ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: BUDOWNICTWO z. 111 Nr kol. 1756

Adam NIEDZIELSKI, Maciej KROLL

Katedra Geotechniki
Akademia Rolnicza im. A. Cieszkowskiego, Poznań

WYKORZYSTANIE WZORÓW EMPIRYCZNYCH DO PROGNOZOWANIA SWOBODNEGO PĘCZNIENIA I CIŚNIENIA PĘCZNIENIA IŁÓW POZNAŃSKICH

Streszczenie. W pracy dokonano porównania wyników badań wskaźników swobodnego pęcznienia i ciśnienia pęcznienia iłów poznańskich z wynikami obliczeń tych parametrów wybranymi wzorami empirycznymi. Wszystkie badania laboratoryjne przeprowadzono na próbkach o nienaruszonej strukturze i naturalnej wilgotności. Analiza wariancji wykorzystana w rozważaniach porównawczych pozwoliła wyodrębnić wzory empiryczne, które najlepiej prognozują parametry pęcznienia iłów poznańskich.

USE OF EMPIRICAL EQUATIONS TO FORECASTING OF FREE SWELL AND SWELLING PRESSURE OF POSNANIAN CLAY

Summary. The paper presents comparison of test results of both free swell index and swelling pressure indices of Posnanian clay versus calculated values of these indices obtained from empirical equations. All the laboratory tests were conducted on undisturbed samples of natural moisture content. Analysis of variations enabled selection of equations allowing for the best forecast of swelling parameters of Posnanian clay.

1. Wstęp

Wzory empiryczne, będące matematycznym zapisem zależności wyznaczonej na drodze doświadczalnej, odgrywają istotną rolę w wielu działach geotechniki. Służą do przewidywania zachowania się gruntów budowlanych pod wpływem zmian różnych czynników, a także do wyznaczenia parametrów gruntów na podstawie ich cech fizycznych i wskaźnikowych, łatwych do ustalenia metodami laboratoryjnymi bądź polowymi. Jak wiadomo, wzory empiryczne pozawalają między innymi na określenie wskaźników wodoprzepuszczalności na podstawie krzywych uziarnienia gruntów niespoistych, służą do

obliczeń osiadań nasypów posadowionych na gruntach słabonośnych. Wykorzystywane są również do wyznaczania parametrów geotechnicznych, stanu gruntu, wytrzymałości na ścinanie i parametrów związanych z charakterystyką deformacji gruntu, na podstawie danych otrzymanych z badań sondą statyczną i badań dylatometrycznych [7].

W literaturze poświęconej gruntom ekspansywnym można znaleźć wiele zależności empirycznych, umożliwiających oszacowanie swobodnego pęcznienia i ciśnienia pęcznienia iłów [2, 4, 5, 6, 9, 11]. Wzory te najczęściej odnoszą się do ściśle określonych genetycznie gruntów bardzo spoistych. Ograniczeniem ich stosowania może być zawartość frakcji ilastej i skład mineralogiczny iłów. Dane uzyskane z obliczeń wzorami empirycznymi są z reguły uzupełnieniem badań laboratoryjnych pęcznienia, stanowią również wskazówkę do ustalenia zakresu badań laboratoryjnych i polowych. W praktyce inżynierskiej często pojawia się pytanie, które wzory empiryczne pozwalają najlepiej prognozować swobodne pęcznienie i ciśnienie pęcznienia iłów poznańskich. Skłoniło to do doświadczalnego sprawdzenia przydatności różnych wzorów empirycznych proponowanych w literaturze do tego celu.

2. Charakterystyka materiału badawczego

Wszystkie badania wskaźnika swobodnego pęcznienia i ciśnienia pęcznienia przeprowadzono na próbkach iłów poznańskich o nienaruszonej strukturze i naturalnej wilgotności. Próbki pobrano z trzech odkrywek cegielnianych w Witaszycach (1), Wysokiej (2) i Osieku nad Notecią (3, 4 i 5). Konsystencja iłów poddanych badaniom była na ogół twardoplastyczna. Jedynie ił z Witaszyc odznaczał się stanem półzwartym bliskim twardoplastycznemu. Zawartość frakcji ilastej w iłach pochodzących z różnych złóż i miejsc była zróżnicowana i mieściła się w granicach od 54% do 83%. Całkowita powierzchnia właściwa oznaczona testem sorpcyjnym [12] kształtowała się w przedziale wartości od 162,8 do 189 m^2/g. Procentowa zawartość montmorylonitu obliczona z testu sorpcyjnego mieściła się w zakresie od 15,2% do 25,1%. Według kryterium Danilova [3] wszystkie wytypowane do badań próbki iłu w stanie naturalnym zaliczyć należy do pęczniejących; wartość omawianego kryterium zmieniała się bowiem od 0,41 do 0,61 i była większa od wartości granicznej wynoszącej 0,3 [3, 9].

3. Metody badań pęcznienia

Swobodne pęcznienie iłów wyznaczono w aparacie Wasiliewa, zgodnie z zasadami podanymi przez Myślińską [8]. Każde badanie przeprowadzono w pięciu powtórzeniach. W ramach tych badań kontrolowano początkową i końcową wilgotność iłu, a także gęstość objętościową szkieletu gruntowego przed i po zakończeniu procesu pęcznienia.

Badanie ciśnienia pęcznienia przeprowadzono metodą opisaną w normie PN-88/B-04481 a wartości ciśnienia pęcznienia odczytano z wykresu otrzymanego z badań sześciu próbek poddanych pęcznieniu pod różnymi obciążeniami, z których przynajmniej jedno było zawsze większe od ciśnienia pęcznienia.

4. Wzory empiryczne

Wykorzystane w analizie porównawczej wzory empiryczne, przeznaczone do prognozowania wskaźnika swobodnego pęcznienia iłów, opierają się zazwyczaj na cechach fizycznych iłów w stanie naturalnym, a także na cechach wskaźnikowych iłów.

Wytypowano pięć następujących wzorów do obliczenia wskaźnika pęcznienia i porównano je z wynikami badań:

- wzór Nayaka i Christensena [2]:

$$\varepsilon_p = 0{,}0229 \cdot I_P^{1,45} \cdot \frac{f_i}{w_o} + 6{,}38 \tag{4.1}$$

- wzór Schneidera i Poora [2]:

$$\log \varepsilon_p = 0{,}9 \cdot \frac{I_P}{w_o} - 1{,}19 \tag{4.2}$$

- wzór Vijayvergiyi i Ghazzalego [13]:

$$\log \varepsilon_p = \frac{1}{12} \cdot \left(0{,}44 w_L - w_o + 5{,}5\right) \tag{4.3}$$

- wzór Vijayvergiyi i Sullivana [2]:

$$\log \varepsilon_p = 3{,}2837\, \rho_d + 0{,}033\, w_L - 6{,}8 \tag{4.4}$$

- wzór Johnsona [6], który obowiązuje w iłach o wskaźniku plastyczności I_P>0,40

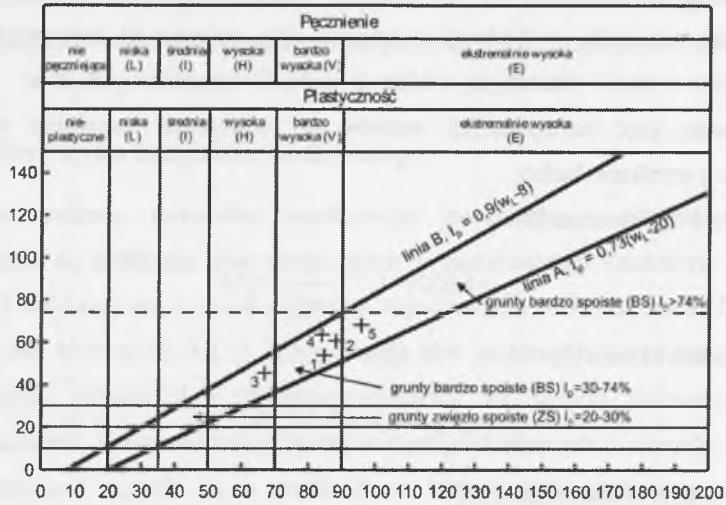
$$\varepsilon_p = 23{,}82 + 0{,}7346 I_P - 0{,}1458 H - 1{,}7 w_o + 0{,}0025 I_P \cdot w_o - 0{,}00884 I_P \cdot H \tag{4.5}$$

gdzie: w_L - granica plastyczności [%], I_P - wskaźnik plastyczności [%],
f_i - zawartość frakcji ilastej [%], w_o - wilgotność początkowa gruntu [%],

ε_p - wskaźnik swobodnego pęcznienia [%],
ρ_d - gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [g/cm^3],
H - miąższość warstwy pęczniejącej lub wysokość próbki [m].

Wszystkie dane potrzebne do obliczeń wskaźnika pęcznienia wyznaczono drogą doświadczalną, przy czym wartości wilgotności początkowej i gęstości objętościowej szkieletu gruntowego pochodziły z badań każdej próbki poddanej swobodnemu pęcznieniu lub pęcznieniu pod określonym obciążeniem.

Na wykresie Casagrandego w modyfikacji Grabowskiej-Olszewskiej [5] wszystkie omawiane iły zajmują pozycje na obszarze ograniczonym liniami A i B (rys. 1). Z nomogramu tego wynika również, że większość badanych iłów zaliczyć należy do gruntów o bardzo wysokiej zdolności pęcznienia, a nawet ekstremalnie wysokiej (nr 5). Tylko w jednym przypadku (nr 3) zdolność pęcznienia oceniono jako wysoką, bliską bardzo wysokiej.

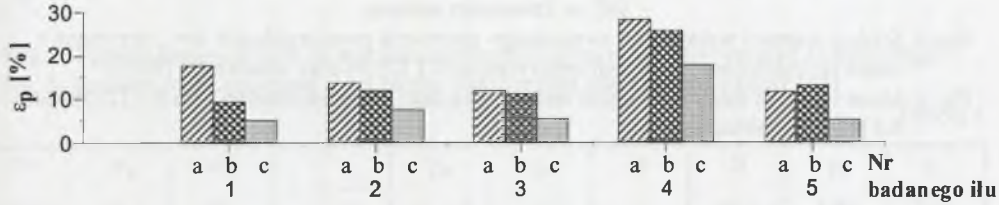


Rys. 1. Miejsce analizowanych gruntów na wykresie Casagrande zmodyfikowanym przez Grabowską-Olszewską [5]
Fig. 1. Location of the analyzed soils on Casagrande chart (modified by Grabowska-Olszewska) [5]

5. Wyniki badań i obliczeń wskaźnika pęcznienia

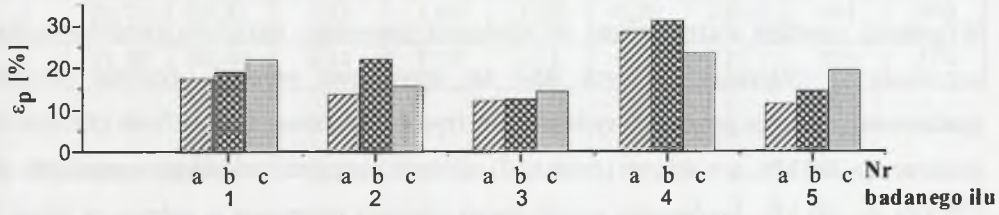
Histogramy wskaźników pęcznienia ułatwiają porównanie wyników uzyskanych z badań i obliczonych wzorami empirycznymi. Na rys. 2, 3 i 4 widać, że wartości wskaźnika pęcznienia pochodzące z obliczeń odbiegają w różnym stopniu od wartości pomierzonych w laboratorium. Poza wzorem 4.2 (rys. 2) wszystkie wyniki wyznaczone drogą pośrednią są

większe od wyników doświadczalnych. Najlepsza zgodność zaznacza się we wskaźnikach pęcznienia obliczonych wzorami empirycznymi 4.3 i 4.4 a wskaźnikami zbadanymi (rys. 3). Potwierdzeniem tego spostrzeżenia jest wynik analizy wariancji [1], w świetle której różnice między wartościami poszczególnych wskaźników można uznać za nieistotne na przyjętym poziomie istotności α równym 0,05. Dużą rozbieżność wyników obliczonych wzorami 4.1, 4.2, 4.5 i wyznaczonych laboratoryjnie widać na histogramach zamieszczonych na rys. 2 i 4. W tym wypadku wynik analizy wariancji prowadzi do wniosku o konieczności odrzucenia hipotezy o braku wpływu zastosowanej metody na wartości wskaźnika pęcznienia iłów poznańskich. Omawiane prawidłowości powtarzają się we wszystkich badanych iłach pochodzących z różnych miejscowości i pobranych z różnych głębokości w złożu naturalnym.



Rys. 2. Średnie wartości wskaźników swobodnego pęcznienia poszczególnych iłów, otrzymane z badań (a) i obliczonych wzorem empirycznym Schneidera i Poora [2] na podstawie granicy płynności oznaczonej stożkiem opadowym ITB (b) i metody Casagrande (c)

Fig. 2. Mean values of free swell indices of analyzed clays derived from test (a) and calculated with Schneider and Poor [2] empirical equation basing on fall cone (b) and Casagrande method (c)



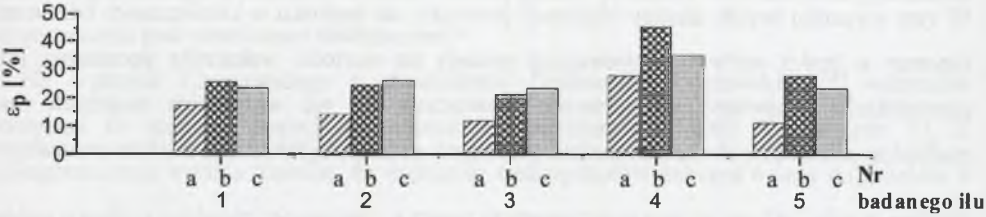
Rys. 3. Średnie wartości wskaźników swobodnego pęcznienia poszczególnych iłów, (a) otrzymane z badań, (b) obliczone wzorem empirycznym 4.3 [13] i (c) wzorem 4.4 [2]

Fig. 3. Mean values of free swell indices of clays derived from test (a) and calculations with 4.3 equation [13] (b) and 4.2 empirical equation [2] (c)

Korzystając ze wzoru 4.1, wyznaczono również wskaźniki pęcznienia na podstawie wartości granicy płynności otrzymanych metodą stożka opadowego ITB. Okazało się, że wartości tak obliczone są znacznie bliższe wynikom uzyskanym bezpośrednio z badań niż w wypadku wykorzystania granic płynności oznaczonych metodą Casagrande. W świetle

analizy wariancji różnice między porównywanymi wskaźnikami pęcznienia można uznać za statystycznie nieistotne na poziomie istotności α=0,05.

Przedstawiona analiza porównawcza wyników badań wskaźników pęcznienia obliczonych i pochodzących z badań skłania do wniosku, że najbardziej przydatne do prognozowania swobodnego pęcznienia iłów poznańskich są wzory empiryczne 4.3 [13] oraz 4.4 [2].



Rys.4. Średnie wartości wskaźników swobodnego pęcznienia poszczególnych iłów, otrzymane z badań (a) i obliczonych wzorem empirycznym 4.1 [2] (b) oraz wzorem 4.5 [6] (c)

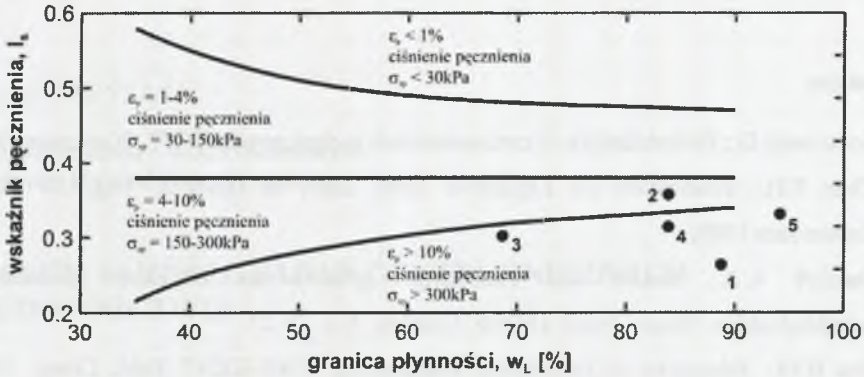
Fig. 4. Mean values of free swell indices derived from test (a) and calculation with 4.1 [2] (b) and 4.5 [6] (c) empirical equation

6. Ciśnienie pęcznienia

Do przewidywania ciśnienia pęcznienia wykorzystano wykres będący rodzajem nomogramu, opracowany przez Vijayvergiya i Ghazzalego [13]. Pozwala on oszacować ciśnienie pęcznienia na podstawie wilgotności naturalnej iłu i jego granicy płynności. Wilgotność naturalna służy bowiem do obliczenia umownego wskaźnika (współczynnika) pęcznienia I_s. Położenie badanych iłów na omawianym wykresie pozwala określić spodziewane ciśnienie pęcznienia tych gruntów (rys. 5). W czterech wypadkach ciśnienia te przekraczają 300 kPa, a w jednym (grunt nr 2) ciśnienie pęcznienia mieści się w granicach od 150 kPa do 300 kPa. Porównując wyniki badań ciśnienia pęcznienia p_c zebrane w tabeli 1 można dojść do wniosku, że są one bardzo bliskie wartościom oszacowanym z nomogramu (rys. 5). W tabeli 1 podano dla porównania wartości ciśnienia pęcznienia (pc*) obliczone ze wzoru Langmuira [10].

Obliczenia te zostały przeprowadzone zgodnie ze szczegółami podanymi w pracy Niedzielskiego i Gogolika [10] przy następujących założeniach: stężenie roztworu porowego wynosi 10^{-4} mola, temperatura T=293 K, stała dielektryczna wody ε=80,36 i wartość kationu wymiennego ν=2. W obliczeniach wykorzystano wyniki badań powierzchni właściwej iłów S, gęstości właściwej ρ_s i wskaźnika porowatości e. Wszystkie te dane zestawiono w tabeli 1.

Jak się okazało, wartości ciśnienia pęcznienia obliczone wzorem Langmuira są bardzo zbliżone do wartości ciśnienia pęcznienia pomierzonych w laboratorium.



Rys. 5. Pozycje badanych iłów na wykresie zaproponowanym przez Vijayvergiyę i Ghazzalego
Fig. 5. Location of the examined clays on the Vijayvergiya and Ghazzaly chart [13]

Tabela 1

Nr gruntu	w_o %	w_L %	$I_s = \frac{w_o}{w_L}$	ρ_d g/cm^3	ρ_s g/cm^3	e	S m^2/g	p_c kPa	p_c^* kPa
1	24,75	88,60	0,28	1,70	2,74	0,61	195,4	170	361
2	30,05	83,85	0,36	1,51	2,63	0,74	140,1	175	123
3	21,50	68,55	0,31	1,70	2,71	0,59	193,7	315	370
4	26,70	84,81	0,31	1,66	2,82	0,70	226,8	385	390
5	31,88	94,04	0,34	1,55	2,71	0,68	225,5	300	378

7. Podsumowanie

7.1. Analiza statystyczna wyników badań i obliczeń wskaźnika pęcznienia różnymi wzorami empirycznymi wykazała, że najbardziej przydatne do prognozowania wskaźnika pęcznienia iłów poznańskich są wzory empiryczne 4.3 i 4.4.

7.2. Nomogram Vijayvergiyi i Ghazzalego [13] pozwala na przewidywanie zakresu ciśnień pęcznienia iłów poznańskich na podstawie ich wilgotności początkowej i granicy płynności.

7.3. Porównanie wyników badań i obliczeń ciśnienia pęcznienia wzorem Langmuira [10] potwierdza dużą przydatność tego wzoru do przewidywania ciśnienia pęcznienia iłów poznańskich.

Literatura

1. Bobrowski D.: Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT, Warszawa 1980.
2. Chen F.H.: Foundation on Expansive Soils. Dev. in Geotech. Eng. 54 Elsevier, Amsterdam 1988.
3. Danilov A.A.: Grafik dlja rozdelenija gruntov na obychnye prosadochnye nobukhajushhie. Osnov. Fund. i Mekh. Gruntov, 5: s. 26-27.
4. Das B.M.: Principles of Foundation Engineering. PWS-KENT Publ. Comp. Boston, Massachusetts 1984.
5. Grabowska-Olszewska B.: Właściwości gruntów nienasyconych. PWN, Warszawa 1998.
6. Johnson L.P., Snethen D.R.: Predictions of potential heave of swelling soil. Geotech. Tests. J. GTJODJ, 1, 3, September 1978, p. 117-124.
7. Młynarek Z., Tschuschke W.: Parametry geotechniczne z badań in situ dla potrzeb projektowania posadowień. XX Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja, Warsztat pracy projektanta konstrukcji, Wisła-Ustroń 2005, s. 111-136.
8. Myślińska E.: Laboratoryjne badania gruntów. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1998.
9. Niedzielski A.: Czynniki kształtujące ciśnienie pęcznienia oraz swobodne pęcznienie iłów poznańskich i warwowych. Roczniki A.R. w Poznaniu 1993, Rozprawy z. 238.
10. Niedzielski A., Gogolik S.: Ocena przydatności wzoru Langmuira do prognozowania ciśnienia pęcznienia iłów poznańskich i warwowych. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Budownictwo z. 97, Gliwice 2003, s. 129-136.
11. Sorochan E.A. i in.: Spravochnik proektirovshhika. Stroitelstvo zdanij i podzemnykh sooruzhenijj. Moskva 1985.
12. Stępkowska E.T.: Test sorpcyjny i możliwości jego stosowania w różnych badaniach. Arch Hydrot. XXIV, 3, 1977, s. 411-420.
13. Vijayvergiya V.N., Ghazzaly O.I.: Prediction of swelling potential of natural clays. Proc. of the 3rd Inter. Conf. on Expansive Soils. Haifa 1973, p. 227-239.

Recenzent: Prof dr hab inż Tomasz Strzelecki