

Joanna Stróżyk*

ZASTOSOWANIE RÓWNAŃ WSKAŹNIKA ŚCISLIWOŚCI C_c DO OCENY ŚCISLIWOŚCI IŁÓW SERII POZNAŃSKIEJ

1. Wstęp

Ścisłość gruntów, obok ich wytrzymałości, jest jedną z najistotniejszych cech podłoża branych pod uwagę na etapie projektowania konstrukcji inżynierskich, posadawianych na podłożu gruntowym. Ścisłość charakteryzuje zmianę objętości gruntu wobec zwiększającego się obciążenia. Dla celów inżynierskich najczęściej oznaczana jest w laboratorium, w stanie jednoosiowego odkształcenia, w teście edometrycznym. Na jego podstawie wyznaczyć można podstawowe parametry charakteryzujące ścisłość: edometryczny moduł ścisłości E_{oed} , wskaźnik ścisłości i odprężenia C_c i C_s oraz naprężenie prekonsolidacji σ'_p [9].

Typowa krzywa ścisłości otrzymywana z badania, wykreślona w układzie wskaźnik porowatości e — logarytm efektywnego naprężenia pionowego $\log \sigma'_v$, została przedstawiona na rysunku 1. Krzywa składa się z dwóch podstawowych fragmentów o przebiegu w przybliżeniu liniowym. Pierwsza część krzywej przedstawia ścisłość w zakresie obciążeń wtórnych i reprezentuje odkształcenia w przewodzie sprężyste. Druga część krzywej przedstawia ścisłość w zakresie obciążeń pierwotnych i reprezentuje odkształcenia w przewodzie plastyczne. Pochylenie pierwszego odcinka krzywej opisywane jest wskaźnikiem odprężenia C_s , natomiast drugiego odcinka wskaźnik ścisłości C_c . Wskaźniki obliczane są z zależności [9, 12]:

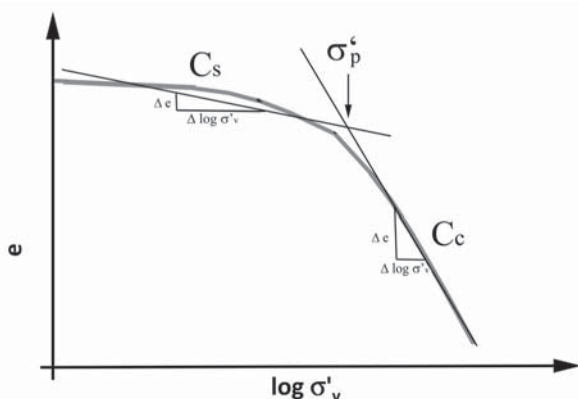
$$C_c, C_s = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (1)$$

gdzie:

- e — wskaźnik porowatości,
- σ'_v — efektywne naprężenie pionowe.

* Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

Wskaźniki ścisłości C_c i odprężenia C_s wykorzystywane są do obliczeń osiadań podłoża gruntowego [1, 6, 9]. W odróżnieniu od edometrycznego modułu ścisłości E_{oed} wartości C_c i C_s są stałe dla danego gruntu i nie zależą od obciążenia co powoduje, że są znacznie chętniej stosowane w obliczeniach. Granicę zastosowań w obliczeniach wskaźnika odprężenia C_s i ścisłości C_c wyznacza naprężenie prekonsolidacji σ'_p (charakterystyczny punkt załamania krzywej ścisłości (rys. 1).



Rys. 1. Krzywa ścisłości (C_c — wskaźnik ścisłości, C_s — wskaźnik odprężenia, σ'_p — naprężenie prekonsolidacji, e — wskaźnik porowatości)

Wyznaczenie wskaźników C_c i C_s w przypadku gruntów drobnoziarnistych ze względu na potrzebny długi czas konsolidacji oraz konieczność pozyskania próby gruntu odpowiedniej klasy jakości jest kosztowne i długotrwałe. W związku z powyższym poszukuje się zależności pomiędzy wskaźnikami C_s i C_c a wartościami charakterystycznych parametrów geotechnicznych, które umożliwią szybsze, wstępne oszacowanie osiadań [2, 7, 8, 10, 11, 13–15, 17–21]. Najszerzej znanym równaniem pozwalającym wyznaczyć wartość C_c jedynie na podstawie wartości granicy płynności w_L jest równanie wskaźnika ścisłości Skemptona wyprowadzone dla gruntów ilastych o strukturze przerobionej [19–21]:

$$C_c = 0,007(w_L - 10) \quad (2)$$

Dla gruntów NC — normalnie konsolidowanych, o strukturze naturalnej stosuje się wersję poprawioną równania (2) przez Terzagiego i Pecka [18]:

$$C_s = 0,009(w_L - 10) \quad (3)$$

Wzory (2) i (3) stały się podstawą do dalszych poszukiwań równań wskaźnika ścisłości C_c [7, 17–21]. Prace [10, 17–18, 21] wykazały, że wartość C_c zależy

może nie tylko od granicy płynności w_L , ale również od wilgotności naturalnej w_n , wskaźnika porowatości e_0 , czy wskaźnika plastyczności I_p a także wskaźnika skurczalności I_s (tabela 1). Najnowsze badania wskazują [4, 20–21], że wartość C_c uzależnić można również od wskaźnika porowatości gruntu e_L — wyznaczonego dla tego samego gruntu o strukturze przerobionej i wilgotności odpowiadającej granicy płynności w_L (tabela 1).

TABELA 1
Równania wskaźnika ścisłości C_c

Równanie	Zastosowanie	Autor
$C_c = 0,007 (w_L - 10)$	Iły przerobione	Skempton – 1944 (por. [19])
$C_c = 0,009 (w_L - 10)$	Iły naturalne	Terzagi i Peck – 1967 (por. [19])
$C_c = 0,006 (w_L - 9)$	Iły	Azzouz i in. – 1976 [2]
$C_c = 0,008 (w_L - 12)$	Iły	Sridharan i Nagaraj – 2000 [18]
$C_c = 0,014 (I_p + 3,6)$	Iły	Sridharan i Nagaraj – 2000 [18]
$C_c = 0,007 (I_s + 18)$	Iły	Sridharan i Nagaraj – 2000 [18]
$C_c = 0,01 w_n$	Iły	Koppula – 1981 [11]
$C_c = 0,001 (w_n - 7,519)$	Iły	Herrero – 1983 (por. [18])
$C_c = 0,208 e_0 + 0,0083$	Iły z Chicago	Bowles 1989 [5]
$C_c = 0,156 e_0 + 0,0107$	Iły	Bowles 1989 [5]
$C_c = 0,40 (e_0 - 0,25)$	Iły	Azzouz i in. – 1976 [2]
$C_c = 0,5 I_p G_s$	Iły przerobione i naturalne	Wroth i Wood – 1978 (por. [10])
$C_c = 0,2237 e_L$	Iły przerobione i naturalne	Nagaraj i in. – 1983 [14]
$C_c = 0,2343 e_L$	Iły przerobione i naturalne	Nagaraj i in. – 1986 [14]
$C_c = 0,274 e_L$	Mieszanki ilasto–piaszczyste	Nagaraj i in. – 1995 (por. [17])

w_L — granica płynności, w_n — wilgotność naturalna, e_0 — wskaźnik porowatości, e_L — wskaźnik porowatości pasty gruntowej przy wilgotności w_L , I_p — wskaźnik plastyczności, I_s — wskaźnik skurczalności

W pracy podjęto próbę oceny możliwości korzystania z równań wskaźników ścisłości dla oceny wartości C_c iłłów serii poznańskiej. Badania przeprowadzono na iłłach z rejonu Wrocławia. Wyznaczone z badań wartości wskaźnika C_c porównano z wartościami C_c wyznaczonymi z niektórych równań z tabeli 1.

2. Materiał do badań

Do badań wytypowano iłły serii poznańskiej z okolic Wrocławia. Iłły te na nomogramie plastyczności Casagrande’a leżą powyżej linii A [16]. Grunty te w składzie granulometrycznym zawierają praktycznie tylko frakcje drobne: Cl i Si, z czego frakcji iłłowej Cl od 38,9—76,6%. Skład granulometryczny oraz cechy fizyczne i wskaźniki klasyfikacyjne analizowanych gruntów przedstawiono w tabeli 2. Iłły te są gruntami prekonsolidowanymi o często znacznej wartości ciśnienia prekonsolidacji σ'_p [16] (tabela 3).

TABELA 2

Wartości podstawowych cech fizycznych i wskaźników klasyfikacyjnych analizowanych gruntów

Nr próbki	Rodzaj gruntu (ISO)	Fracje [%]			e_0	e_L	w_n	w_p	w_L	I_p	I_c
		Cl [%]	Si [%]	Sa [%]	[—]	[—]	[%]	[%]	[%]	[—]	[—]
1	Cl	66,9	33,1	0	0,61	1,79	25,20	23,70	67,20	43,50	0,97
2	Cl	64,7	35,3	0	0,60	1,93	23,10	23,40	71,20	47,80	1,01
3	Cl	39,3	60,7	0	0,71	1,35	21,53	23,80	47,90	24,10	1,09
4	Cl	38,9	55,6	5,5	0,90	2,21	26,69	22,30	50,10	27,80	0,84
5	Cl	49,0	48,2	2,8	0,82	2,28	26,60	23,80	47,90	24,10	0,88
6	Cl	76,6	23,4	0	0,64	2,17	19,26	23,00	80,90	57,90	1,06
7	Cl	68,7	31,3	0	0,64	2,30	19,20	25,40	79,00	53,60	1,12
8	Cl	68,0	32,0	0	0,57	1,87	20,30	28,00	70,40	42,40	1,18
9	Cl	70,2	29,8	0	0,51	2,03	19,60	32,00	76,00	44,00	1,28

w_L — granica płynności, w_n — wilgotność naturalna, e_0 — wskaźnik porowatości, e_L — wskaźnik porowatości pasty gruntowej przy wilgotności w_L , I_p — wskaźnik plastyczności, I_c — wskaźnik konsystencji

3. Metoda badań

Analizę przeprowadzono na podstawie edometrycznych badań ściśliwości 9 próbek iłów. Badania prowadzono procedurą I_L [9, 16]. Obciążenia realizowano w edometrach powyżej wartości σ'_p (tabela 3) aż zależność pomiędzy wskaźnikiem e a $\log \sigma'_v$ stawała się w przybliżeniu liniowa. Efekt taki, dla analizowanych gruntów, uzyskiwano zwykle przy obciążeniu powyżej 1–1,5 MPa. Obciążenia kontynuowano aż do obciążenia równego 3,5 MPa. W analizie uwzględniono tylko te badania, gdzie wartość C_c po przekroczeniu obciążenia σ'_p stabilizowała się i nie odbiegała w trzech kolejnych przedziałach naprężeń więcej niż 10%.

4. Wyniki badań

Wartości obliczonych wskaźników C_c i naprężeń prekonsolidacji podano w tabeli 3. Oszacowane z badań edometrycznych wartości wskaźników C_c analizowanych gruntów mieszczą się w przedziale 0,15 do 0,40 i są typowa dla iłów [3]. Najniższe wartości C_c stwierdzono dla gruntów o małej początkowej wartości wskaźnika porowatości e_0 (tabela 2 i 3).

Korelację pomiędzy wyznaczonymi z badań wartościami wskaźnika C_c a w_L , w_n , e_0 oraz e_L przedstawiono na rysunku 2.

Analizując wyniki badań (rys. 2d) nie zauważono korelacji pomiędzy C_c a e_L — wskaźnikiem porowatości pasty gruntowej przy wilgotności równej w_L .

Słaba korelacja jaka pojawia się pomiędzy wskaźnikiem C_c a w_L (rys. 2a), mogąca być wynikiem małego rozrzutu samej wartości w_L przy dużej zmienności C_c sugeruje że równania (2) i (3) nie spełniają oczekiwań dla analizowanych gruntów. Zależność pomiędzy C_c a w_L — odwrotnie proporcjonalna, jest też odwrotna do tej jaką uzyskiwano dla past gruntowych

TABELA 3

**Wartości wskaźników ścisłości analizowanych gruntów
(OED – badanie edometryczne)**

Nr próbki	Rodzaj gruntu (ISO)	σ'_p	C_c OED	$C_c = 0,009 \cdot (w_L - 10)$	$C_c = 0,01 w_n$	$C_c = 0,208 e_0 + 0,0083$	$C_c = 0,156 e_0 + 0,0107$	$C_c = 0,40 \cdot (e_0 - 0,25)$	$C_c = 0,763 \cdot e_0 - 0,273$
		[kPa]	[—]						
1	Cl	750	0,190	0,515	0,252	0,135	0,106	0,140	0,192
2	Cl	770	0,190	0,551	0,231	0,133	0,104	0,140	0,185
3	Cl	670	0,250	0,341	0,215	0,156	0,121	0,184	0,269
4	Cl	680	0,400	0,361	0,267	0,196	0,151	0,260	0,414
5	Cl	910	0,400	0,341	0,266	0,179	0,139	0,228	0,353
6	Cl	700	0,196	0,638	0,193	0,141	0,111	0,156	0,215
7	Cl	710	0,184	0,621	0,192	0,141	0,111	0,156	0,215
8	Cl	480	0,158	0,544	0,203	0,126	0,099	0,127	0,160
9	Cl	420	0,150	0,594	0,196	0,115	10,091	0,106	0,119

[7, 19–21]. Słabą korelację zauważono również pomiędzy C_c a wilgotnością w_n (rys. 2b). Najlepszą korelację stwierdzono pomiędzy C_c a e_0 (rys. 2c) sugerowałyby to, że równanie wskaźnika C_c powinno opierać się na wskaźniku porowatości e_0 analizowanego gruntu.

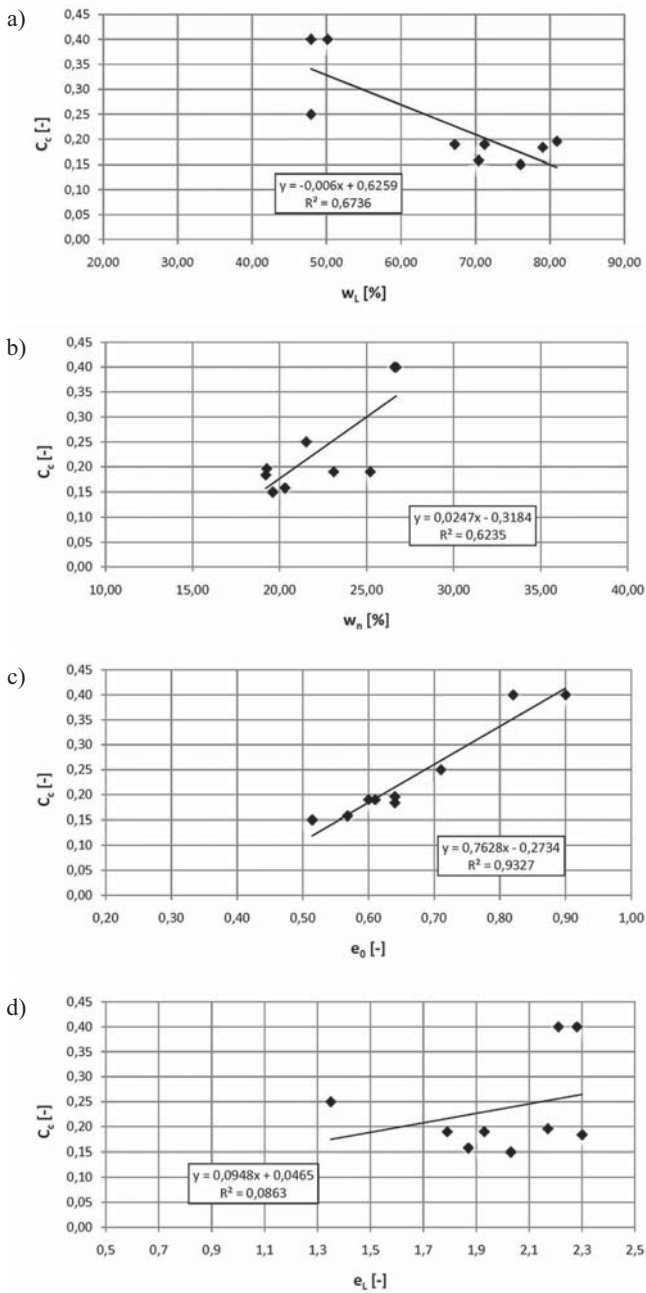
W związku ze stwierdzonymi zależnościami (rys. 2) sprawdzono dla analizowanych iłłów stosowalność wzoru (3) jako najszerzej stosowanego dla iłłów oraz równań uzależnionych od wilgotności naturalnej w_n (tabela 1) i przede wszystkim równań opartych na wskaźniku porowatości e_0 (tabela 1). Uzyskane wartości wskaźników C_c wyznaczonych z badań edometrycznych wraz z wartościami C_c uzyskanymi z niektórych równań zestawiono w tabeli 3. Wybrane zależności korelacyjne przedstawiono na rysunku 3.

Stwierdzono, że równanie (3) nie znajduje zastosowania w przypadku iłłów serii poznańskiej. Uzyskane z (3) wartości C_c znacznie odbiegają od rzeczywistych (tabela 3, rys. 3a) i w większości przypadków są znacznie zawyżone. Równanie oparte na wilgotności naturalnej w_n (tabela 1 i 3) znacznie lepiej pozwala wyznaczyć wartość wskaźnika C_c lecz i w tym przypadku wartości są zwykle zawyżone, a w przypadku gruntów o bardzo wysokim e_0 заниżone. Najlepszą korelację z zaprezentowanych równań (tabela 1) uzyskano dla równania wiążącego wskaźnik C_c z e_0 (rys. 3b) [2]:

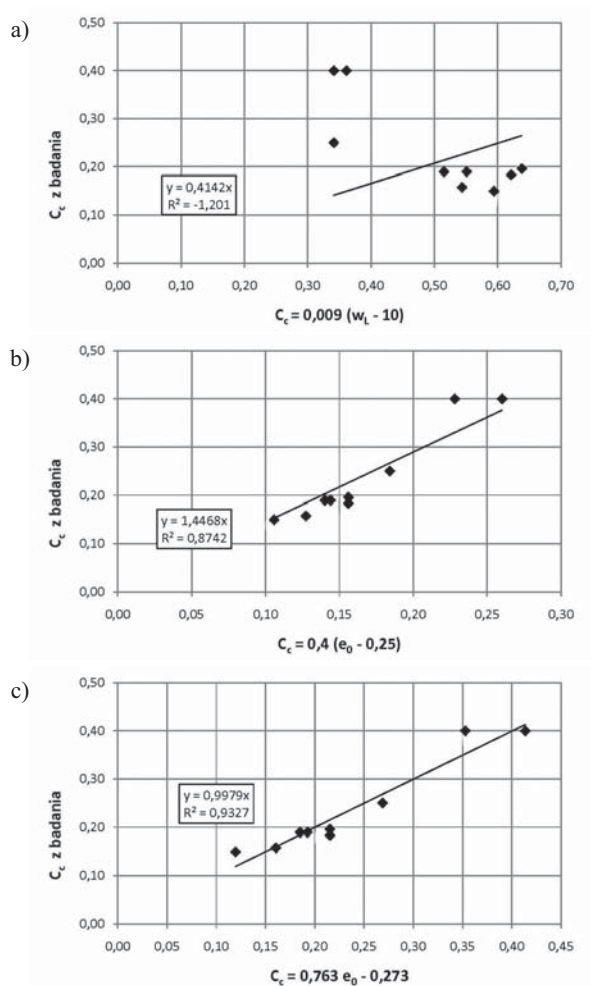
$$C_c = 0,40(e_0 - 0,25) \quad (4)$$

Przeprowadzona analiza pozwoliła wyznaczyć korelację pomiędzy C_c a e_0 dla prekonsolidowanych iłłów serii poznańskiej (rys. 2d, rys. 3c, tabela 3) i wyprowadzić równanie wskaźnika C_c najlepiej opisujące tę zależność:

$$C_c = 0,763e_0 - 0,273 \quad (5)$$



Rys. 2. Zależność pomiędzy wartością wskaźnika ściśliwości C_c wyprowadzoną z badań edometrycznych a: a) w_L — granicą płynności, b) w_n — wilgotnością naturalną, c) e_0 — początkowym wskaźnikiem porowatości, d) e_L — wskaźnikiem porowatości pasty gruntowej przy wilgotności równej w_L



Rys. 3. Zależność pomiędzy wartością wskaźnika ścisłości C_c wyprowadzoną z badań edometrycznych a: a) wartością C_c obliczoną z (3), b) wartością C_c obliczoną z (4), c) wartością C_c obliczoną z (5)

5. Wnioski

W przypadku prekonsolidowanych iłłów prawidłowe wyznaczenie wskaźnika ścisłości C_c w laboratorium, wymaga przeprowadzenia badań edometrycznych przy dużych obciążeniach — powyżej σ'_p — często znacznie przekraczających zalecenia normowe.

Równania ścisłości pozwalają z pewnym przybliżeniem oszacować wartość wskaźnika ścisłości C_c . Zakres stosowania równań jest jednak zwykle ograniczony do określonej grupy gruntów. W związku z powyższym równania te powinny być wyprowadzane dla każdej grupy niezależnie.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że najszerszej stosowane równanie (3) nazywane powszechnie równaniem Skemptona w przypadku silnie prekonsolidowanych ilów serii poznańskiej nie znajduje zastosowania. Uzyskiwane z równania (3) wartości wskaźnika C_c są zwykle znacznie zawyżone — często ponad dwukrotnie wyższe.

Najlepszą korelację wskaźnika ścisłości C_c analizowanych ilów stwierdzono wobec początkowej porowatości gruntu e_0 . Z pośród zaprezentowanych równań wyprowadzonych przez innych autorów dla innego rodzaju ilów najlepsze przybliżenie wartości C_c uzyskać można z rozwiązania równania (4) [2].

Przeprowadzona analiza pozwoliła wyprowadzić równanie oparte na wskaźniku porowatości, które najlepiej przybliży wartość wskaźnika ścisłości ilów serii poznańskiej (5). Równanie to, może służyć jednak tylko do przybliżonej oceny wartości wskaźnika ścisłości C_c .

LITERATURA

- [1] *Aysen A.*: Problem solving in soil mechanics. Lisse, Swets and Zeitlinger B.V., 2003
- [2] *Azzouz A.S., Krizek R.J., Corotis R.B.*: Regression Analysis of Soil Compressibility. Soil and foundations, 16, 2, 1976, pp. 19–29
- [3] *Bell F.G.*: Engineering Properties of Soils and Rocks. London, Blackwell Sc. Ltd., 2000
- [4] *Burland J.B.*: On the Compressibility and Shear Strength of Natural Soil. Geotechnique, 40, 3, 1990, pp. 329–378
- [5] *Bowles J.E.*: Physical and Geotechnical Properties of Soils. McGraw–Hill Company Inc., New York, 1989
- [6] *Craig F.R.*: Soil Mechanics. Taylor and Francis, New York, 2004
- [7] *Giasi C.I., Cherubini C., Paccapelo F.*: Evaluation of Compression Index of Remoulded Clays by Means of Atterberg Limits. Bull. Eng. Geol. Environ., 62, 2003, pp. 233–340
- [8] *Gregory A.S. i in.*: Calculation of Compression Index and Precompression Stress from Soil Compression Test Data. Soil and Tillage Res., 89, 2006, pp. 45–57
- [9] *Lambe T.W., Whitmann R.V.*: Mechanika gruntów. Arkady, Warszawa, 1977
- [10] *Lav M.A., Ansal A.M.*: Regression Analysis of Soil Compressibility. Turk J. Engin. Environ. Sci., 25, 2001, pp. 101–109
- [11] *Koppula S.D.*: Statistical Estimation of Compression Index. Geotechnical Testing J., 4, 2, 1981, pp. 68–73
- [12] *Mitchell J.K., Soga K.*: Fundamental of Soil Behavior. John Willey and Sons, London, 2005
- [13] *Ozer M., Isik N.S., Orhan M.*: Statistical Neural Network Assessment of the Compression Index of Clay-bearing Soils. Bull. Eng. Geol. Environ., 67, 2008, pp. 537–545
- [14] *Nagaraj T.S., Srinivasa Murthy B.R.*: A Critical Reappraisal of Compression Index Equation. Geotechnique, 36, 1, 1986, pp. 27–32
- [15] *Park J.H., Koumoto T.*: New Compression Index Equation. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 130, 2, 2004, pp. 223–226
- [16] *Stróżyk J.*: Przyczyny prekonsolidacji ilów formacji poznańskiej z rejonu południowo–zachodniej Polski. Praca doktorska. Instytut Geotechniki i Hydrotechniki, Wrocław, 2004
- [17] *Sridharan A., Gurtug Y.*: Compressibility Characteristics of Soil. Geotech. Geol. Eng., 23, 2005, pp. 615–634
- [18] *Sridharan A., Nagaraj H. B.*: Compressibility Behaviour of Remoulded, Fine-grained Soils and Correlation with Index Properties. Can. Geotech. J., 37, 3, 2000, pp. 712–722
- [19] *Terzaghi K., Peck R.B.*: Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley Inc., New York, 1996
- [20] *Tripathy S., Mishra A.K.*: On the use of Skempton's Compression Index Equation. Geotech. Geol. Eng., 29, 2011, pp. 129–125
- [21] *Yoo G. L., Kim B.T., Jeon S.S.*: Empirical Correlations of Compression Index for Marine Clay from Regression Analysis. Can. Geotech. J., 41, 2004, pp. 1213–1221