

## Analiza ścisłości warstwowanych ilów krakowieckich

Krzysztof Wilk<sup>1</sup>



**Analysis of compressibility of layered Krakowiec Clays.** Prz. Geol., 62: 250–256.

*A b s t r a c t.* The substrate, whose compressibility has been analysed, served as subsoil for indirect foundations of bridges. A significant settlement of foundations was recorded while performing load tests. The results of the analysis indicate the specific structure of the Krakowiec Clays, as the cause of insufficient bearing capacity of piles. Small thickness of clay and silt layers prevents their separation, and certainly does not allow treating them as two soil types with different properties. The tested soil should be considered as a kind of natural composite, whose characteristics are unlikely to be "the resultant" of properties of constituent soils. Despite the high soil strength (very high values of strength parameters), the measured oedometer compression modules were significantly different from the standard attributed to this type of soils. The values of oedometer compression modules correspond with those prescribed by back analysis of settlement measured during the load test of piles. They were tested on natural undisturbed samples and on prepared samples of different humidities (from soil paste). The results were compared with those obtained by other researchers for soils of similar origin and alike physical properties.

**Keywords:** Krakowiec Clays, layered soil structure, soil compressibility, settlement of piles

Bardzo spoiste grunty występujące na obszarze Polski już od dawna stanowią przedmiot zainteresowania zarówno od strony naukowej – poznawczej, jak i od strony praktycznych zastosowań w przemyśle i budownictwie (Kaczyński, 1981; Kaczyński i in., 1987; Majer i in., 2007). Dla geotechników szczególnie istotne są możliwości wykorzystania ilów w branży budowlanej: jako podłoża budowli bądź materiału używanego w sposób nieprzetworzony w robotach ziemnych.

W 1981 r. w normie PN-81/B-03020, aby usprawnić proces projektowania posadowień, podano podstawowe zależności korelacyjne między parametrami fizycznymi i mechanicznymi poszczególnych rodzajów gruntu, w tym m.in. ilów. Grunty bardzo spoiste, niezależnie od czynników mających wpływ na ich powstanie oraz charakter i intensywność późniejszych obciążeń konsolidujących, zostały uznane we wspomnianym normatywie za podobne do siebie pod względem geotechnicznych parametrów wytrzymałościowych. Za jedyną wielkość mającą istotne znaczenie dla wartości parametrów mechanicznych ilów uznano stopień plastyczności, pomijając wspomniane wcześniej czynniki, jak również ewentualne różnice w uziarnieniu czy składzie mineralnym.

Znane są przypadki, gdy ustalone metodą B według PN-81/B-03020 parametry okazały się nieodpowiednie w odniesieniu do danego typu podłoża. Jeden nich został wcześniej opisany przez autora artykułu (Wilk, 2012). Mimo znacząco większej niż oszacowana pośrednio nośności gruntu (znaczna wartość kąta tarcia wewnętrznego i spójności) parametry odkształceniowe podłoża miały mniejsze wartości, obiegające niekorzystnie od standardowo przypisywanych gruntom ilastym (Wiłun, 2000; Pisarczyk, 2001). Fakt ten skłonił autora do poszerzenia zakresu badań tego gruntu, również o analizy przeprowadzone z wykorzystaniem próbek wykonanych z pasty gruntowej. Wyniki badań, oprócz opisu nietypowego materiału badawczego, posłużyły do weryfikacji poprawności rozwiązań fundamentowych obiektów inżynierskich, zostały także porównane z rezultatami uzyskanymi przez innych badaczy. Zdaniem autora niejednorodność budowy analizowanego

ośrodka gruntowego może być główną przyczyną odmienności jego cech mechanicznych w porównaniu z jednorodnym materiałem ilastym. Opisywane w innych publikacjach (Kaczyński, 1981; Kaczyński i in., 1987; Majer i in., 2007) badania gruntów ilastych również nie uwzględniają możliwego wpływu tego czynnika na rezultaty analiz. Problem złożoności budowy makroskopowej gruntów o podobnym pochodzeniu powinien być rozwijany, jednak wymaga to opracowania pewnych standardów badań oraz wnioskowania o możliwym wpływie niejednorodności na charakterystykę podłoża. Niniejszy artykuł należy traktować jako przyczynek do zgłębienia opisanego problematyki, istotnej w określonych warunkach i sytuacjach.

### OPIS MAKROSKOPOWY GRUNTU

Badany grunt spoisty pochodził z terenu budowy obwodnicy miasta Przemyśla, ze znacznej głębokości (7–20 m). Wszystkie próbki gruntu miały podobne właściwości makroskopowe, aczkolwiek wilgotność tych pobranych z mniejszych głębokości była nieco większa. Mimo to każda z nich była w stanie półzwałym.

Na podstawie analizy map i dokumentacji geologicznych (Gucik i in., 1980; Gućik & Wójcik, 1982) oraz obserwacji makroskopowych grunt określono jako il krakowiecki, powstały w miocenie i zdeponowany na obszarze zapadliska przedkarpackiego.

Grunt naturalny miał bardzo wyraźną strukturę warstwową (ryc. 1, 2). Warstwy ilaste, przeważnie grubości kilku milimetrów (0–5 mm) i barwy ciemnozielonobrunatnej, były oddzielone przewarstwieniami pylastymi barwy popielatoszarej o grubości do 0,5 mm. W przewarstwieńiach tych gołym okiem można było wyróżnić pojedyncze ziarna. Grubość warstewek była przypadkowo zmienna, a ich upad zbliżony do poziomemu.

Spójność przewarstwień pylastych była bardzo niewielka, zależna odwrotnie od ich grubości. Wynikała ona prawdopodobnie nie tylko z obecności frakcji ilowej, częściowo była to również spójność pozorna będąca efektem pozostałości naprężenia konsolidującego podłoża w przeszłości.

<sup>1</sup> Katedra Geodezji i Geotechniki im. Kaspra Weigla, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; kwilk@prz.edu.pl.



**Ryc. 1.** Warstwowa budowa gruntu widoczna na przełamach próbek (średnica próbek – ok. 10 cm)

**Fig. 1.** Layered soil structure visible on the sample fracture (sample diameter – about 10 cm)



**Ryc. 2.** Próbkę wycinaną do badań w aparacie trójosiowego ściskania (ATS), która uległa zniszczeniu wynikającemu z jej warstwowej budowy (średnica próbeki – ok. 4 cm)

**Fig. 2.** Sample cut out for measurement in the triaxial apparatus (ATS), destructed in consequence of its layered structure (sample diameter – about 4 cm)

Grunt zawierał 3–5% węglanu wapnia, który mógł być powodem zwiększonej agregacji (łączenia cząstek), zwłaszcza w warstewkach ilastych.

Ograniczona spójność przewarstwień występujących w gruncie była przyczyną trudności związanych z wycięciem (uformowaniem) próbek o naturalnej strukturze do badań odkształceniowych oraz wytrzymałościowych. Pobranie próbek do badań w aparacie trójosiowego ściskania było niemożliwe (ryc. 2).

Struktura gruntu jest wynikiem procesów sedymentacyjnych i konsolidacyjnych prowadzących do powstania podłoża. Na skutek wysychania (zmniejszania wilgotności), prawdopodobnie po ustąpieniu obciążenia konsolidującego, doszło do skurczu ośrodka gruntowego i powstania

mikroszczelin, przede wszystkim w warstwach pylastych, ze względu na mniejszą spójność.

Wkładki pylaste ułatwiały zachodzenie wszelkich procesów związanych ze zmianami wilgotności badanego gruntu, zarówno wysychanie, jak i penetrację wody w głąb materiału gruntowego – procesy te mogły odbywać się znacznie szybciej niż w gruncie jednorodnym.

## BADANIA GRUNTU O NATURALNEJ STRUKTURZE

Zestawione w tabeli 1 wartości parametrów fizycznych próbek o naturalnej strukturze są wartościami średnimi, ustalonymi na podstawie wyników badań pięciu próbek. Wcześniejsze założenie, że rozpatrywany grunt jest ilem pylastym (geneza D według PN-81/B-03020), po przeprowadzeniu analiz uziarnienia okazało się błędne, gdyż średnia zawartość frakcji ilastej była mniejsza niż 30%, co oznacza, że badany grunt to w zasadzie glina pylasta zwięzła. W rzeczywistości zawartość cząstek o średnicy poniżej 0,002 mm była niższa jedynie w dwóch z pięciu próbek pobranych z mniejszych głębokości. Zachowanie tych próbek podczas badań zarówno cech fizycznych, jak i mechanicznych było podobne do pozostałych, dlatego mimo opisanej nieścistości zasadne wydaje się poczynione założenie o braku decydującego wpływu różnic w zawartości frakcji ilowej na wyniki analiz.

Przyjęcie genezy B (dla innych gruntów skonsolidowanych według PN-81/B-03020) w celu określenia pośrednią metodą parametrów gruntu nie ma w tym przypadku uzasadnienia. Wartości parametrów odkształceniowych wyznaczone w wyniku badań byłyby jeszcze bardziej rozbieżne od oczekiwanych (ustalonych dla symbolu B). Stąd też porównywanie ich właściwości z właściwościami gruntów ilastych wydaje się najbardziej odpowiednie.

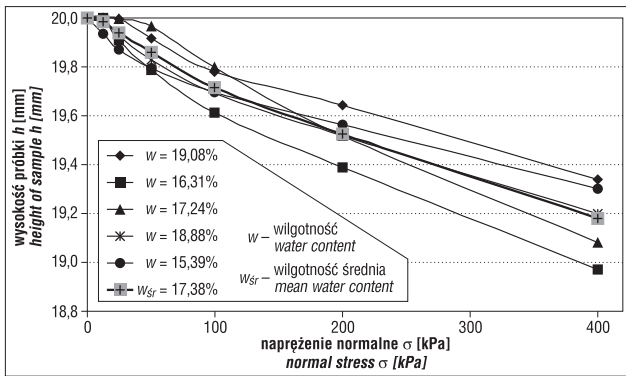
Próbki o naturalnej strukturze poddano standardowym testom (PN-88/B-04481) w edometrach w zakresie obciążeń 0–400 kPa.

Badane próbki pochodziły z różnych głębokości, jednak z uwagi na poziom posadowienia podstawy fundamentów pośrednich (ok. 9,5–14 m p.p.t.) jako zakres obciążeń mogący obrazować charakter odkształceń podłoża przyjęto 200–400 kPa. Mniejsze stopnie obciążenia próbek odzwierciedlały powrót gruntu do stanu naprężenia najbardziej zbliżonego do warunków *in situ*.

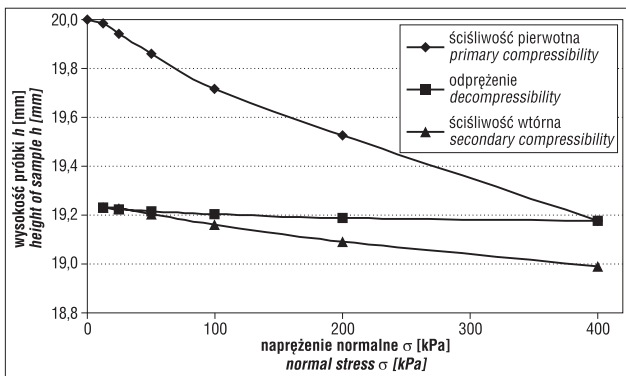
Obliczeniowe obciążenie przekazywane na podłoże przez podstawy pali wynosiło 900–1400 kPa. Jeśli uwzględnic naprężenia powodowane ciężarem własnym ośrodka gruntowego, to przyrost naprężenia pod podstawą pali wielkość średnicowych wynosił od ok. 700 kPa do ponad 1100 kPa. Modelowanie takiej zmiany naprężenia nie było możliwe ze względu na ograniczenia sprzętu laboratoryjnego, stąd,

**Tab. 1.** Parametry fizyczne próbek o nienaruszonej strukturze  
**Table 1.** Physical parameters of the natural undisturbed samples

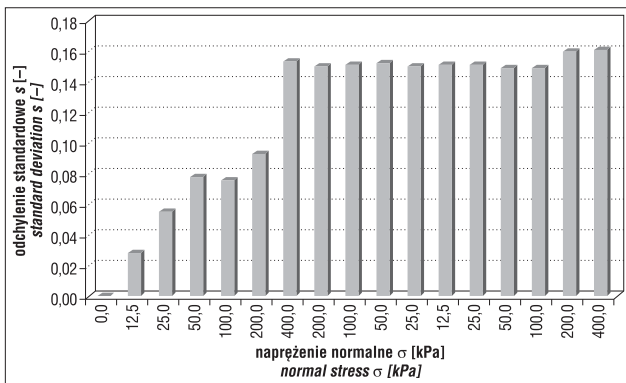
Gęstość objętościowa gruntu <i>Density of soil</i> $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego <i>Density of dry soil</i> $\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Wilgotność naturalna <i>Natural water content</i> $w_n$ [%]	Granica plastyczności <i>Plastic limit</i> $w_p$ [%]	Granica płynności <i>Liquid limit</i> $w_L$ [%]	Stopień plastyczności <i>Liquidity index</i> $I_L$ [-]	Zawartość frakcji <i>Content of fraction</i> [%]		
						Ilość <i>Clay</i> ( $d < 0,002$ mm)	Pyłowa <i>Silt</i> ( $0,002$ mm $< d < 0,05$ mm)	Piaskowa <i>Sand</i> ( $0,05$ mm $< d < 2$ mm)
2,09	1,78	17,38	23,82	67,20	-0,15	27,5	67,5	5



**Ryc. 3.** Wykres ściśliwości pierwotnej próbek o naturalnej strukturze  
**Fig. 3.** Diagram of primary compressibility of the natural undisturbed samples



**Ryc. 4.** Wykres ściśliwości pierwotnej, odprężenia oraz ściśliwości wtórnej próbek o naturalnej strukturze (wartości średnie)  
**Fig. 4.** Diagram of primary compressibility, decompressibility and secondary compressibility of the natural undisturbed samples (mean values)

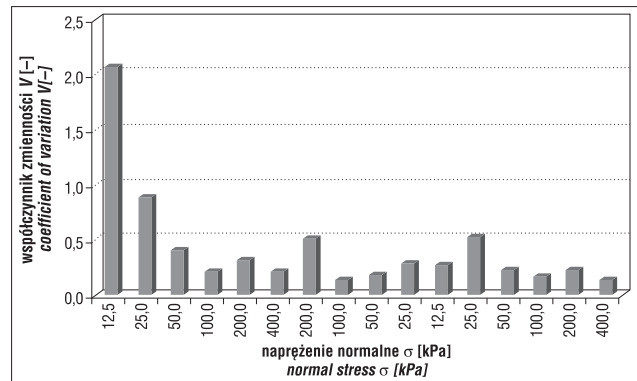


**Ryc. 5.** Zmiany wartości odchylenia standardowego podczas kolejnych etapów badania edometrycznego (próbki o nienaruszonej strukturze)  
**Fig. 5.** Changes of the standard deviation value at the successive stages of the oedometer test (natural undisturbed samples)

jak wspomniano wcześniej, za miarodajne przyjęto wstępnie obciążenie w zakresie 200–400 kPa.

Zmiany wysokości próbek w zależności od wielkości przyłożonego po raz pierwszy obciążenia przedstawiono na rycinie 3. Linia pogrubioną zaznaczono średnie wartości zmian wysokościowych.

Z uwagi na przejrzystość wyników wykres obrazujący całość badania ściśliwości, sporządzony na podstawie wartości średnich odkształcenia, zamieszczono na rycinie 4.



**Ryc. 6.** Zmiany wartości współczynnika zmienności w kolejnych etapach badania edometrycznego (próbki o nienaruszonej strukturze)  
**Fig. 6.** Changes of the value of the coefficient of variation in the successive stages of the oedometer test (natural undisturbed samples)

Po pierwszej fazie obciążenia wartości odchylenia standardowego znacznie się od siebie różniły i zwiększały się ze wzrostem obciążenia (ryc. 5). Po przyłożeniu maksymalnego obciążenia i w kolejnych etapach wartości odchylenia standardowego w istotny sposób się do siebie zbliżyły, a w następnych fazach testów pozostały na podobnym poziomie. Fakt ten zdaniem autora jest związany z zakończeniem domykania się mikroszczelin powstałych w wyniku wysychania gruntu podczas pierwotnego obciążenia.

Należy zaznaczyć, że opisane wcześniej zależności nie do końca właściwie odzwierciedlają zmienność wyników badania oraz ich tendencji. Wynika to z tego, że odnoszą się one do wartości bezwzględnych. Obserwowane największe względne różnice przyrostów osiadania dotyczą w przeważającej części początkowych etapów badania.

Charakter stabilizacji parametrów lepiej obrazują zmiany współczynnika zmienności w kolejnych fazach badania (ryc. 6). Parametr ten zmniejsza się w końcowych fazach cyklu obciążenia próbki, zarówno pierwotnego, jak i wtórnego. Zmiany współczynnika w trakcie odciążania próbki nie są już tak jednoznaczne.

## BADANIA PRÓBEK PREPAROWANYCH

Oprócz opisanych wcześniej próbek o naturalnej strukturze badaniom poddano próbki wykonane z pasty gruntowej o zmiennej wilgotności. Podstawowe parametry fizyczne pasty gruntowej podano w tabeli 2. Różnica wilgotności poszczególnych serii tych próbek była bezpośrednią przyczyną zmiennego zagęszczenia gruntu (zwiększona wilgotność utrudniała jego zagęszczenie).

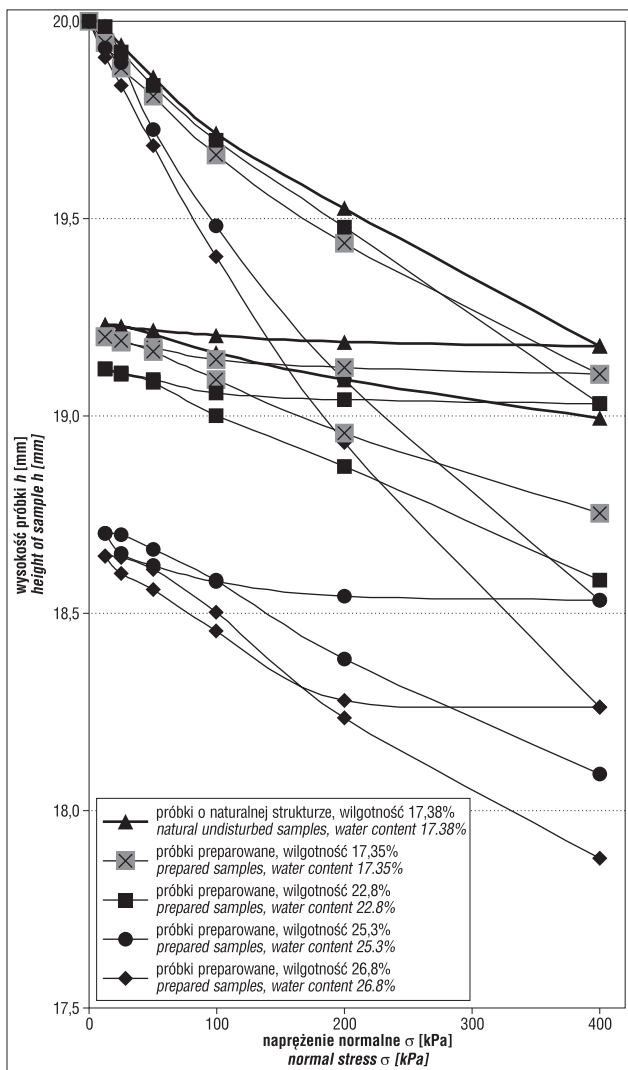
Pastę gruntową wykonano poprzez nawodnienie bryłek gruntu naturalnego, a później, po samoistnym wchłonięciu przez niego wody, grunt mieszano do uzyskania jednolitej pasty. Następnie pastę układano warstwą grubości ok. 3–4 cm na dnie pojemnika i po nieszczelnym zabezpieczeniu folią pozostawiano do powolnego wysychania w temperaturze otoczenia (ok. 20°C). Okresowo pastę dodatkowo mieszano, aby ujednoczyć jej wilgotność, oraz lekko dogęszczano. Z tak przygotowanego materiału wycinano próbki do badań edometrycznych. Pozostałość pasty, po wymieszaniu i zabezpieczeniu opisanym wcześniej, przechowywano dalej w celu pobrania kolejnej serii próbek.

Z pasty gruntowej o każdej z podanych w tabeli 2 wilgotności pobrano do badań edometrycznych serię od dwóch do sześciu próbek preparowanych. Wyniki analizy



**Tab. 2.** Podstawowe parametry fizyczne badanych próbek  
**Table 2.** Basic physical parameters of the tested samples

	Próbki o naturalnej strukturze <i>Natural undisturbed samples</i>	Próbki preparowane <i>Prepared samples</i>			
Wilgotność <i>Water content</i> $w$ [%]	17,38	17,35	22,80	25,30	26,80
Stopień plastyczności <i>Liquidity index</i> $I_L$ [-]	-0,15	-0,15	-0,02	0,03	0,07
Gęstość objętościowa gruntu <i>Density of soil</i> $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,09	2,02	2,00	1,98	1,97
Wskaźnik porowatości <i>Void ratio</i> $e$ [-]	0,52	0,58	0,66	0,72	0,74



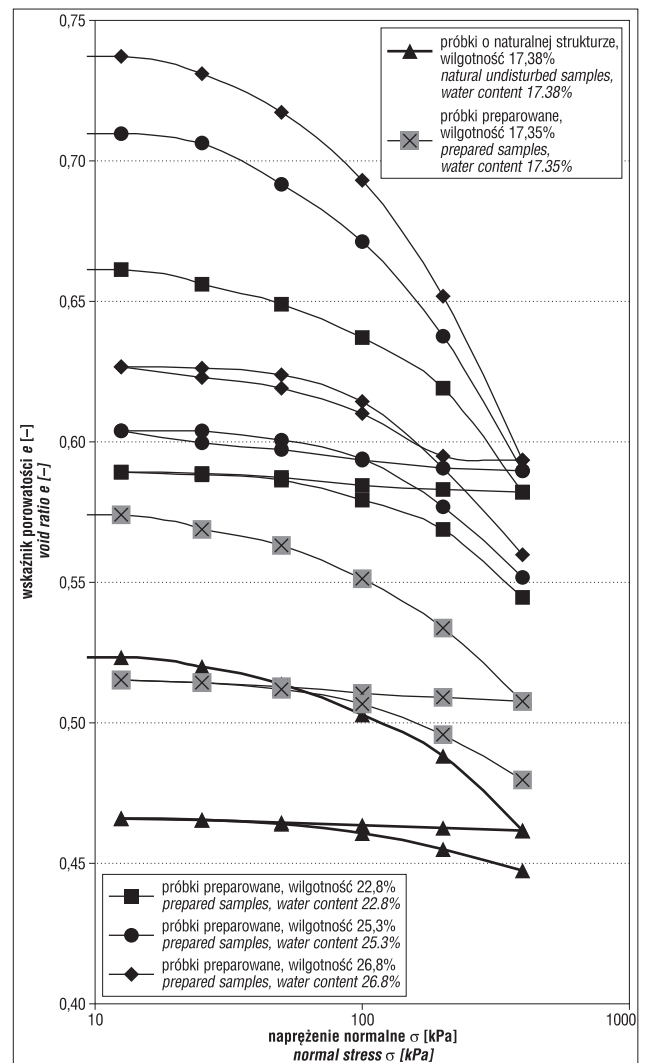
**Ryc. 7.** Wykres zmian wysokości próbek preparowanych oraz próbek o naturalnej strukturze podczas badania ścisłości pierwotnej, odprężenia oraz ścisłości wtórnej (wartości średnie)  
**Fig. 7.** Diagram of height changes of the prepared and natural undisturbed samples during the test of primary compressibility, decompressibility and secondary compressibility (mean values)

średnich wartości ich osiadania przedstawiono w dalszej części artykułu.

Wykres przedstawiający odkształcenie próbek wykonanych z pasty gruntowej w wyniku przyłożenia kolejnych stopni obciążenia zamieszczono na rycinie 7 (dla porównania pogrubioną linią zaznaczono zmiany wysokości próbek o naturalnej strukturze). Osiedlenia, zgodnie z oczekiwaniami, zależą od wilgotności gruntu. Przy zbliżonej wilgotności osiedlenia próbek o naturalnej strukturze są mniejsze niż próbek przygotowanych w laboratorium. Sytuacja ta dotyczy zwłaszcza osiadania wtórnego.

Taki sam jest wpływ wilgotności gruntu na zmiany wskaźnika porowatości wraz z przyrostem naprężenia normalnego (ryc. 8).

Uwagę zwracają zbliżone końcowe wartości wskaźnika porowatości gruntów o najwyższych wilgotnościach. Przy większych wilgotnościach na wykresie zaznaczają się również większe pętle histerezy związane z odciążeniem i ponownym obciążeniem próbek.



**Ryc. 8.** Wykres zmian wskaźnika porowatości gruntu w próbkach preparowanych oraz w próbkach o naturalnej strukturze podczas badania ścisłości pierwotnej, odprężenia oraz ścisłości wtórnej (wartości średnie)  
**Fig. 8.** Diagram of the change in void ratio of the soils (in prepared and natural undisturbed samples) during the test of primary compressibility, decompressibility and secondary compressibility (mean values)

**Tab. 3.** Edometryczne moduły ścisłości pierwotnej, odprężenia i ścisłości wtórnej**Table 3.** Oedometer modulus of primary compressibility, decompressibility and secondary compressibility

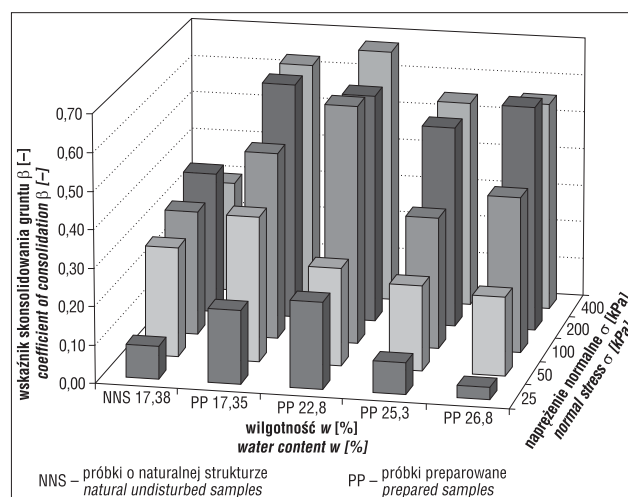
Zakres zmiany naprężenia Range of stress changes [kPa]	Wilgotność badanych próbek gruntu Water content of samples w [%]				
	Próbki o naturalnej strukturze Natural undisturbed samples	Próbki preparowane Prepared samples			
		17,38	17,35	22,80	25,30
Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej Oedometer modulus of primary compressibility $M_0$ [kPa]					
0–12,5	18 116	4630	16 667	3750	2770
12,5–25	5431	3896	3903	6472	3505
25–50	6154	6778	5859	2911	3236
50–100	6973	6662	7135	4092	3509
100–200	10 323	8816	8953	4974	4096
200–400	11 241	11 674	8734	6837	5664
Edometryczny moduł odprężenia Oedometer modulus of decompressibility $M$ [kPa]					
400–200	399 550	224 753	346 018	304 649	231 908
200–100	126 237	83 135	112 012	51 514	10 312
100–50	70 600	34 186	28 028	22 660	8809
50–25	60 053	29 956	28 078	16 053	11 822
25–12,5	32 770	18 450	23 887	4663	5225
Edometryczny moduł ścisłości wtórnej Oedometer modulus of secondary compressibility $M$ [kPa]					
12,5–25	62 173	20 001	17 071	77 921	103 579
25–50	21 333	17 768	22 745	12 985	15 535
50–100	21 411	13 494	11 360	11 811	8538
100–200	27 796	14 141	14 845	9385	6878
200–400	38 286	18 676	13 016	12 592	10 244

Podstawowymi miarami opisującymi zdolność gruntu do odkształceń są edometryczne moduły ścisłości (tab. 3). Ich wartości, po niestabilności w początkowych fazach poszczególnych etapów badania, zwiększały się wraz ze wzrostem obciążenia (a malały podczas zdejmowania obciążenia próbek).

Wyznaczone w wyniku badań zależności zmian wskaźnika porowatości od logarytmicznego przyrostu naprężenia normalnego (ryc. 8) nie wykazały stabilizacji właściwej do określenia wskaźnika ścisłości. Dotyczy to zwłaszcza gruntu o naturalnej strukturze (ryc. 8). W tym przypadku należy uznać, że wynika to ze zbyt małego naprężenia (tylko 400 kPa) w porównaniu z prawdopodobnym naprężeniem prekonsolidującym. Ustalenie naprężenia prekonsolidującego byłoby możliwe dzięki zastosowaniu bardzo dużych obciążeń – na grunt w naturze działały w przeszłości obciążenia związane ze zlodowaceniem południowopolskim – jednak, jak wspomniano, ogranicze-

**Tab. 4.** Wskaźniki skonsolidowania gruntu**Table 4.** Coefficients of soil consolidation

Zakres zmiany naprężenia Range of stress changes [kPa]	Wilgotność badanych próbek gruntu Water content of samples w [%]				
	Próbki o naturalnej strukturze Natural undisturbed samples	Próbki preparowane Prepared samples			
		17,38	17,35	22,80	25,30
Wskaźnik skonsolidowania gruntu Coefficient of soil consolidation $\beta$ [-]					
12,5–25	0,09	0,19	0,23	0,08	0,03
25–50	0,29	0,38	0,26	0,22	0,21
50–100	0,33	0,49	0,63	0,35	0,41
100–200	0,37	0,62	0,60	0,53	0,60
200–400	0,29	0,63	0,67	0,54	0,55

**Ryc. 9.** Zmiany wskaźnika skonsolidowania gruntu zależnie od wilgotności gruntu i przyłożonego obciążenia**Fig. 9.** Changes of the coefficient of consolidation depending on the water content and the applied load

nia sprzętowe uniemożliwiły prowadzenie badań z większym naprężeniem.

Istotną informację na temat zdolności odkształceniowych gruntu dostarcza wskaźnik jego skonsolidowania (tab. 4), będący stosunkiem edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej i wtórnej gruntu. Parametr ten zmienił się ze wzrostem naprężenia normalnego. Zależność taka widoczna była zwłaszcza w przypadku próbek wykonanych z pasty gruntowej (ryc. 9).

Ustalony w wyniku badań wskaźnik skonsolidowania próbek z pasty gruntowej przy większych obciążeniach jest zbliżony do sugerowanej przez polską normę PN-81/B-03020 wartości wynoszącej 0,6 dla gruntów nieskonsolidowanych o genezie C. Dla ilów opisanych symbolem D (zgodnie z PN-81/B-03020) parametr ten powinien wynosić ok. 0,8. W przypadku próbek o naturalnej strukturze analizowany wskaźnik okazał się ponad dwukrotnie mniejszy od wartości normowych. Oznacza to znaczną porowatość gruntu w stanie rodzimym, a także

potwierdza, że właściwości odkształceniowe są wynikiem makroskopowej struktury gruntu (występujących w gruncie przewarstwień).

## NAWIĄZANIE DO INNYCH BADAŃ ŚCISŁIWOŚCI IŁÓW KRAKOWIECKICH

Iły krakowieckie były już przedmiotem analiz z uwagi na ich wykorzystywanie jako podłoża budowli oraz jako tworzywa wyrobów ceramicznych. Najbardziej zaawansowane badania tego medium były prowadzone przez Kaczyńskiego i dotyczyły gruntów zdeponowanych w południowo-wschodniej części Polski (Kaczyński, 1981; Kaczyński i in., 1987). Przedmiot tych analiz stanowiły grunty pobrane z 54 lokalizacji, w tym z Przemysła-Buszkowic. Ich autor wskazuje na zróżnicowaną strukturę iłów krakowieckich oraz brak powtarzalności cech fizycznych. Wyznaczone w ramach tych badań wartości edometrycznego modułu ścisłości zawierały się w granicach 5900–148 000 kPa (23 400 kPa dla gruntu z Przemysła-Buszkowic opisanego jako glina), przy czym Kaczyński zaznaczył, że wyższe wartości dotyczą iłów w stanie półzwartym.

W pracy Kaczyńskiego (1981), na podstawie wyników zakrojonych na dużą skalę badań, zostały wyprowadzone zależności korelacyjne między różnymi parametrami górnioceńskich iłów krakowieckich, w tym parametrami opisującymi prekonsolidację takiego podłoża. Ustalono m.in. powiązania pomiędzy:

- modułem ścisłości gruntu a naprężeniem prekonsolidacyjnym (I),
- zawartością frakcji iłowej w gruncie a naprężeniem prekonsolidacyjnym (II),
- stopniem plastyczności gruntu a naprężeniem prekonsolidacyjnym (III).

Naprężenie prekonsolidacyjne konkretnego materiału gruntowego wyznaczone na podstawie każdej z wymienionych wcześniej zależności (I, II i III) powinno być takie samo. Znając zatem zawartość frakcji iłowej lub stopień plastyczności gruntu i porównując zależności parami (I z II oraz I z III, ze stałą wartością naprężenia prekonsolidującego), można ustalić wysokość edometrycznego modułu ścisłości w nawiązaniu do tych parametrów. Obliczony w taki sposób moduł ścisłości wyniósł: 24 600 kPa – na podstawie zawartości frakcji iłowej oraz 43 350 kPa – na podstawie stopnia plastyczności gruntu.

Powiązanie parametrów mechanicznych gruntu jedynie z zawartością frakcji iłowej jest z pewnością kontrolersyjne, dlatego bardziej wiarygodna wydaje się wartość obliczona z uwzględnieniem wpływu stopnia plastyczności. Jest ona zbliżona do wartości sugerowanej w PN-81/B-03020 (40 000 kPa dla  $I_L = 0$ ), ale całkowicie różna od wartości edometrycznego modułu ścisłości pierwotnej wyznaczonych w wyniku opisanych w artykule badań własnych.

W innym opracowaniu, dotyczącym bardzo spoistych gruntów z całego obszaru Polski (34 miejsca; Majer i in., 2007), stopniom plastyczności wynoszącym od –0,34 do 0,35 odpowiadały wartości edometrycznego modułu ścisłości mieszczące się w granicach 5000–39 000 kPa. Jeśli ograniczyć się w analizie tylko do próbek iłów krakowieckich (z pięciu lokalizacji), wartości edometrycznego modułu ścisłości wynosiły 14 000–20 000 kPa, odpowiednio dla stopni plastyczności z przedziału od –0,12 do 0,14. Są to wartości znacznie mniejsze niż podawane w PN-81/

B-03020, ale również większe niż uzyskane w wyniku badań wykonanych przez autora.

## ANALIZA OSIADAŃ FUNDAMENTÓW PALOWYCH

Przedstawione wcześniej analizy właściwości podłoża przeprowadzono, aby zweryfikować założenia projektowe dotyczące posadowienia obiektów mostowych z uwagi na niedostateczną nośność niektórych pali.

Fundamenty podpór obiektów inżynierskich zostały zaprojektowane jako wielkośrednicowe pale wiercone (średnica trzonu 1,5 m) z poszerzoną podstawą (średnica podstawy 2,5 m). Długość analizowanych pali wynosiła 7–12 m. Przy tego rodzaju rozwiązaniach technicznych faktyczny sposób przekazywania przez pale obciążenia na grunt jest trudny do odtworzenia z uwagi na niemożność ustalenia rzeczywistego udziału podstawy i poboczniczy pala w przeniesieniu obciążenia. Obliczenia projektowe nośności uwzględniały przeniesienie całości obciążenia przez podstawy pali właśnie ze względu na ich powiększone wymiary.

Podczas wykonywania próbnych obciążeń siła przykładana była etapowo stopniami o wartości 1/8 obciążenia obliczeniowego. Kolejny stopień przykładano po względnej stabilizacji osiadań, za którą uznawano przyrost nie większy niż 0,02 mm w ciągu 5 minut. Pełne obciążenie wynosiło 1,5-krotność nośności obliczeniowej. Nie w każdym przypadku tą wartość udało się osiągnąć.

W wyniku próbnych obciążeń fundamentów palowych w pięciu przypadkach wykazano ich niedostateczną nośność, przy czym w dwóch z nich nośność wyniosła zaledwie 50% obciążenia założonych przez projektanta. Badania terenowe – próbne obciążenia pozwoliły również zaobserwować znaczne osiadania pali przekraczające 100 mm.

Na podstawie analizy osiadania wykonanej według normy PN-83/B-02482 wykazano znacząco mniejsze jego wartości niż uzyskane w próbnych obciążeniach. Było to spowodowane przyjęciem typowych parametrów podłoża zgodnie z metodą B według PN-81/B-03020.

Przeprowadzając analizę wsteczną, obliczono rzeczywiste moduły edometryczne, którymi powinien charakteryzować się grunt zalegający poniżej podstaw pali wielkośrednicowych. Otrzymane wartości modułu ścisłości pierwotnej gruntu zawierały się w granicach 10 780–13 530 kPa, średnio ok. 12 500 kPa. Wartości te są znacznie mniejsze od podanych w normie PN-81/B-03020, tj. 40 000 kPa, jednak są zbliżone do wielkości określonej w badaniach edometrycznych gruntu o naturalnej strukturze przy najwyższym stopniu obciążenia (200–400 kPa), tj. 11 241 kPa. Stanowi to potwierdzenie poprawnego ustalenia parametrów odkształceniowych w wyniku badań laboratoryjnych.

## PODSUMOWANIE

Bezsprzeczną zaletą normy PN-81/B-03020 jest opisanie podstawowych zależności między fizycznymi i wytrzymałościowymi parametrami gruntu, dzięki czemu w przypadku prostego podłoża i nieskomplikowanych rozwiązań posadowienia obiektów możliwe było istotne uproszczenie procesu projektowego. Nośność podłoża obliczona na podstawie tak wyznaczonych parametrów w zdecydowanej większości była wystarczająca. Wynika to nie tylko z poprawnie określonych korelacji między parametrami gruntu. Złożyły się na to również stosowane wieloetapowo współczynniki bezpieczeństwa oraz zachowawcze procedury

obliczeniowe. W efekcie wpływ niewłaściwe oszacowanych parametrów podłoża na ustaloną nośność gruntu został w zasadniczy sposób zniwelowany.

Badany przez autora grunt jest materiałem o specyficznej budowie, ale z pewnością nie należy go traktować jako przypadek unikatowy. Wyznaczone edometryczne moduły ścisłości podłoża zbudowanego z iłów krakowieckich okazały się znacznie niższe niż sugerowane w normie PN-81/B-03020, a także niższe od wyznaczonych przez innych badaczy tego materiału (Kaczyński, 1981; Majer i in., 2007). Uzasadnione wydaje się przypuszczenie, że przyczyną różnic w zachowaniu analizowanego ośrodka gruntowego była jego warstwowa struktura. Taka budowa materiału sprzyjała przyspieszeniu odkształceń konsolidacyjnych (przyspieszała odpływ wody) podczas obciążenia gruntu w przeszłości. Z kolei po ustąpieniu obciążenia ułatwiała fizyczne odprężenie gruntu (wzrost objętości) z uwagi na niewielką spoistość wkładek pylastych.

Mała grubość warstewek ilastych i pylastych uniemożliwia ich wyodrębnienie, a tym bardziej nie pozwala na potraktowanie ich jako dwóch ośrodków o różniących się właściwościach. Badany grunt powinien być rozpatrywany jako swego rodzaju naturalny kompozyt, którego cechy z pewnością nie będą wypadkową właściwości tworzących go gruntów.

W czasie rozpoznania podłoża taka nietypowa budowa gruntu powinna zwrócić uwagę wykonawców dokumentacji geologiczno-inżynierskich lub geotechnicznych i skłonić ich przynajmniej do sprawdzenia właściwości mechanicznych poprzez bezpośrednie badania materiału.

W odniesieniu do gruntu poddanego analizie i opisanego w artykule należy zaznaczyć, że brakuje opracowań naukowych, które uwzględniałyby specyfikę (warstwową strukturę) podłoża spoistego w strefie granicy zlodowacenia południowopolskiego rejonu Przemyśla. Zresztą konieczność rozszerzenia analiz geologicznych i geotechnicznych o badania wpływu niejednorodnej struktury na cechy materiału gruntowego dotyczy nie tylko wspomnianej lokalizacji. Należy podkreślić, że rzetelne rozpoznanie podłoża do celów budowlanych nie może opierać się jedynie na określeniu podstawowych parametrów fizycznych, a następnie na wnioskowaniu na ich podstawie o właściwościach mechanicznych gruntu oraz relacjach naprężenie–odkształcenie. Zależności podane w normatywach, chociaż z pewnością potrzebne, nie powinny być jedynymi wyznacznikami

i punktami odniesienia w kwestiach związanych z oceną podłoża gruntowego.

Norma Eurokod 7 (PN-EN 1997-1:2008E) dotycząca problematyki określania nośności konstrukcji geotechnicznych kładzie nacisk na wyznaczanie parametrów gruntu w wyniku bezpośrednich badań, nie podając przy tym żadnych zależności korelacyjnych. Podejściu takiemu należy z pewnością przyznać słuszość, jednak nie powinno umniejszać to znaczenia uproszczonych metod szacowania cech podłoża, chociażby w celach weryfikacyjnych. Metody pośredniego określania parametrów gruntu pozwalają na ograniczenie zakresu prowadzonych badań, a co za tym idzie ich kosztów oraz czasu potrzebnego do przygotowania i realizacji inwestycji.

Autor dziękuje recenzentom pracy oraz redaktorowi naczelnemu za cenne spostrzeżenia i uwagi, dzięki którym praca nabrała finalnego kształtu.

## LITERATURA

- GUCIK S., PAUL Z., ŚLĄCZKA A. & ŻYTKO K. 1980 – Mapa geologiczna Polski 1 : 200 000, ark. Przemyśl, Kalników. Wersja B. Mapa podstawowa 1 : 50 000, ark. Przemyśl. Inst. Geol., Warszawa.
- GUCIK S. & WÓJCIK A. 1982 – Objasnienia do mapy geologicznej Polski 1 : 200 000, ark. Przemyśl, Kalników. Inst. Geol., Warszawa: 1–91.
- KACZYŃSKI R. 1981 – Wytrzymałość i odkształcalność górno-miocyfenskich iłów zapadliska przedkarpackiego. Biul. Geol. UW, 29: 105–200.
- KACZYŃSKI R., GLAZER Z., PINIŃSKA J., DRĄGOWSKI A. & DOBAK P. 1987 – Właściwości spoistych gruntów zwałowanych z iłów krakowieckich. Biul. Geol. UW, 31: 152–193.
- MAJER E., ŁUCZAK-WILAMOWSKA B., WYSOKIŃSKI L. & DRĄGOWSKI A. 2007 – Zasady oceny przydatności gruntów spoistych Polski do budowy mineralnych barier izolacyjnych. ITB, Warszawa: 1–62.
- PISARCZYK S. 2001 – Gruntoznawstwo inżynierskie. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa: 1–344.
- PN-81/B-03020 – Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie. PKN, Warszawa.
- PN-83/B-02482 – Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych. PKN, Warszawa.
- PN-88/B-04481 – Grunty budowlane. Badania próbek gruntów. PKN, Warszawa.
- PN-EN 1997-1:2008E – Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne, cz. 1, Zasady ogólne. PKN, Warszawa.
- WILK K. 2012 – Rutynowe rozpoznanie podłoża gruntowego przyczyną błędnych rozwiązań fundamentowych. Inż. Mor. Geotech., 4: 400–204.
- WIŁUN Z. 2000 – Zarys geotechniki. WKŁ, Warszawa: 1–723.

Praca wpłynęła do redakcji 10.06.2013 r.  
Akceptowano do druku 26.11.2013 r.