

IDENTYFIKACJA SKŁADU MINERALNEGO I PĘCZNIENIA GRUNTÓW SPOISTYCH NA PODSTAWIE WSPÓŁCZYNNIKA SWOBODNEGO PĘCZNIENIA

IDENTIFICATION OF CLAY SOIL MINERALOGY AND SWELLING BY THE FREE SWELL RATIO METHOD

DOROTA IZDEBSKA-MUCHA¹, EMILIA WÓJCIK¹

Abstrakt. W artykule przedstawiono wyniki badań parametrów pęcznienia ilów neogeńskich serii poznańskiej z rejonu Mazowsza oraz ilów modelowych przygotowanych z bentonitu z Wyoming i kaolinitu z Sedlec. Określono parametry pęcznienia takie jak: zmodyfikowany wskaźnik swobodnego pęcznienia (*MFSI*) i współczynnik swobodnego pęcznienia (*FSR*) oraz przeprowadzono analizę ich zależności od chemizmu roztworu, składu mineralnego i zawartości frakcji ilowej. Ocena składu mineralnego gruntów naturalnych na podstawie współczynnika swobodnego pęcznienia *FSR*, zdefiniowanego jako stosunek objętości 10 g gruntu wysuszonego w 105°C po sedymentacji w roztworze 0,0025% NaCl do objętości osadu w nafcie, okazała się orientacyjna.

Słowa kluczowe: ily neogeńskie, skład mineralny, kaolinit, montmorillonit, ekspansywność, współczynnik swobodnego pęcznienia.

Abstract. The paper presents the results of free swell measurements of Neogene clays and model clay mixtures composed of Wyoming bentonite and Sedlec kaolinite. Modified free swell index (*MFSI*) as well as free swell ratio (*FSR*) were determined and analyzed with respect to pore fluid chemistry, mineral composition and clay content. The *FSR*, defined as the ratio of the equilibrium sediment volume of 10-g oven dried soil in 0.0025% NaCl solution to that in kerosene, has proved to provide only a rough prediction of clay mineralogy in natural soils.

Key words: Neogene clays, mineral composition, kaolinite, montmorillonite, expansivity, free swell ratio.

WSTĘP

Na zachowanie się gruntów w podłożu budowlanym ma wpływ wiele czynników. W przypadku gruntów ekspansywnych kluczowe są wahania wilgotności, które mogą powodować znaczne zmiany objętości. Dlatego tak ważnym aspektem w praktyce geologiczno-inżynierskiej i geotechnicznej jest rozpoznanie właściwości ekspansywnych. Zdolności gruntu do pęcznienia i skurczu można ocenić zarówno na podstawie metod bezpośrednich (np. badania pęcznienia), jak i metod pośrednich opartych na różnych parametrach indeksowych gruntów. Obszerną analizę na ten temat zamieszczono w pracy Izdebskiej-Muchy i Wójcik (2014). Wnio-

skiem z przeprowadzonych przez autorki badań i analiz jest, że klasyfikacje oparte o cechy wskaźnikowe gruntu takie jak: granica płynności, wskaźnik plastyczności, czy zawartość frakcji ilowej wykazują zawyżoną w porównaniu z klasyfikacjami uwzględniającymi skład mineralny ocenę ekspansywności gruntów. Skład minerałów ilastych jest jednym z najważniejszych czynników fizycznych, które określają fizyczne, mechaniczne i odkształceniowe właściwości gruntów. Minerale o ruchomej sieci krystalicznej przy kontakcie z wodą wykazują o wiele większe pęcznienie niż minerale o sztywnej sieci krystalicznej. W związku z tym dokładne

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; e-mail: dim@uw.edu.pl, wojcike@uw.edu.pl.

ustalenie składu mineralnego jest ważne z praktycznego – inżynierskiego – punktu widzenia. Odkształcenia podłoża wywołane pęcznieniem prowadzą do poważnych uszkodzeń, a nawet awarii obiektów budowlanych.

W literaturze istnieje kilka propozycji predykcji składu mineralnego na podstawie parametrów indeksowych gruntu. Próby modyfikacji klasycznego nomogramu plastyczności w celu identyfikacji minerałów pęczniących podejmowali Holtz i Kovacs (1981). Również Arnold (1984) wykazał istnienie prawidłowości w rozkładzie trzech głównych grup minerałów ilastych w odniesieniu do zdefiniowanych przez Head (1992) linii A i B na pierwotnym nomogramie plastyczności.

Określenie składu mineralnego jest możliwe przy użyciu różnych metod np. dyfrakcji rentgenowskiej, analizy termicz-

nej bądź mikroskopu elektronowego. Techniki te wymagają jednak żmudnych przygotowań próbki i zaawansowanej aparatury badawczej. Alternatywną propozycję identyfikacji składu mineralnego gruntów podaje Sridharan i Prakash (2000) na podstawie klasyfikacji opartej o współczynnik swobodnego pęcznienia (*FSR*).

Prosta procedura, niskie koszty i obiecujące wyniki zachęciły autorki do wykonania analogicznych badań dla polskich gruntów. Celem artykułu jest analiza pęcznienia iłłów neogeńskich i weryfikacja przewidywanego na podstawie *FSR* składu mineralnego tych gruntów z wynikami badań ilościowych przy użyciu analizy termicznej. Badania na próbkach iłłów modelowych posłużyły do usystematyzowania roli czynników odpowiedzialnych za przebieg procesu pęcznienia.

METODY BADAŃ

Jedną z podstawowych wielkości, które charakteryzują grunt pęczniący jest wskaźnik pęcznienia. W literaturze można znaleźć różne koncepcje metodyczne i interpretacyjne oznaczania tego parametru. Powszechnie stosowanym, szybkim i, według wielu autorów, dostatecznie dokładnym testem służącym do określenia zdolności gruntów do pęcznienia jest metoda zaproponowana przez Holtza i Gibbsa (1956). Badanie to różni się od pozostałych, ponieważ wykonuje się je na próbkach gruntu sproszkowanego, powietrznie suchego i przesianego przez sito 0,425 mm. Jego procedura polega na określeniu procentowego przyrostu objętości luźno nasypanej próbki gruntu o początkowej objętości 10 cm³ do cylindra z wodą destylowaną o pojemności 100 cm³. Pęcznienie swobodne wyznaczone jest wg następującego wzoru:

$$FS = \frac{V-10}{10} \cdot 100\%$$

gdzie:

FS – pęcznienie swobodne [%],
10 – początkowa objętość próbki [cm³],
V – objętość końcowa próbki [cm³].

Wskaźnika swobodnego pęcznienia *FS*, obok cech materiałowych gruntu (zawartość frakcji iłowej, granice konsystencji) oraz pozostałych parametrów pęcznienia (wskaźnik pęcznienia i ciśnienie pęcznienia), użyto jako cechy wskaźnikowej do klasyfikacji gruntów ekspansywnych zaproponowanej przez Schulera i Goedecke'go (1982). Zgodnie z nią grunty o *FS*<10 charakteryzują się niską ekspansją, o *FS*>60 cechuje wysoka ekspansja, podczas gdy grunty o *FS*>140 wyróżniają się bardzo wysoką ekspansją (za Niedzielski, 1993).

Modyfikacje metody zaproponowanej przez Holtza i Gibbsa (1956) polegają na oznaczaniu pęcznienia swobodnego w cylindrze o objętości 50 cm³ (Head, 1992), bądź zastosowaniu stałej suchej masy gruntu równej 10 g (El Sohby i in.,

1988). Podobnie norma indyjska IS: 2720 (1977), w celu wyeliminowania rozbieżności masy badanych próbek zawartych w objętości 10 cm³ rekomenduje przeprowadzanie testu swobodnego pęcznienia przy użyciu stałej masy gruntu równej 10 g, wprowadzając jednocześnie, obok pomiaru objętości spęczniałego gruntu w wodzie destylowanej, pomiar w nafcie (ewentualnie w czterochlorku węgla CCl₄) w cylindrze o pojemności 100 cm³. Wskaźnik pęcznienia swobodnego *FSI* (*free swell index*) jest wyznaczany na podstawie wzoru:

$$FSI = \frac{V_d - V_k}{V_k} \cdot 100\%$$

gdzie:

FSI – wskaźnik swobodnego pęcznienia (%)
V_d – objętość 10 g gruntu w wodzie destylowanej (cm³),
V_k – objętość 10 g gruntu w nafcie (cm³).

Z badań przeprowadzonych przez Sridharana i in. (1985) wynika, że w przypadku gruntów zawierających duże ilości kaolinitu metoda oceny wskaźnika pęcznienia bazująca na *FSI* daje ujemne wyniki. Z tego względu wyżej wymienieni autorzy zaproponowali wprowadzenie zmodyfikowanego wskaźnika pęcznienia swobodnego *MFSI* (*modified free swell index*), który określa następujący stosunek:

$$MFSI = \frac{V_d}{10}$$

gdzie:

MFSI – zmodyfikowany wskaźnik swobodnego pęcznienia [cm³/g],
V_d – objętość 10 g gruntu po sedymentacji [cm³],
10 – masa gruntu suchego użytego do badania [g].

Dalsze badania Sridharana i Prakasha (2000) doprowadziły do zaproponowania kolejnego parametru bazującego na obserwacjach pęcznienia w cieczy polarnej i niepolarniej,

mianowicie współczynnika swobodnego pęcznienia – *FSR* (*free swell ratio*), zgodnie ze wzorem:

$$FSR = \frac{V_d}{V_k}$$

gdzie:

FSR – współczynnik swobodnego pęcznienia [–],

V_d – objętość 10 g gruntu po sedymentacji w wodzie destylowanej [cm³],

V_k – objętość 10 g gruntu po sedymentacji w nafcie [cm³].

Wyżej wymienieni autorzy proponują użycie 0,025% roztworu chlorku sodu NaCl, który przyspiesza sedymentację zawiesiny, co znacznie skraca czas badania, szczególnie w przypadku gruntów bardzo ekspansywnych.

Na podstawie współczynnika swobodnego pęcznienia *FSR*, Prakash i Sridharan (2004) stworzyli klasyfikację gruntów pod względem ekspansywności. Pozwala ona orientacyjnie określić skład mineralny gruntów, tzn. wskazać dominujący minerał ilasty występujący w danym gruncie (tab. 1).

Badania eksperymentalne prowadzono na dwóch grupach próbek. Pierwszą grupę stanowiły grunty naturalne – ły mio-plioceńskie z rejonu Mazowsza, które powszechnie występują na terenie Polski, stanowiąc podłoże budowlane wielu obiektów. Podstawowe parametry fizyczne i skład mineralny badanych gruntów przedstawiono w tabeli 2. Drugą grupę stanowiły grunty modelowe przygotowane z iłłów monomineralnych – kaolinitu z Sedlec i bentonitu z Wyoming, które użyto do przygotowania mieszanek w różnych proporcjach wagowych. Badania składu mineralnego gruntów modelowych potwierdziły ich status wzorca (tab. 2). Badania eksperymentalne pęcznienia swobodnego (*MFSI* i *FSR*) przeprowadzono zgodnie z opisaną powyżej metodyką dla 10 próbek gruntów naturalnych i 11 mieszanek o różnym procentowym udziale minerałów wzorcowych: Na-montmorillonitu (M) i kaolinitu (K) w 10 g naważce użytej do testu tj. 100% M, 90% M + 10% K, 80% M + 20% K, 70% M + 30% K, 60% M + 40% K, 50% M + 50% K, 40% M + 60% K, 30% M + 70% K, 20% M + 80% K, 10% M + 90% K, 100% K. Wykonano jedną serię badań w wodzie dejonizowanej, a drugą w nafcie zarówno dla przygotowanych mieszanek, jak i dla gruntów naturalnych (fig. 1). Aspekt poznawczy w przeprowadzonym eksperymencie stanowiło wykonanie badań pęcznienia w roztworze 0,025% roztworze chlorku sodu NaCl zgodnie z zalecaniami Sridharana i Prakash (2000) oraz roztworze o 10-krotnie większym rozcieńczeniu, czyli 0,0025% NaCl. Łącznie wykonano 53 testy swobodnego pęcznienia.

Tabela 1

Klasyfikacja gruntów na podstawie współczynnika swobodnego pęcznienia *FSR* (Prakash, Sridharan, 2004)

Soil classification based on free swell ratio *FSR* (Prakash, Sridharan, 2004)

Współczynnik swobodnego pęcznienia <i>FSR</i> [–]	Ekspansywność	Rodzaj gruntu ilastego	Dominujący minerał ilasty
≤1,0	pomijalna	niepęczniące	kaolinit
1,0–1,5	niska	mieszane (pęczniące i niepęczniące)	kaolinit i montmorillonit
1,5–2,0	umiarkowana	pęczniące	montmorillonit
2,0–4,0	wysoka	pęczniące	montmorillonit
>4	bardzo wysoka	pęczniące	montmorillonit

W tabeli 2 przedstawiono właściwości fizyczne i skład mineralny badanych iłłów neogennych i monomineralnych. W tabeli 2 przedstawiono właściwości fizyczne i skład mineralny badanych iłłów neogennych i monomineralnych. W tabeli 2 przedstawiono właściwości fizyczne i skład mineralny badanych iłłów neogennych i monomineralnych.

Tabela 2

Właściwości fizyczne i skład mineralny badanych iłłów neogennych i monomineralnych

Physical properties and mineral composition of the Neogene and monomineral clays

Numer próbki	Zawartość frakcji iłowej f_i [%]	Granica plastyczności w_p [%]	Granica płynności w_L [%]	Wskaźnik plastyczności I_p [%]	Pojemność sorpcyjna MBC [g/100 g]	Skład mineralny na podstawie analizy termicznej	
						beidellit [%]	kaolinit [%]
1	88	30,9	71,1	40,2	13,42	82	8
2	60	23,7	69,6	45,9	11,96	51	9
3	72	31,7	82,5	50,8	13,07	71	4
4	58	27,4	76,9	49,5	8,03	43	14
5	85	38,5	111,9	73,4	11,21	69	17
6	31	24,6	48,0	23,4	5,22	27	8
7	33	24,1	45,2	21,1	6,51	42	7
8	29	18,4	38,8	20,4	6,80	31	6
9	30	16,4	43,9	27,5	8,54	26	11
10	61	33,1	82,2	49,1	12,30	57	9
Bentonit z Wyoming	100	55,0	257,0	202,0	35,51	100	0
Kaolinit z Sedlec	68	40,0	51,0	11,0	1,12	0	100

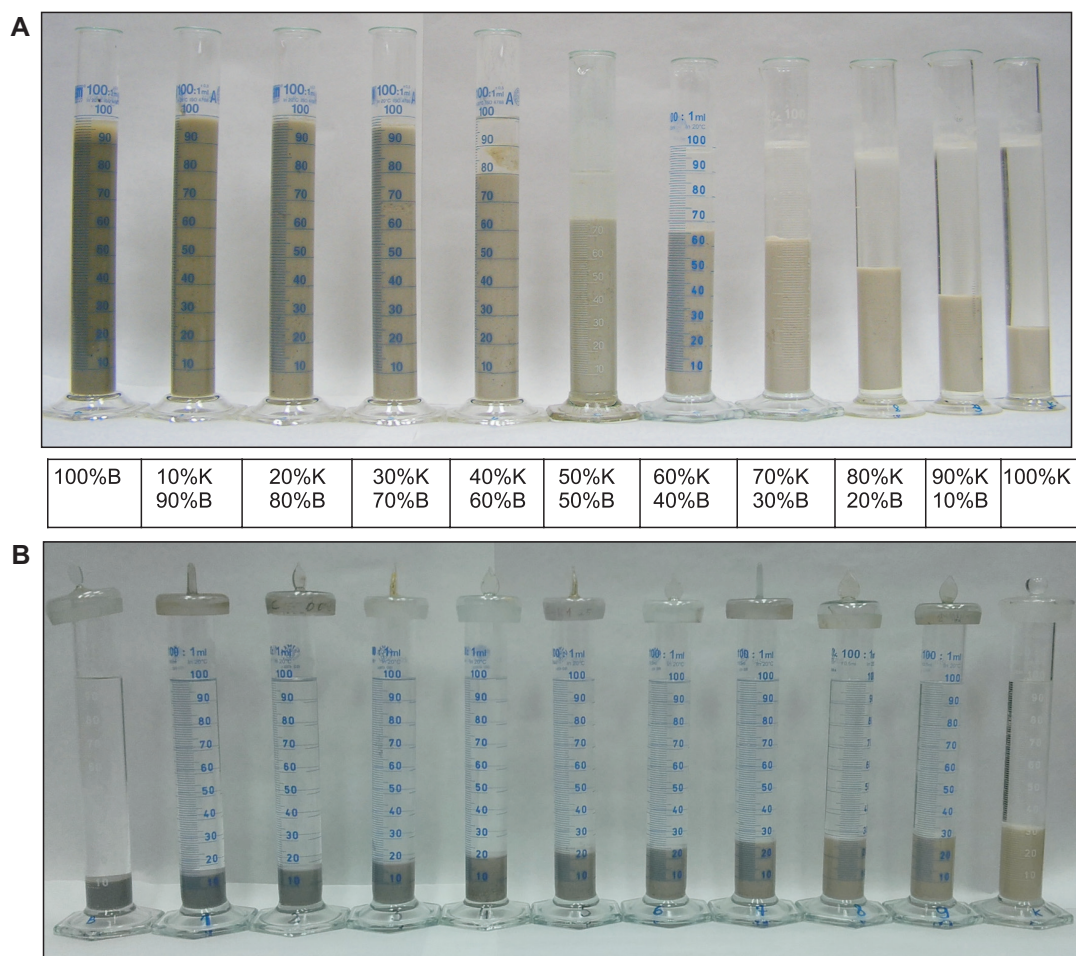


Fig. 1. Próbkę ilów modelowych

A – w roztworze 0,0025% NaCl; **B** – w nafcie oczyszczonej po zakończeniu procesu pęcznienia

The equilibrium sediments of model clays

A – in 0.0025% NaCl solution; **B** – in kerosene

Procedura przygotowania była jednakowa dla wszystkich próbek. W przypadku gruntów naturalnych i ilów modelowych nie napotkano problemów z dokładnym wymieszaniem naważki z naftą. Dla próbek o dużej zawartości montmorillonitu w badaniach z wodą dejonizowaną bardzo trudno było uzyskać jednorodną zawiesinę. Dlatego w przypadku tych próbek, po starannym wymieszanu komponentów naważki, przesypano ją do zlewki i dodano ok. 30 ml wody dejonizowanej w celu wstępnej homogenizacji próbki (fig. 2). Następnie przelewano powstałą zawiesinę do cylindra o pojemności 100 cm³, dbając o to, żeby ilość wody zużyta do wyczyszczenia zlewki nie przekroczyła zakładanej ilości wody dejonizowanej czyli 100 cm³.

Fig. 2. Wstępna homogenizacja zawiesiny ilów montmorillonitowych

Preliminary homogenization of suspension of montmorillonitic clays



WYNIKI BADAŃ

Analiza pęcznienia swobodnego ilów modelowych w roztworach 0,025% i 0,0025% NaCl w wodzie dejonizowanej wykazała, że w badaniach ilów montmorillonitowych nawet tak niskie stężenia roztworu nasycającego mają istotny wpływ na uzyskiwane wyniki. Badania potwierdziły prawidłowość, że im wyższy stopień mineralizacji roztworu, tym pęcznienie jest mniejsze. Różnice były tym większe, im wyższa zawartość montmorillonitu w próbce. Pomierzone wartości $MFSI$ różnią się o 0,70 do 3,65 cm^3/g (fig. 3). Różnice te są znaczące przy ocenie ekspansywności gruntów wg klasyfikacji zaproponowanej przez Sridharana i Prakasha (2000). W 6 z 11 badanych próbek klasa ekspansywności gruntu obniża się (tab. 3). W badaniach gruntów naturalnych o niższej zawartości frakcji ilowej i minerałów pęczniących różnice te mogą nie być tak wyraźne. Sridharan i Prakash (2000) nie stwierdzili różnic w objętości gruntów po sedymentacji (V_d) w wodzie destylowanej i w roztworze 0,025% NaCl, podkreślając jednocześnie korzyść z istotnego skrócenia czasu trwania eksperymentu przy zastosowaniu roztworu 0,025% NaCl. W dalszej części niniejszej pracy, analizę wyników badań przeprowadzono w odniesieniu do bardziej niekorzystnego, z punktu widzenia ekspansywności gruntu, wariantu badań, czyli w roztworze 0,0025% NaCl.

Badania pęcznienia swobodnego ilów modelowych w wodzie wykazały, że wraz ze wzrostem zawartości montmorillonitu, $MFSI$ zmienia się w zakresie od ok. 2 cm^3/g dla

czystego kaolinitu do ok. 10 cm^3/g dla próbek o zawartości montmorillonitu 70–100%. Zależność danych najlepiej opisuje funkcja wielomianowa $MFSI = -0,0007 \times M^2 - 0,012 \times M + 10,043$ (gdzie M – zawartość montmorillonitu) o wysokim współczynniku korelacji $R = 0,994$ (fig. 4). Proces pęcznienia w wodzie zakończył się po ok. 5 dobach.

W badaniu z naftą oczyszczoną pęcznienie było znacząco niższe, a trend zmian odwrotny. Wartości $MFSI$ zmieniają się w węższym zakresie, tj. od ok. 3,5 cm^3/g dla kaolinitu do ok. 1,5 cm^3/g dla montmorillonitu. Zależność między analizowanymi parametrami najlepiej opisuje równanie funkcji liniowej w postaci: $MFSI = -0,0201 \times M + 3,2864$; $R = 0,997$. Proces pęcznienia w nafcie zakończył się po 1 dobie.

Pozornie paradoksalny przebieg pęcznienia ilów w nafcie, gdzie kaolinit wykazuje wyższe wartości niż montmorillonit, ma swoje uzasadnienie w mechanizmie procesu sorpcji niepolarnych cieczy organicznych przez minerały ilaste, co zostało wyjaśnione w literaturze (np. Sridharan i in., 1985; Sridharan, Prakash, 1999).

Zależność współczynnika FSR od składu mineralnego przedstawiono na figurze 5. Zarówno dla gruntów modelowych, jak i gruntów naturalnych stwierdzono silną zależność liniową FSR od zawartości montmorillonitu/beidellitu. Jednak współczynniki równania obu funkcji wyraźnie się różnią. Większe nachylenie prostej dla ilów modelowych niż gruntów naturalnych jest związane przede wszystkim z róż-

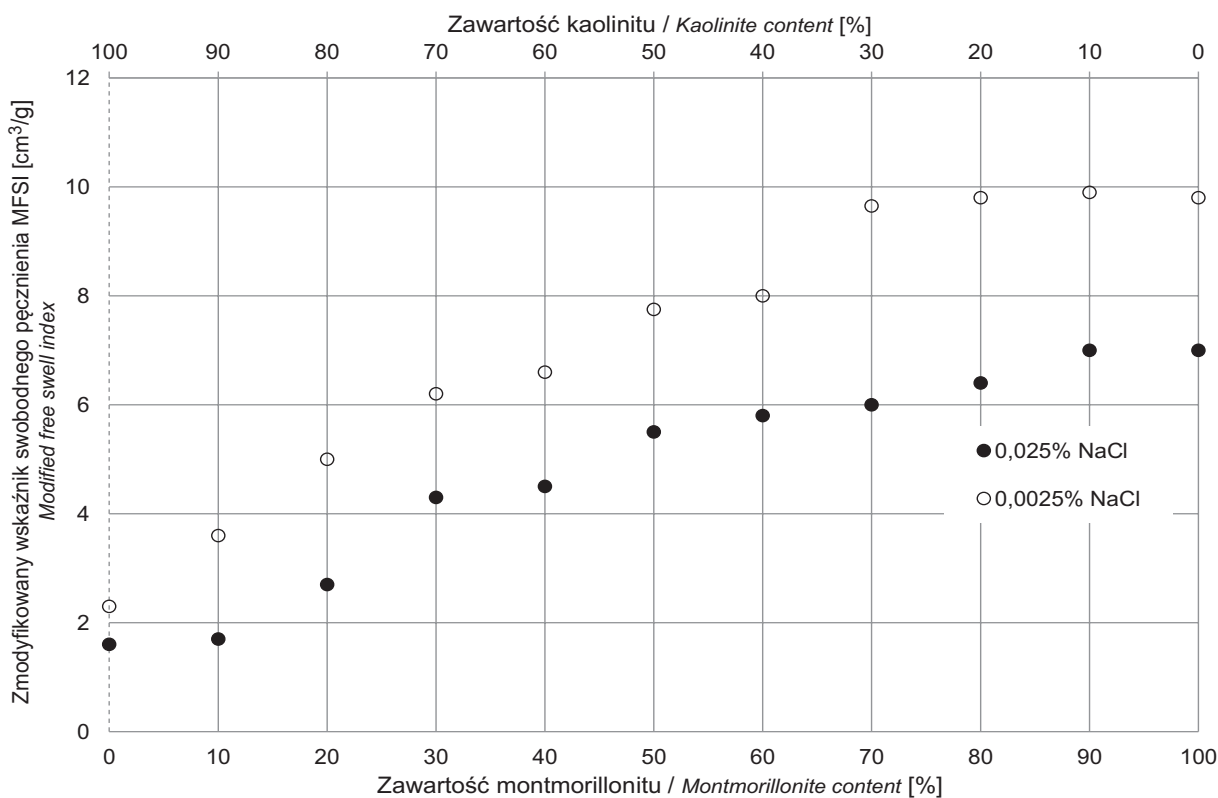


Fig. 3. Pęcznienie ilów modelowych w roztworach 0,0025% i 0,025%NaCl

Swelling of model clays in 0.0025% and 0.025%NaCl solutions

Tabela 3

Współczynnik swobodnego pęcznienia FSR i ekspansywność ilów modelowych badanych w roztworach 0,025% i 0,0025% NaCl wg klasyfikacji Prakasha, Sridharana (2004)

Free swell ratio FSR and expansivity of model clays tested in 0.025% and 0.0025% NaCl solutions according to the Prakash and Sridharan (2004) classification

Symbol próbki	FSR [-] 0,025% NaCl	Ekspansywność	FSR [-] 0,0025% NaCl	Ekspansywność
100% M	5,60	VH	7,84	VH
90% M	4,52	VH	6,39	VH
80% M	3,76	H	5,76	VH
70% M	3,24	H	5,22	VH
60% M	2,83	H	3,90	H
50% M	2,44	H	3,44	H
40% M	1,84	M	2,69	H
30% M	1,56	M	2,25	H
20% M	0,93	N	1,72	M
10% M	0,57	N	1,20	L
100% K	0,48	N	0,69	N

VH – bardzo wysoka $FSR > 4,0$; H – wysoka, $FSR = 2,0-4,0$; M – umiarkowana, $FSR = 1,5-2,0$; L – niska, $FSR = 1,0-1,5$; N – pomijalna $FSR < 1,0$

nicą w składzie mineralnym frakcji ilowej. Na-montmorillonit charakteryzuje się znacznie wyższą pojemnością sorpcyjną niż Ca-beidellit występujący w badanych gruntach naturalnych (tab. 2). Grunty montmorillonitowe wykazują zatem wyższą wrażliwość na działanie wody niż grunty beidellitowe,

co przekłada się na szybszy przyrost wartości FSR wraz ze wzrostem zawartości smektytu. Jednocześnie w badanym zbiorze próbek gruntów naturalnych nie stwierdzono zależności funkcyjnej FSR od zawartości kaolinitu, którego udział zamyka się w przedziale 4–17%. Badania na ilach modelo-

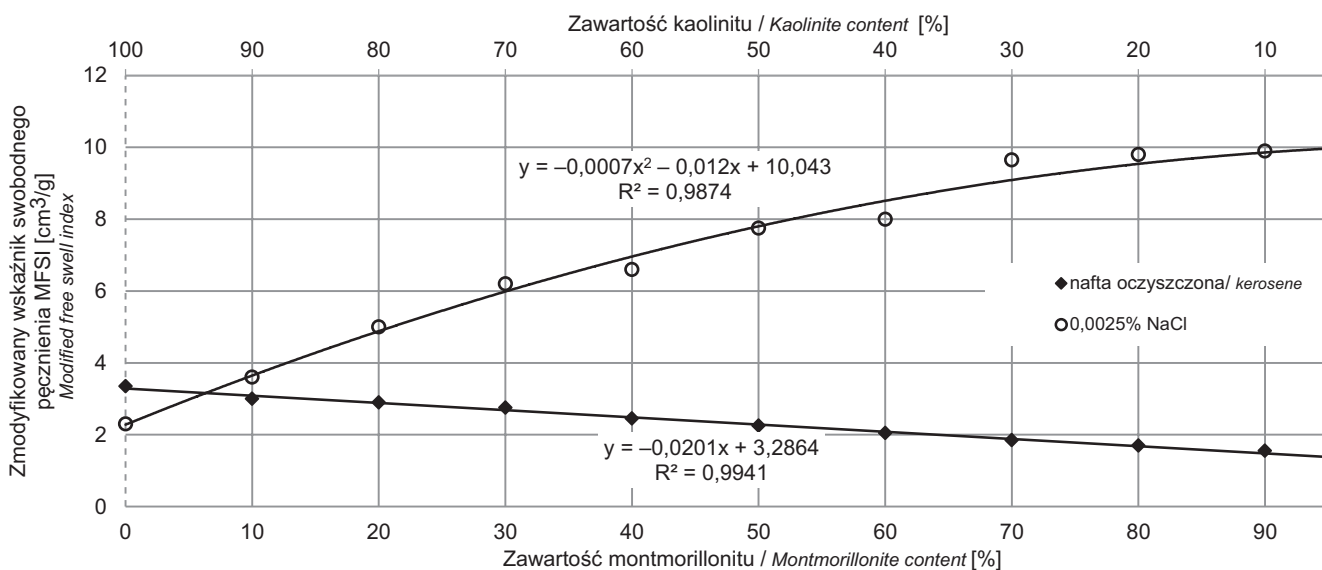


Fig. 4. Zmodyfikowany wskaźnik swobodnego pęcznienia $MFSI$ ilów modelowych

Modified free swell index $MFSI$ of model clays

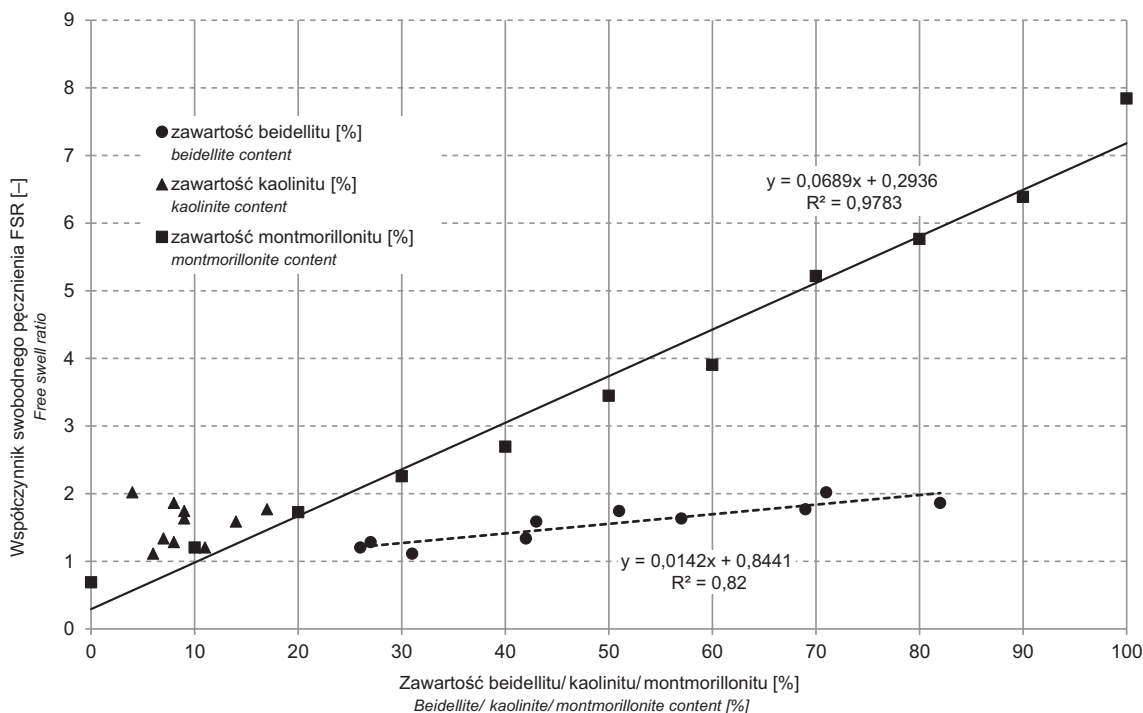


Fig. 5. Zależność współczynnika swobodnego pęcznienia FSR od zawartości kaolinitu, montmorillonitu i beidellitu

Relationship between free swell ratio FSR and the kaolinite, montmorillonite and beidellite content

wych pokazały, że przy tak niskich zawartościach kaolinitu nie wpływa on istotnie na wielkość pęcznienia – wartości *MFSI* dla próbek modelowych nie wykazały wyraźnych różnic przy zawartości kaolinitu do 30% (fig. 4).

Na figurze 6 przedstawiono wyniki badań pęcznienia ilów modelowych oraz gruntów naturalnych badanych przez autorki na tle danych literaturowych, naniesione na diagram klasyfikacyjny do oceny ekspansywności i składu mineral-

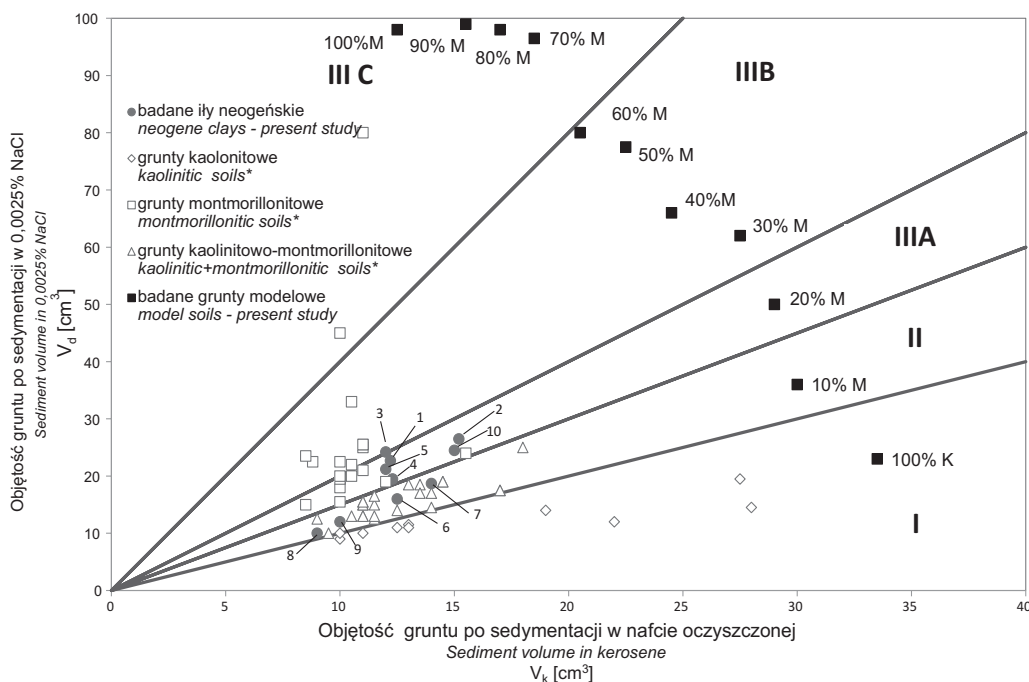


Fig. 6. Pęcznienie badanych gruntów na diagramie klasyfikacyjnym Prakasha, Sridharana (2004)

* dane literaturowe (Prakash, Sridharan, 2004); 1–10 – nr próbki zgodnie z tabelą 2

Swelling of the tested soils in a classification chart proposed by Prakash and Sridharan (2004)

* literature data (Prakash, Sridharan, 2004); 1–10 – soil sample number as in Table 2

nego wg Prakasha i Sridharana (2004). Pozycje próbek ilów modelowych wskazują na następujący rozkład zawartości montmorillonitu (M) i kaolinitu (K) w poszczególnych klasach:

- I – ekspansywność pomijalna, grunty kaolinitowe, skład: 100% K;
- II – ekspansywność niska, grunty kaolinitowe i montmorillonitowe, skład: 90% K + 10% M;
- III A – ekspansywność średnia, grunty montmorillonitowe, skład: 80% K + 20% M;
- III B – ekspansywność wysoka, grunty montmorillonitowe, skład: 70–40% K + 30–60% M;
- III C – ekspansywność bardzo wysoka, grunty montmorillonitowe, skład: $\leq 30\%$ K + 70–100% M.

Próbki ilów neogeńskich plasują się w klasach II, III A i III B, przy następującym rozkładzie zawartości beidellitu (B) i kaolinitu (K):

- II – ekspansywność niska, grunty kaolinitowe i montmorillonitowe, skład: 6–11% K + 26–42% B;

- III A – ekspansywność średnia, grunty montmorillonitowe, skład: 8–17% K + 82–43% B;
- III B – ekspansywność wysoka, grunty montmorillonitowe, skład: 4% K + 71% B.

Analiza danych pozwala również stwierdzić, że wartości pęcznienia ilów neogeńskich nakładają się na pole wyników badań literaturowych i na diagramie leżą znacznie niżej niż punkty odpowiadające ilom modelowym, które stanowią wyraźnie oddzielną grupę w strefie wyższych wartości V_d i V_k . Wynika to ze zróżnicowania składu mineralnego (Na-montmorillonit vs Ca-beidellit) oraz z niższej zawartości frakcji ilowej w gruntach naturalnych. Uzyskane wyniki dowodzą, że ocena składu mineralnego na podstawie stosunku V_d/V_k jest niezwykle nieprecyzyjna z uwagi na istotny wpływ trzeciego czynnika – zawartości frakcji ilowej – na wielkość pęcznienia. Jak wykazano jednak w pracy Izdebskiej-Muchy, Wójcik (2014), rozważana klasyfikacja wykazuje zgodność z innymi systemami w zakresie oceny ekspansywności gruntów.

PODSUMOWANIE

Badania pęcznienia swobodnego w wodzie i nafcie oczyszczonej są prostą, tanią i szybką metodą oceny ekspansywności gruntów oraz wskaźnikiem ich składu mineralnego.

W pracy przedstawiono wyniki badań pęcznienia ilów modelowych – mieszanki kaolinitu i Na-montmorillonitu o kontrolowanym składzie mineralnym oraz gruntów naturalnych – ilów neogeńskich. Badania przeprowadzono zgodnie z IS: 2720 (1977) oraz metodami podanymi przez Prakasha i Sridharana (2004).

Wyniki badań dowiodły, że badania gruntów modelowych, choć nakreśliły prawidłowości i kierunki zależności w analizowanym procesie pęcznienia, to w praktyce nie odzwierciedliły wrażliwości i zachowania się gruntów naturalnych, co było wynikiem zróżnicowania w składzie mineralnym i granulometrycznym obu grup gruntów.

W badaniach ilów modelowych stwierdzono, że skład chemiczny roztworu istotnie wpływa na wartość pęcznienia. W doświadczeniu z zastosowaniem roztworu 0,0025% NaCl uzyskano wartości $MFSI$ wyższe o 0,7–3,65 cm³/g niż w roz-

tworze 0,025% NaCl. Różnica była tym większa, im wyższa zawartość montmorillonitu.

Pęcznienie gruntu w roztworze wodnym jest tym większe, im wyższa jest zawartość montmorillonitu, natomiast w nafcie oczyszczonej zależność jest odwrotna – pęcznienie gruntu jest tym wyższe, im wyższa zawartość kaolinitu. Zaobserwowane prawidłowości wyznaczają kierunek zachowania się gruntów w różnych warunkach środowiskowych, w tym na skutek zanieczyszczenia środowiska cieczami organicznymi niepolarnymi.

Badania zarówno ilów modelowych, jak i gruntów naturalnych pokazały, że niska zawartość kaolinitu, tj. do ok. 20–30%, nie wpływa istotnie na wartość pęcznienia gruntu.

Oszacowanie składu mineralnego gruntu na podstawie współczynnika swobodnego pęcznienia FSR wg klasyfikacji Prakasha i Sridharana (2004) jest wysoce orientacyjne, nawet w zakresie jakościowym, z uwagi na istotny wpływ zawartości frakcji ilowej na wielkość pęcznienia gruntu.

LITERATURA

- ARNOLD M., 1984 — The genesis, mineralogy and identification of expansive soils. 5th Int. Conf. On Expansive Soils. Adelaide.
- EL SOHBY M.A., MAZEN S.O., BAKEY M.T.F.A., 1988 — Evaluation of free swell test measurements. Proc. of the Int. Conf. on Eng. Probl. of Reg. Soils, Beijing, China: 568–572.
- HEAD K.H., 1992 — Manual of soil laboratory testing. Vol. 1: Soil classification and compaction tests. Pentech Press, London.
- HOLTZ W.G., GIBBS H.J., 1956 — Engineering properties of expansive clays. *Trans. Amer. Soc. Civ. Eng.*, **121**, 1, paper 2814.
- HOLTZ W.G., KOVACS W.D., 1981 — An introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- IS: 2720, 1977 — Indian Standard Methods of Test for Soils: Part 40 – Determination of Free Swell Index of Soils, 1977, BSI, New Delhi.

- IZDEBSKA-MUCHA D., WÓJCIK E., 2014 — Expansivity of Neogene clays and glacial tills from Central Poland, *Geol. Quar.*, **58**, 2: 2818–290.
- NIEDZIELSKI A., 1993 — Czynniki kształtujące ciśnienie pęcznienia oraz swobodne pęcznienie ilów poznańskich i warwowych. Poznań.
- PRAKASH K., SRIDHARAN A., 2004 — Free Swell Ratio and Clay Mineralogy of Fine grained Soils, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, **27**, 2: 220–225.
- SCHULER G., GOEDECKE H.I., 1982 — Zur Beurteilung der Schwellfähigkeit von Bodenmittels Kornverteilung. Plastizität. Trockendichte und Freischwellwert. *Die Bautechnik*, **7**: 241–251.
- SRIDHARAN A., PRAKASH K. 1999 — Mechanisms Controlling the Undrained Shear Strength Behaviour of Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, **36**, 6: 1030–1038.
- SRIDHARAN A., PRAKASH K., 2000 — Classification Procedures for Expansive Soils. *Geotechnical Engineering, Proc. ICE (UK)*, **143**: 235–240.
- SRIDHARAN A., RAO S.M., MURTHY N.S., 1985 — Free Swell Index of Soils: A Need for Redefinition. *Indian Geotechnical Journal*, **15**, 2: 94–99.

SUMMARY

The paper presents the results of free swell measurements conducted according to IS: 2720 (1977) and methodology proposed by Prakash and Sridharan (2004). The tested soils included Neogene clays from the Mazovia region, monomineral clays (Na-montmorillonite and kaolinite) and model clay mixtures composed of Wyoming bentonite and Sedlec kaolinite in controlled proportions. The swelling was determined in kerosene as well as in 0.0025% and 0.025% NaCl water solution. Modified free swell index (*MFSI*) and free swell ratio (*FSR*) were determined and analyzed with respect to pore fluid chemistry, mineral composition and clay content. The results reflect the key role of fluid chemistry on soil swelling. Higher *MFSI* values were obtained in 0.0025%

than 0.025% NaCl solution (Fig. 3), which can affect soil expansivity evaluation (Tab. 3). Soil swelling in the water increases with increasing smectite content, whereas in the non-polar organic fluid (kerosene) the highest values were obtained for kaolinitic samples (Fig. 4). The results revealed that even small amounts of montmorillonite significantly influence soil expansivity (Fig. 6), while the kaolinite content up to about 30% does not affect soil swelling (Figs 4, 5). The *FSR*-based method to predict clay soil mineralogy was validated. The study revealed that without consideration of the clay content, the method cannot satisfactorily indicate the clay mineralogy.

