konsolidacji i bez odpływu (TXUU). Badania wykonano zgodnie ze specyfikacją techniczną PKN-CEN ISO/TS 17892-8:2009.

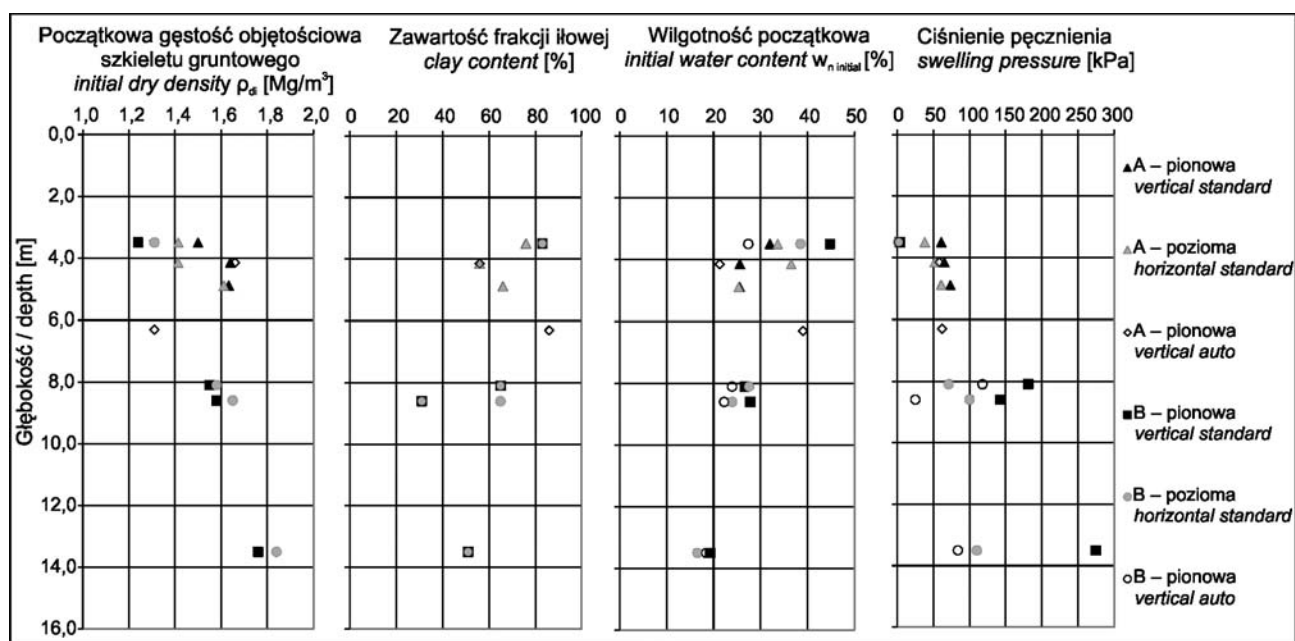
Tab. 2. Parametry fizyczne oraz wartości ciśnienia pęcznienia badanych gruntów

Table 2. Index properties and swelling pressure of soils

Numer badania <i>Test name</i>	Lokalizacja <i>Site</i>	Orientacja <i>Orientation</i>	Metoda badania <i>Test method</i>	Głębokość pobrania <i>Depth</i> [m]	Frakcja ilowa <i>Clay content</i> [%]	Wilgotność początkowa <i>Initial water content</i> [%]	Początkowa gęstość objętościowa <i>Initial bulk density</i> [Mg/m ³]	Początkowa gęstość objętościowa szkieletu gruntowego <i>Initial dry density</i> [Mg/m ³]	Ciśnienie pęcznienia <i>Swelling pressure</i> [%]
A1-V-std	A	pionowa <i>vertical</i>	standard oedometer	3,1–3,5	76	32,00	1,98	1,50	61
A2-V-std	A	pionowa <i>vertical</i>	standard oedometer	4,5–4,9	66	25,50	2,05	1,63	74
A3-V-std	A	pionowa <i>vertical</i>	standard oedometer	3,6–4,15	56	25,60	2,06	1,64	65
A1-H-std	A	pozioma <i>horizontal</i>	standard oedometer	3,1–3,5	76	33,70	1,89	1,41	38
A2-H-std	A	pozioma <i>horizontal</i>	standard oedometer	3,6–4,15	56	36,50	1,93	1,41	52
A3-H-std	A	pozioma <i>horizontal</i>	standard oedometer	4,5–4,9	66	25,30	2,02	1,61	61
A1-H-auto	A	pionowa <i>vertical</i>	automatic oedometer	5,8–6,3	86	39,05	1,82	1,31	62
A2-H-auto	A	pionowa <i>vertical</i>	automatic oedometer	3,6–4,15	56	21,27	2,01	1,66	58
B1-V-std	B	pionowa <i>vertical</i>	standard oedometer	3,0–3,5	83	44,80	1,79	1,24	4
B2-V-std	B	pionowa <i>vertical</i>	standard oedometer	8,0–8,6	31	27,80	2,02	1,58	112
B3-V-std	B	pionowa <i>vertical</i>	standard oedometer	8,1	65	26,66	1,96	1,55	181
B4-V-std	B	pionowa <i>vertical</i>	standard oedometer	13,5	51	19,24	2,10	1,76	275
B1-H-std	B	pozioma <i>horizontal</i>	standard oedometer	3,0–3,5	83	38,55	1,82	1,31	1,25
B2-H-std	B	pozioma <i>horizontal</i>	standard oedometer	8,0–8,6	65	23,96	2,04	1,65	100
B3-H-std	B	pozioma <i>horizontal</i>	standard oedometer	8,1	65	24,56	1,97	1,58	106
B4-H-std	B	pozioma <i>horizontal</i>	standard oedometer	13,5	51	16,58	2,14	1,84	100
B1-V-auto	B	pionowa <i>vertical</i>	automatic oedometer	3,0–3,5	83	27,39	1,85	1,45	2,5
B2-V-auto	B	pionowa <i>vertical</i>	automatic oedometer	8,0–8,6	31	22,23	2,05	1,68	25
B3-V-auto	B	pionowa <i>vertical</i>	automatic oedometer	8,1	65	23,93	2,02	1,63	118
B4-V-auto	B	pionowa <i>vertical</i>	automatic oedometer	13,5	51	18,40	2,09	1,76	84

Tab. 3. Parametry fizyczne oraz wartości wskaźnika pęcznienia badanych gruntów
Table 3. Index properties and swelling strain of soils

Numer badania Test name	Lokalizacja Site	Orientacja Orientation	Głębokość pobrania Depth [m]	Frakcja ilowa Clay content [%]	Wilgotność początkowa Initial water content [%]	Początkowa gęstość objętościowa Initial bulk density [Mg/m ³]	Początkowa gęstość objętościowa szkieletu gruntowego Initial dry density [Mg/m ³]	Wskaźnik pęcznienia Swelling strain [%]
B1-V-SI	B	pionowa vertical	3,0–3,5	83	44,82	1,72	1,19	1,69
B2-V-SI	B	pozioma horizontal	3,0–3,5	83	44,23	1,73	1,20	2,20
B3-V-SI	B	pionowa vertical	8,0–8,6	65	24,40	2,08	1,67	13,72
B4-V-SI	B	pozioma horizontal	8,0–8,6	65	23,80	2,02	1,63	9,68
B5-V-SI	B	pionowa vertical	8,1	65	24,25	2,02	1,61	10,13
B6-V-SI	B	pozioma horizontal	8,1	65	25,28	2,03	1,61	8,79
B7-V-SI	B	pionowa vertical	13,5	51	16,57	2,10	1,78	14,23
B8-V-SI	B	pozioma horizontal	13,5	51	17,56	2,15	1,85	8,42



Ryc. 1. Profile zmienności właściwości badanych próbek
Fig. 1. Index properties and swelling pressure profiles for tested samples

WYNIKI BADAŃ

Ciśnienie pęcznienia

Wartości ciśnienia pęcznienia z uwzględnieniem orientacji badanych próbek oraz metody wyznaczenia w zależności od początkowej wilgotności naturalnej zostały przedstawione na rycinie 2, a początkowej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego na rycinie 3. Podobny charakter wpływu początkowej wilgotności naturalnej i początkowej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego na ciśnienie pęcznienia przedstawił w swojej publikacji Niedzielski (1993), jednak w prezentowanych przez niego wynikach obserwuje się większy wpływ poszczególnych czynników na ciśnienie pęcznienia.

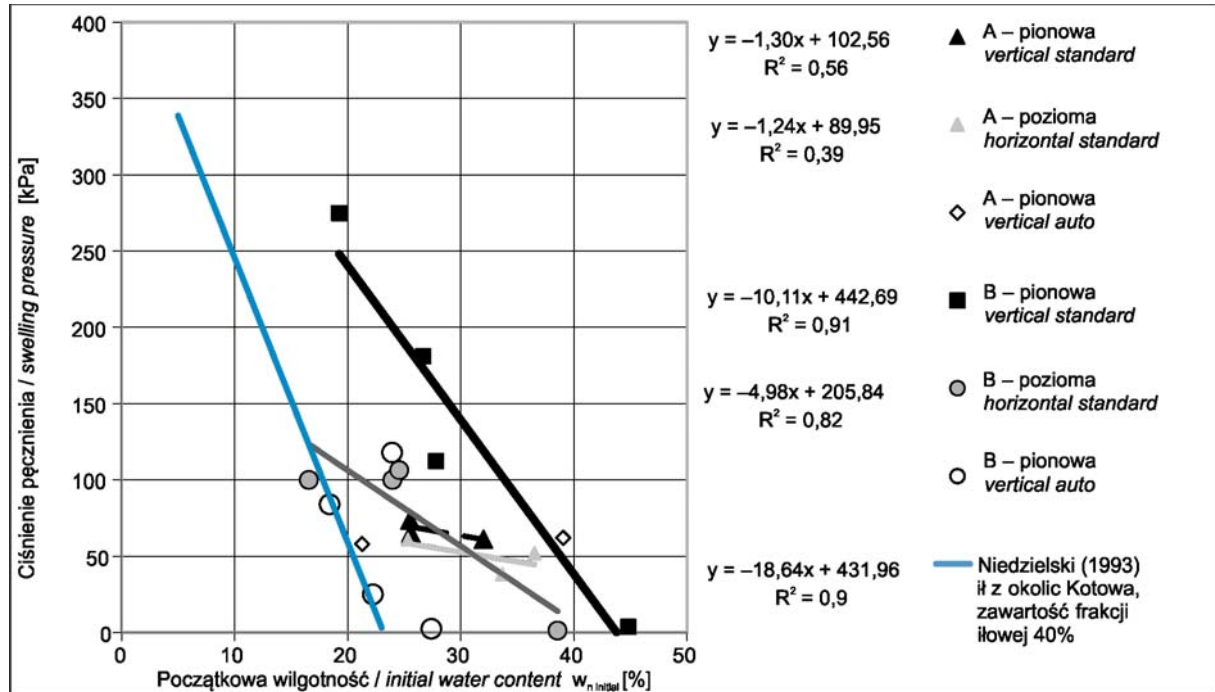
W przypadku lokalizacji B różnice pomiędzy ciśnieniem pęcznienia w kierunku poziomym i pionowym wynoszą nawet ponad 100%. Wpływ zmiany wilgotności naturalnej ma większe w znaczenie przypadku gruntów z lokalizacji B niż z lokalizacji A.

Na podstawie badań próbek z lokalizacji B uzyskano dużo mniejszy rozrzut wyników dla zależności pomiędzy ciśnieniem pęcznienia a początkową wilgotnością naturalną i początkową gęstością objętościową szkieletu gruntowego niż dla próbek z lokalizacji A. Podane równania zostały wyprowadzone na podstawie zbyt małego zbioru danych, by traktować je jako związki korelacyjne, jednak przedstawiono je w celu zobrazowania stopnia rozrzutu wyników badań z poszczególnych lokalizacji.

W przypadku próbek badanych w automatycznym edometrze metodą stałej objętości otrzymano zdecydowanie niższe wartości ciśnienia pęcznienia niż dla próbek badanych w standardowym edometrze.

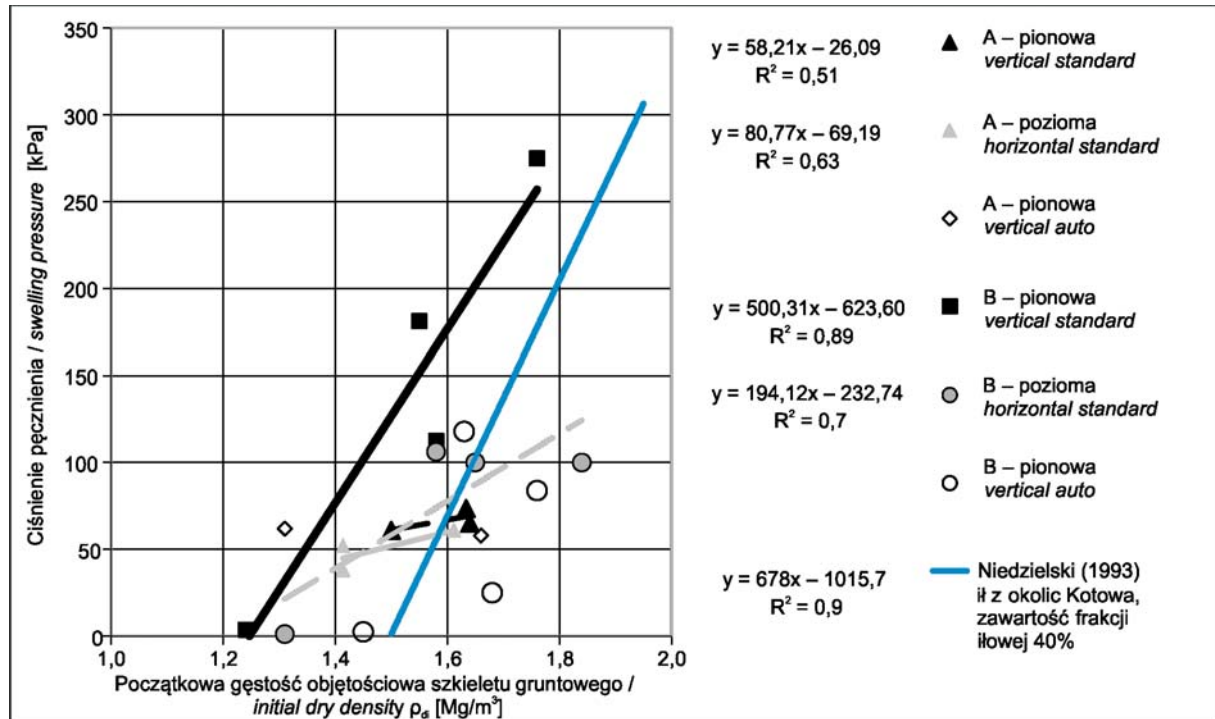
Grunty z obydwu lokalizacji charakteryzowały się niższymi wartościami ciśnienia pęcznienia uzyskanymi z ba-

dań próbek w orientacji poziomej niż próbek badanych w kierunku pionowym. Stosunek ciśnienia pęcznienia (SR) wynosi od 0,33 do 0,89 i wpisuje się w wartości podobnych wyników przedstawionych w literaturze: $0,34 < SR < 0,98$ (Avsar i in., 2009), $0,59 < SR < 0,86$ (Sapaz, 2004). W przypadku lokalizacji A z inżynierskiego punktu



Ryc. 2. Zależność ciśnienia pęcznienia od początkowej wilgotności naturalnej badanych próbek z uwzględnieniem orientacji próbki oraz od metody wyznaczenia wartości ciśnienia pęcznienia

Fig. 2. The relationship between swelling pressure and initial water content, with consideration of specimen orientation and test method



Ryc. 3. Zależność ciśnienia pęcznienia od gęstości objętościowej szkieletu gruntowego badanych próbek z uwzględnieniem orientacji próbki oraz metody wyznaczenia wartości ciśnienia pęcznienia

Fig. 3. The relationship between swelling pressure and initial dry density, with consideration of specimen orientation and test method

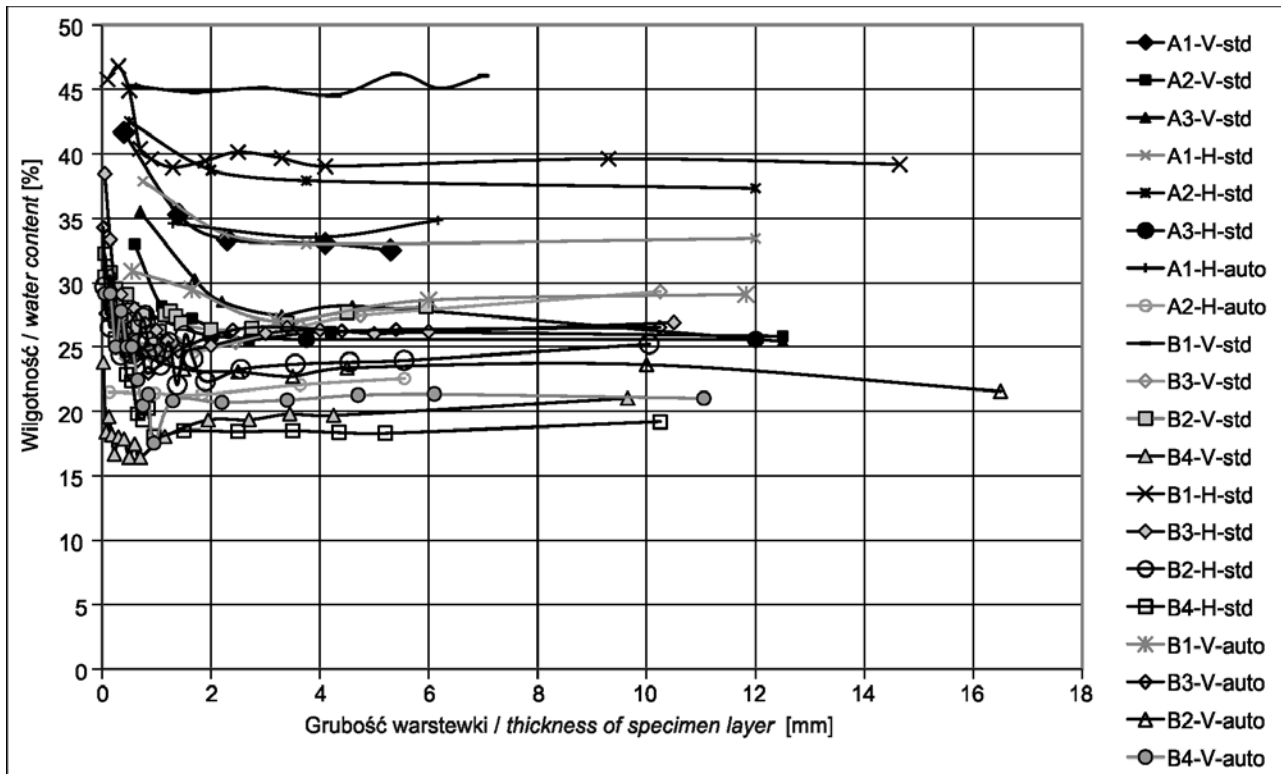
widzenia różnice pomiędzy wartościami ciśnienia pęcznienia uzyskanymi z badań w kierunku poziomym i w kierunku pionowym nie są istotne.

Rozkład wilgotności w próbkach po przeprowadzonym badaniu ciśnienia pęcznienia przedstawiono na rycinie 4, analizowano górną część próbek. Na rycinie 5 zaprezentowano wpływ zmiany wilgotności w strefie kontaktu próbki z wodą na wartości ciśnienia pęcznienia. Z rozkładów tych wynika, że największe zmiany zachodzą w strefie 0÷0,1 mm

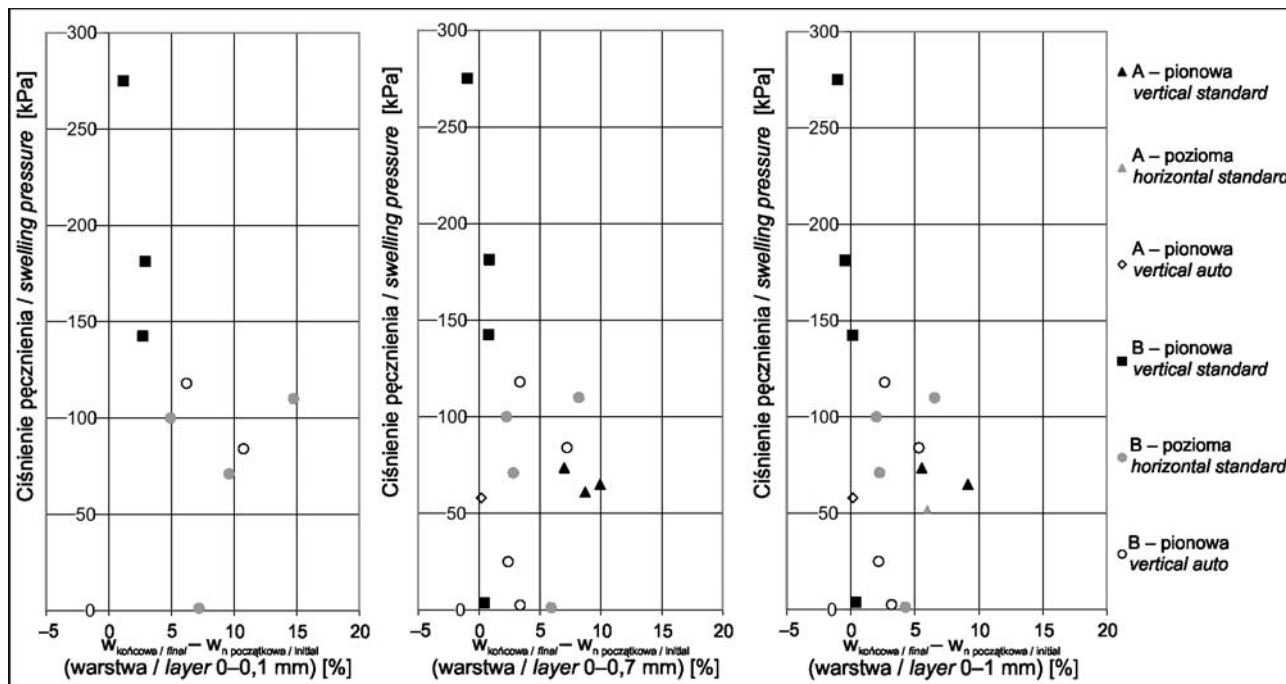
od górnej powierzchni próbki, a zmiana wilgotności w większości przypadków dotyczyła strefy nie większej niż 0÷2 mm. Podczas pęcznienia w strefie 0÷0,1 mm zmiana wilgotności wahała się w przedziale 1,2÷14,8%.

Wskaźnik pęcznienia

Poniżej przedstawiono zależności pomiędzy wskaźnikiem pęcznienia a początkową wilgotnością naturalną



Ryc. 4. Rozkład wilgotności w górnej części badanych próbek
 Fig. 4. Water content distribution in tested specimens (top parts of specimens)



Ryc. 5. Wpływ zmiany wilgotności w próbce na wartość ciśnienia pęcznienia
 Fig. 5. Water content impact on swelling pressure

(ryc. 6) oraz gęstością objętościową szkieletu gruntowego (ryc. 7). Badania wykonano dla próbek pobranych z lokalizacji B. Na podstawie tych analiz można stwierdzić, że wraz ze wzrostem wilgotności naturalnej obserwuje się niższe wartości wskaźnika pęcznienia, a wraz ze wzrostem początkowej gęstości szkieletu gruntowego wskaźnik pęcznienia również rośnie. Zaobserwowano niższe wartości wskaźnika pęcznienia w przypadku próbek wyciętych w orientacji poziomej niż próbek wyciętych w orientacji pionowej.

Zmiana parametrów wytrzymałościowych

Podczas pęcznienia w strefie aktywnej następuje zmiana wilgotności, a więc i stanu gruntu. Zmiana stanu gruntu wpływa na jego właściwości wytrzymałościowe. Przeprowadzono badania próbek o nienaruszonej strukturze i paście gruntowej materiału pochodzącego z lokalizacji A. Wszyst-

kie analizy wykonano w takich samych warunkach naprężenia całkowitego (zadanego do komory). Na rycinie 8 przedstawiono zmianę wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu (S_u) z badań TXUU wraz ze zmianą stanu (wilgotności) gruntu. Biorąc pod uwagę fakt, że podczas pęcznienia wilgotność w strefie aktywnej wzrosła nawet o ok. 15% (wartość bezwzględna), zmiana wilgotności w wyniku pęcznienia w warunkach naturalnych może zmniejszyć kilkukrotnie wartość wytrzymałości na ścinanie w tej strefie.

WNIOSKI

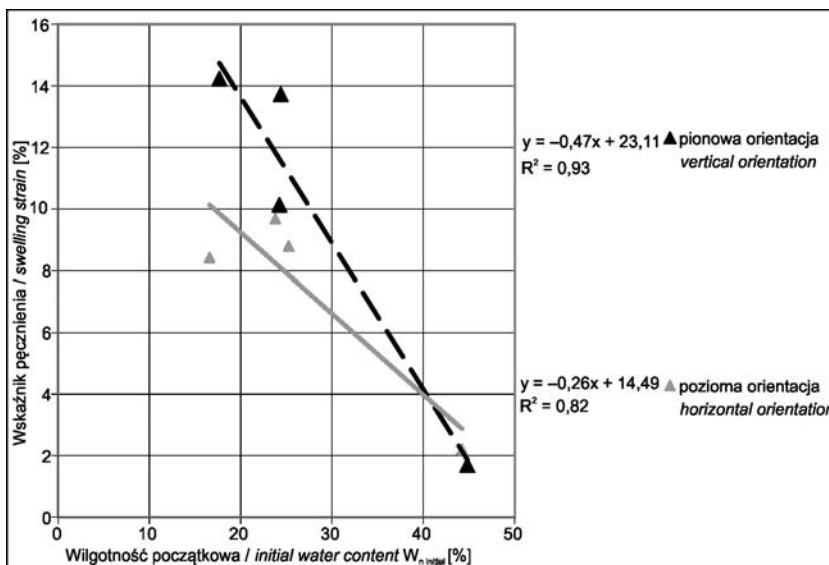
Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- zaobserwowano różnice pomiędzy wartościami ciśnienia pęcznienia otrzymanymi dla próbek badanych w orientacji pionowej a próbkami badanymi w orientacji poziomej. Szczególnie istotne różnice zaobserwowano w przypadku próbek z lokalizacji B. Wartości ciśnienia pęcznienia próbek badanych w orientacji pionowej są wyższe w stosunku do wartości uzyskanych z badań próbek w kierunku poziomym;

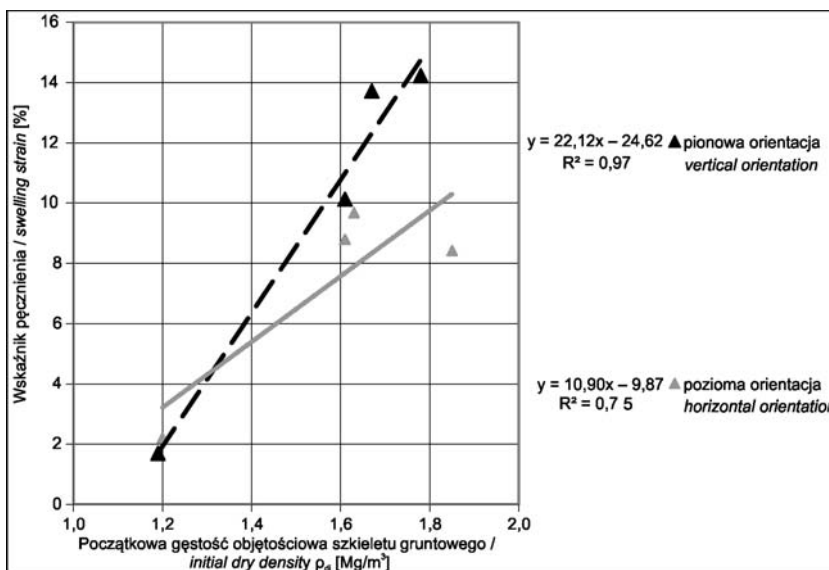
- podczas badania pęcznienia w edometrze automatycznym nie następuje zmiana objętości próbki, obserwowana strefa aktywna jest mniejsza, a woda wnika w głąb próbki w mniejszym stopniu niż w próbce przeprowadzonej w edometrze standardowym. Autorzy są zdania, że z badań w automatycznym edometrze uzyskuje się lepszą powtarzalność wyników badań niż ma to miejsce w przypadku badania w standardowym edometrze, który pozwala na zmianę wysokości próbki w zakresie 0,01 mm. Należy jednak pamiętać, że wartości ciśnienia pęcznienia uzyskane z badań w edometrze automatycznym są niższe od wartości uzyskanych z badań w standardowym edometrze;

- podobnie jak w badaniach opisywanych w literaturze, dla próbek o większej wilgotności naturalnej otrzymywano niższe wartości ciśnienia pęcznienia. W przypadku lokalizacji B zmiany te są bardziej znaczące niż w przypadku próbek z lokalizacji A. W praktyce, podczas projektowania konstrukcji, w przypadku występowania w poziomie posadowienia gruntów o wysokiej wartości wskaźnika plastyczności i w różnym stanie, należy uwzględnić zmiany pęcznienia;

- dla większości badań strefa, w której następowała zmiana wilgotności, a więc występowało pęcznienie, miała grubość ok. 1÷2 mm. Można stwierdzić, że pęcznienie występuje w strefie przy powierzchniowej (warstwy geotechnicz-

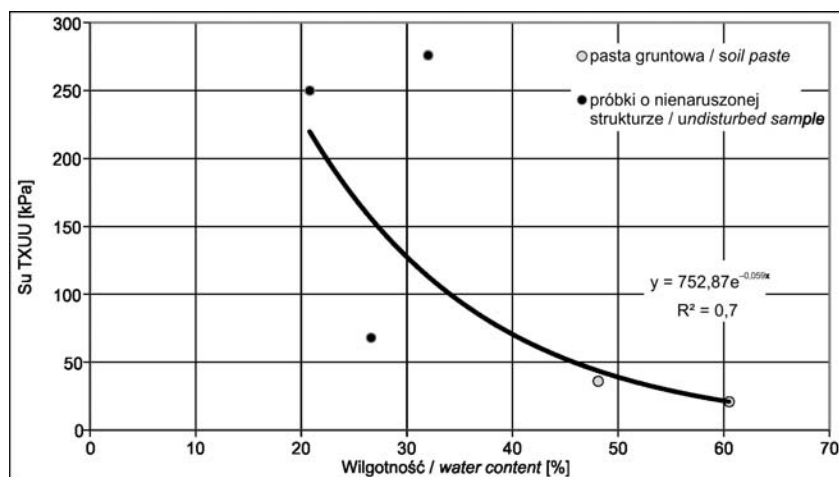


Ryc. 6. Wpływ wilgotności naturalnej na wskaźnik pęcznienia
Fig. 6. Water content impact on swelling strain



Ryc. 7. Wpływ początkowej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego na wskaźnik pęcznienia

Fig. 7. Initial dry density impact on swelling strain



Ryc. 8. Wpływ zmiany wilgotności naturalnej na wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu z badań TXUU

Fig. 8. Impact of water content change on undrained shear strength from TXUU tests

nej) i może być obecne w strefie o nie- wielkiej miąższości;

– obserwowano zmianę wilgotności w strefie pęczniającej (aktywnej). Największe zmiany zachodzą w strefie 0÷0,1 mm od powierzchni próbki. Największa zarejestrowana zmiana to wzrost bezwzględny wilgotności o 14,8%. Zmiana wilgotności w takim zakresie wpływa na zmianę stanu próbki, a co z tego wynika na zmianę właściwości wytrzymałościowych;

– zaobserwowano niższe wartości wskaźnika pęcznienia próbek wyciętych w orientacji poziomej niż próbek wyciętych w orientacji pionowej.

Autorzy dziękują prof. dr. hab. inż. Maciejowi Kordianowi Kumorowi oraz anonimowemu Recenzentowi za cenne uwagi, które przyczyniły się do poprawienia jakości i czytelności tej publikacji.

LITERATURA

- AL-SHAMRANI M.A., DHOWIAN A.W. 2003 – Experimental study of lateral restraint effects on the potential heave of expansive soils. *Eng. Geol.*, 69: 63–81.
- AVSAR E., ULUSAY R., SONMEZ H. 2009 – Assessments of swelling anisotropy of Ankara clay. *Eng. Geol.*, 105: 24–31.
- BASMA A.A., AL-HOMOUD A.S., HUSEIN A. 1995 – Laboratory assessment of swelling pressure of expansive soils. *Appl. Clay Sci.*, 9 (5): 355–368.
- CANTILLO V., MERCADO V., PÁJARO C. 2017 – Empirical Correlations for the Swelling Pressure of Expansive Clays in the City of Barranquilla, Colombia. *Earth Sci. Res. J.*, 21 (1): 45–49.

CHEN F.H., HUANG D. 1987 – Lateral expansion pressure on basement walls. *Proceedings of the 6th International Conference Expansive Soils*, New Delhi, 1: 55–59.

ERGULER Z.A., ULUSAY R. 2003 – A simple test and predictive models for assessing swell potential of Ankara (Turkey) Clay. *Eng. Geol.*, 67: 331–352.

ERZIN Y., EROL O. 2004 – Correlations for quick prediction of swell pressures. *Electron. J. Geotech. Eng.*, 9 (F), 0476.

FREDLUND D., RAHARDJO H. 1993 – *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, New York.

GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. (red.) 1998 – *Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych*. PWN, Warszawa.

JOSHI R.P., KATTI R.K. 1984 – Lateral pressure development under surcharges. *Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils*, Adelaide, South Africa: 227–241.

KUMOR M.K. 2016 – *Iły ekspansywne podłoża budowlanego. Wybrane problemy geotechniczne*. Wydaw. UTP, Bydgoszcz.

LAMBE T.W., WHITMAN R.V. 1969 – *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.

NELSON J.D., CHAO K.C., CHAO G.K., OVERTON D.D., NELSON E.J. 2015 – *Foundation engineering for expansive soils*. John Wiley & Sons, New York.

NELSON J., OVERTON D., DURKEE D. 2001 – Depth of Wetting and the Active Zone. *Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations*. ASCE Geotech. Spec. Publ., 115: 95–109.

NIEDZIELSKI A. 1993 – Czynniki kształtujące ciśnienie pęcznienia oraz swobodne pęcznienie iłów poznańskich i warwowych. *Roczn. Akad. Roln. w Poznaniu, Rozpr. Nauk.*, 238: 99.

PKN-CEN ISO/TS 17892-5:2009 *Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 8: Badanie gruntów nieskonsolidowanych w aparacie trójosiowego ściskania bez odpływu wody*.

PKN-CEN ISO/TS 17892-5:2009 *Badania geotechniczne – Badania laboratoryjne gruntów – Część 5: Badanie edometryczne gruntów*.

POWRIE W. 1997 – *Soil mechanics: Concepts and Applications*. E & FN Spon, London, New York.

RADWAN N.A., BAHLOUL K. M. 2019 – Correlation between Swelling Pressure and Free Swell of Greater Cairo City Expansive Soils – A Case Study. *J. Eng. Res. Rep.*, 6 (3): 1–6.

RONALD F., REED R., TAND K., VIPULANANDAN C. 2011 – Lessons learned from distress of foundations on expansive clays in the active zone. *Geo-Frontiers 2011 : Advances in Geotechnical Engineering*.

SAHIN H. 2011 – Characterization of expansive soil for retaining wall design. Master's thesis, Texas A&M University.

SAPAZ B. 2004 – Lateral vs. Vertical Swell Pressure in Expansive Soils. Master's thesis, Middle East Technical University, Turkey.

VILLAR V.M., LLORET A. 2008 – Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite. *Appl. Clay Sci.*, 39: 38–49.

Praca wpłynęła do redakcji 17.06.2021 r.

Akceptowano do druku 16.08.2021 r.