

WPLYW ZMIAN STOPNIA WILGOTNOŚCI NA CHARAKTERYSTYKI ŚCIŚLIWOŚCI W BADANIACH EDOMETRYCZNYCH

Małgorzata Wdowska

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Znaczący brak zgodności prognoz osiadań podłoża z wynikami pomiarów terenowych wskazuje, że charakterystyki ścisłości spoistych gruntów prekonsolidowanych, określane za pomocą badania edometrycznego, w sposób niewystarczająco dokładny odzwierciedlają zachowanie się gruntu pod obciążeniem w terenie. Procedura badania edometrycznego jest uproszczona i nie uwzględnia wielu istotnych czynników, mających wpływ na parametry ścisłości. Artykuł dotyczy określenia wpływu jednego z bardziej istotnych czynników (choć rzadko podnoszonego w literaturze geotechnicznej), tj. zmian stanu uwilgotnienia gruntu na jego charakterystyki ścisłości. W artykule przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań edometrycznych naturalnych prekonsolidowanych glin pochodzących z trasy obwodnicy Mińska Mazowieckiego. Wykazano, że standardowe podejście dotyczące normowych metod wyznaczania parametrów ścisłości gruntu, które nie uwzględniają czynnika wysycenia porów wodą i jego zmienności podczas procesów obciążania i odciążania, nie jest wystarczające z punktu widzenia oceny współpracy konstrukcja – grunt. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań podano zalecenia dotyczące sposobu uwzględnienia zmiany stopnia wilgotności w badaniach edometrycznych.

Słowa kluczowe: stopień wilgotności, badania edometryczne, charakterystyki ścisłości

WSTĘP

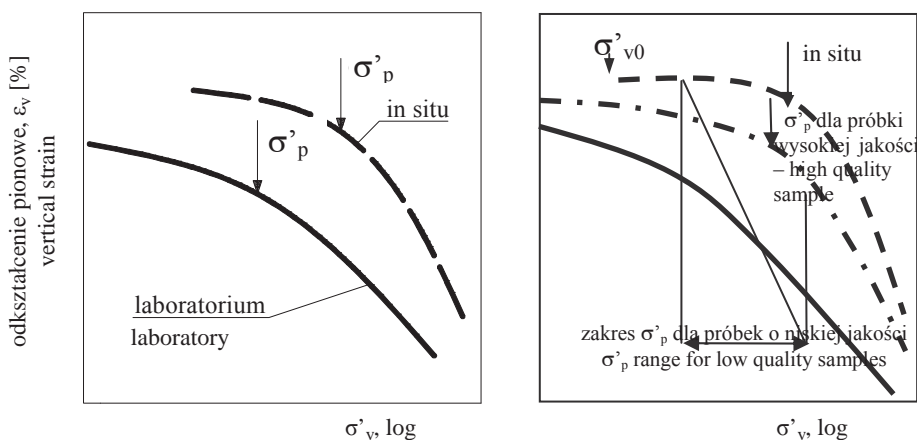
Do analizy deformacji ośrodka gruntowego służy popularne badanie jednoosiowego ściskania z ograniczoną rozszerzalnością boczną, przeprowadzane w edometrze. Edometryczne badania ścisłości gruntów wykonuje się w celu prognozowania wielkości osiadań podłoża. Prognoza osiadań będzie tym dokładniejsza, im badanie będzie wierniejszym odzwierciedleniem procesu rzeczywistego. Uzasadnione i celowe jest więc podejmowanie działań prowadzących do lepszego modelowania w badaniach laborato-

Adres do korespondencji – Corresponding author: Małgorzata Wdowska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: małgorzata_wdowska@sggw.pl

ryjnych procesów rzeczywistych, zachodzących w naturalnym podłożu. Najbardziej rozpowszechnioną miarą ścisłości gruntu jest moduł ścisłości (M), określający stosunek przyrostu naprężenia do wywołanego przez ten przyrost odkształcenia. Wartości modułu ścisłości określa się na podstawie charakterystyki ścisłości otrzymywanej w laboratorium z badania w edometrze. Jest on nazywany edometrycznym modułem ścisłości. Badania edometryczne należą do podstawowych laboratoryjnych badań właściwości mechanicznych gruntów. Edometryczny moduł ścisłości wyznaczany jest zawsze wtedy, gdy konieczne jest sprawdzenie II stanu granicznego podłoża, określającego stany użytkowalności konstrukcji zgodnie z normą PN-81/B-03020. Grunty budowlane. Wykonuje się je również w celu określenia historii stanu naprężenia, co sprowadza się do wyznaczenia naprężenia prekonsolidacji (σ'_p), które ostatnio określone jest również jako naprężenie uplastycznienia (σ'_y), ponieważ oddziela zakres naprężeń, w których dominują odkształcenia pseudosprężyste, od zakresu naprężeń zdominowanych przez odkształcenia plastyczne [Burland 1990]. Badanie ścisłości gruntu jest badaniem modelowym. Polega na stopniowym obciążaniu próbki gruntu umieszczonej w metalowym pierścieniu, a więc w warunkach uniemożliwiających boczną rozszerzalność próbki. Warunki badania w edometrze w dość dużym stopniu odpowiadają warunkom pracy elementu gruntu w naturze pod dużym fundamentem, gdzie boczna rozszerzalność każdego elementu jest również częściowo ograniczona sąsiednimi elementami gruntu.

Rozważając jednakże wszelkie aspekty reprezentatywności wykonywanego badania edometrycznego, należy przedstawić zasadniczą trudność, jaką stanowi naruszenie struktury gruntu przy pobieraniu go z podłoża. W zależności od zastosowanej techniki pobierania gruntu można w mniejszym lub większym stopniu minimalizować naruszenie jego struktury, które jednak zawsze powoduje to, że charakterystyka ścisłości gruntu *in situ* będzie różniła się od tej wyznaczonej w laboratorium (rys. 1) [Ladd i in. 1977].

Z naruszenia struktury gruntu wynikają problemy właściwej oceny naprężenia prekonsolidacji (σ'_p) i parametrów ścisłości. Otrzymane krzywe ścisłości nie posiadają wyraźnej zmiany krzywizny. Wartości naprężenia prekonsolidacji otrzymane podczas



Rys. 1. Wpływ naruszenia struktury próbki gruntu na krzywą ścisłości [Ladd i in. 1977]

Fig. 1. Influence of sample disturbance on compressibility curve [Ladd et al. 1977]

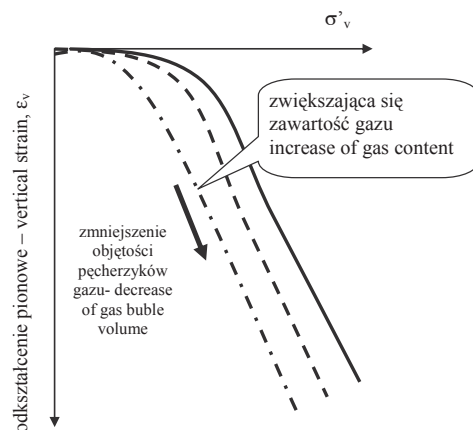
badan takich próbek są mniejsze od wartości σ'_p *in situ*. Kształt krzywej ścisłości uzyskany podczas badań edometrycznych różni się znacznie od krzywej *in situ*. Sprawia to, że wartości parametrów odkształceniowych dla zakresu naprężenia $\sigma'_v < \sigma'_p$ są obciążone znacznym błędem. Należy jednakże podkreślić, że naruszenie struktury gruntu nie jest jedynym źródłem błędu w odzwierciedleniu charakterystyki ścisłości. Istotnym czynnikiem, często nieuwzględnianym w badaniach edometrycznych, jest stopień wilgotności (S_r), określający stopień wypełnienia porów gruntu wodą. W dalszej części artykułu będzie rozważany wpływ tego czynnika na kształt krzywej ścisłości, a zatem również parametry określane na jej podstawie.

WPLYW NIEPEŁNEGO NASYCENIA NA CHARAKTERYSTYKI NAPRĘŻENIE – ODKSZTAŁCENIE

Standardowe podejście do określania charakterystyk ścisłości podane jest w normie PN-88/B-04481. Grunty budowlane. Badania próbek gruntu. Procedura badań opisana w tej normie została prawdopodobnie opracowana dla gruntów lekko prekonsolidowanych i normalnie skonsolidowanych, które charakteryzują się tym, że ich początkowy stopień wilgotności jest równy 1, co oznacza, że ośrodek jest całkowicie nasączony. Dlatego też norma nie podaje zaleceń, jakie powinny być zrealizowane do doprowadzenia próbki gruntu do stanu pełnego nasycenia.

Również zdecydowana większość zagadnień przedstawianych w podręcznikach mechaniki gruntów dotyczy ośrodka całkowicie nasyconego. Pomimo że na przestrzeni ostatnich lat przeprowadzono wiele badań laboratoryjnych i terenowych na nienasyconych gruntach naturalnych i zagęszczanych, to wielu ekspertów uważa, że właściwości gruntów nienasyconych nie są jeszcze wystarczająco rozpoznane.

W pierwszej kolejności należałoby rozważyć podstawowe badanie właściwości mechanicznych, tj. badanie edometryczne. Biorąc pod uwagę fakt, że próbki do badań podczas pobierania gruntu o tzw. nienaruszonej strukturze odprężają się, należałoby się spodziewać, że stopień wilgotności takiego gruntu zmaleje w wyniku wielu nakładających się procesów, z których najważniejsze to zwiększenie objętości gruntu oraz rozprężenie gazu uprzednio rozpuszczonego w wodzie. Wpływ tych procesów schematycznie przedstawiono na rysunku 2 [High i Leroueil 2002]. Przedstawione na wykresie krzywe ścisłości dla ośrodka o pełnym i niepełnym nasyceniu wyraźnie wskazują, że obecność gazu w porach gruntu zmienia charakterystyki



Rys. 2. Wpływ zawartości gazu na charakterystyki ścisłości z badań edometrycznych [High i Leroueil 2002]

Fig. 2. Influence of insufficient saturation on compressibility characteristics from oedometer test [High and Leroueil 2002]

ściślności, wpływając w ten sposób na nieprawidłowe określenie modułu ściślności i naprężenia prekonsolidacji. Im większa zawartość gazu, tym większy jest błąd.

BADANY MATERIAL

Badanym materiałem są naturalne prekonsolidowane grunty naturalne, pochodzące z trasy obwodnicy Mińska Mazowieckiego – gliny i gliny piaszczyste w stanie twardoplastycznym pobrane w trakcie odwiertów w cylindryczne próbki typu *Shelby*.

Badania edometryczne przeprowadzono metodą IL (*incremental loading*) przy wskaźniku obciążenia (LIR), wynoszącym 2, a każdy etap obciążenia trwał 24 godziny.

Badania wykonano na próbkach o średnicy 50 mm i wysokości 20 mm w standardowych edometrach w laboratorium Katedry Geoinżynierii SGGW. Przed przystąpieniem do każdego badania określano odkształcenia własne edometru w związku ze złożoną konstrukcją aparatu, występowaniem dźwigni i wielu połączeń sworzniowych. Cechowanie edometrów przeprowadzono przy takich samych obciążeniach, przy jakich badane były próbki gruntu.

Obliczono początkowe wskaźniki porowatości, a także wilgotność gruntu przed badaniem i po nim. Zestawienie wybranych właściwości fizycznych badanych próbek zamieszczono w tabeli 1, a krzywe uziarnienia badanych gruntów – na rysunku 3.

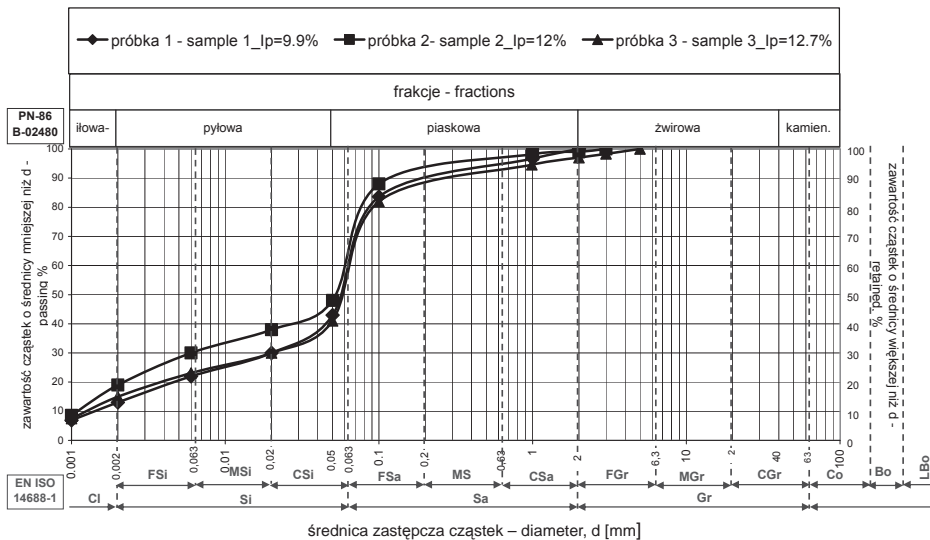
Tabela 1. Wybrane właściwości fizyczne badanych gruntów

Table 1. Index properties of tested soils

Próbka Sample	Rodzaj gruntu Soil type	ρ [Mg·m ⁻³]	ρ_d [Mg·m ⁻³]	ρ_s [Mg·m ⁻³]	w_n [%]	w_k [%]	e_0 [-]	e_k [-]
1 ♦	Gp/G (sisaCl)	2,06	1,81		14,1	10,6	0,46	0,29
2 ■	Gp (sasiCl)	2,17	1,92	2,65	13,0	10,3	0,38	0,28
3 ▲	Gp (sasiCl)	2,19	1,97		11,1	9,5	0,34	0,26

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Obecność powietrza lub gazów w porach odprężonego gruntu wpływa w znacznym stopniu na istotne, z punktu widzenia inżynierskiego, jego właściwości mechaniczne. Z tego względu przy wykonywaniu laboratoryjnych badań właściwości mechanicznych gruntu wykorzystuje się metodę ciśnienia wyrównawczego, która pozwala doprowadzić grunt do pełnego nasycenia, usuwając w ten sposób źródło istotnych błędów [Lipiński i Wdowska 2004]. Standardowa metoda przeprowadzania badania edometrycznego opisana w normie PN-88/B-04481 nie zapewnia pełnego nasycenia gruntu. W związku z tym uzasadnione jest domniemanie, że otrzymane wyniki badań będą obarczone istotnym błędem. Należałoby więc dokonać korekty otrzymanych wartości wskaźnika porowatości (e). W niniejszym artykule zaprezentowano sposób skorygowania wynikających



Rys. 3. Krzywe uziarnienia badanych gruntów

Fig. 3. Grain size distribution of tested soils

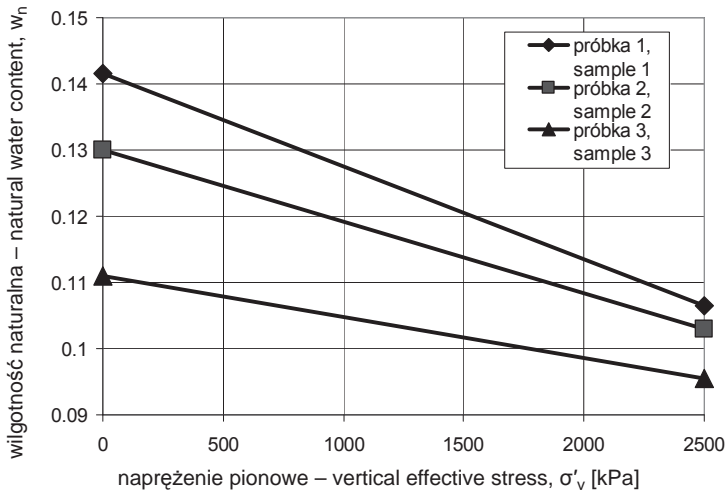
z tego błędów, który w większym stopniu uwzględnia wpływ zmiany wilgotności na parametry odkształceniowe.

Punktem wyjścia proponowanej procedury jest obserwacja, że w gruntach spoistych zwiększeniu objętości, wynikającemu z odprężenia (pobieranie gruntu z podłoża), nie odpowiada analogiczny wzrost wilgotności. W ten sposób proces odprężenia gruntu, wynikający z jego pobierania, jest nierozzerwalnie związany ze zmniejszeniem stopnia wilgotności (S_r). A zatem umieszczona w edometrze próbka jest poddawana obciążeniu w warunkach niepełnego nasycenia. Należy jednakże uwzględnić fakt, że obciążanie próbki będzie zmniejszało wskaźnik porowatości, co jest jednoznaczne z zwiększeniem stopnia wilgotności (S_r), zgodnie ze wzorem:

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} = \frac{w_n \rho_s}{e \rho_w} \quad (1)$$

gdzie: V_w – objętość wody,
 V_p – objętość porów,
 w_n – wilgotność naturalna,
 e – wskaźnik porowatości,
 ρ_s – gęstość właściwa szkieletu gruntowego,
 ρ_w – gęstość wody.

Istotną informacją jest również to, jak zmienia się wilgotność podczas badania edometrycznego, jeżeli próbka nie jest całkowicie nasączona. Z procedury badania wynika, że wartość wilgotności można zmierzyć jedynie na początku i na końcu badania. Przykładowe wyniki dla trzech próbek łą pokazano na rysunku 4. Wynika z niego, że wykresy zmian wilgotności wyglądają podobnie. Zmiana wilgotności pokazana na rysunku 4 może nie odpowiadać rzeczywistości, jednak bez dodatkowych badań nie ma podstaw, aby przedsta-

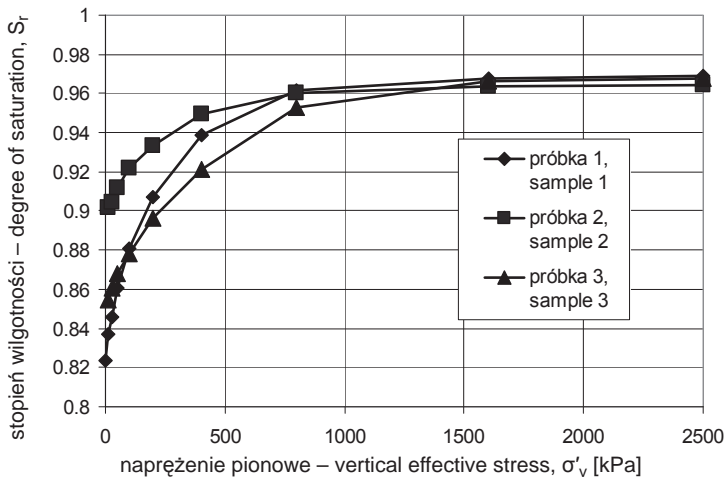


Rys. 4. Zmiana wilgotności podczas badania edometrycznego

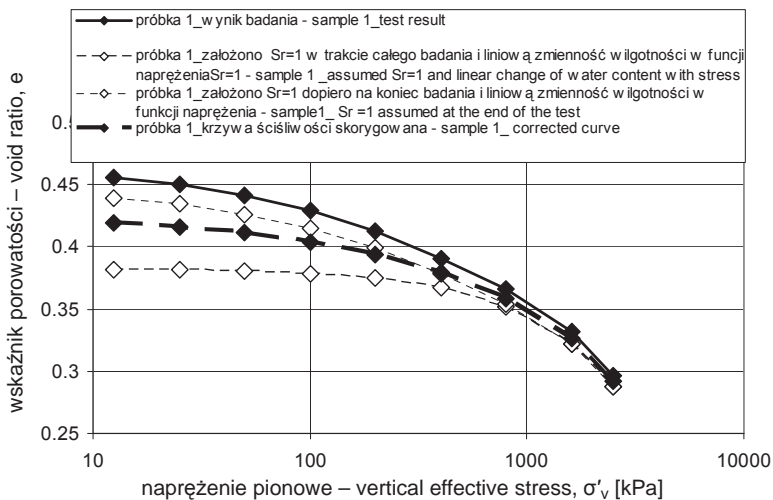
Fig. 4. Change in natural water content during oedometer test

wiać przebieg zmian wilgotności w funkcji napężenia w inny sposób. Zatem w pierwszym przybliżeniu można założyć, że wilgotność maleje liniowo wraz z napężeniem.

Następnym parametrem, którego przebieg należy ustalić, jest stopień wilgotności (S_r). Z doświadczenia wynika, że obliczenie wartości stopnia wilgotności na podstawie wzoru (1) nie jest dokładne, ponieważ suma dokładności wyznaczenia wszystkich wielkości składających się na ostateczną wartość S_r nie jest wystarczająca dla precyzyjnej oceny tego parametru. Typowy przebieg stopnia wilgotności w funkcji napężenia dla badanego gruntu wskazuje, że stabilizacja stopnia wilgotności następuje przy większych naprężeniach, co jest zgodne z naturalnym prawem ściśliwości (rys. 5). Stabilizacja parametru S_r mogłaby przebiegać przy mniejszych naprężeniach, gdyby rozkład wilgotności był bardziej hiperboliczny niż liniowy (co jest prawdopodobne). Zatem założenie, że na końcu badania edometrycznego (tj. przy naprężeniu 2500 kPa) próbka jest nasączona, wydaje się być prawdopodobne. Oczywiście wówczas parametr S_r przybiera wartość maksymalną. Przyjęcie takiego założenia daje podstawę do przeliczenia wartości wskaźnika porowatości, a co za tym idzie – do skorygowania przebiegu krzywej ściśliwości. Wykresy krzywych ściśliwości dla próbki 1, określone na podstawie pomiarów oraz skorygowane w sposób opisany powyżej, przedstawiono na rysunku 6. Zauważono istotną rozbieżność między wskaźnikami porowatości badanych próbek, która wynika prawdopodobnie w dużej mierze z długości czasu odprężenia. Takie duże zmiany wskaźnika porowatości podczas odprężenia są możliwe w przypadku gruntów mocno prekonsolidowanych. Dla gruntów normalnie skonsolidowanych lub lekko prekonsolidowanych te różnice byłyby wyraźnie mniejsze. Dla takich gruntów wydaje się uzasadnione przyjęcie założenia, że grunt jest w pełni nasączony, a zmiana wskaźnika porowatości wynika jedynie ze zmiany wilgotności. Takie założenie spowodowałoby najbardziej płaski z możliwych charakter krzywej ściśliwości, którego też nie można wykluczyć. Krzywą ściśliwości dla rozważanego założenia pokazano również linią przerywaną na rysunku 6.

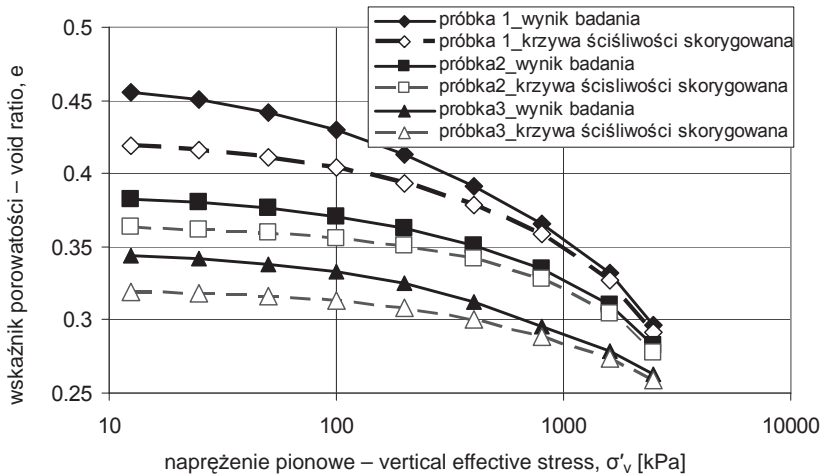


Rys. 5. Zmiana stopnia wilgotności dla liniowej zmiany w_n podczas badania
 Fig. 5. Change of degree of saturation for linear water content change during test



Rys. 6. Przebieg krzywych ścisłości przy różnych założeniach
 Fig. 6. Compressibility curves for various assumptions

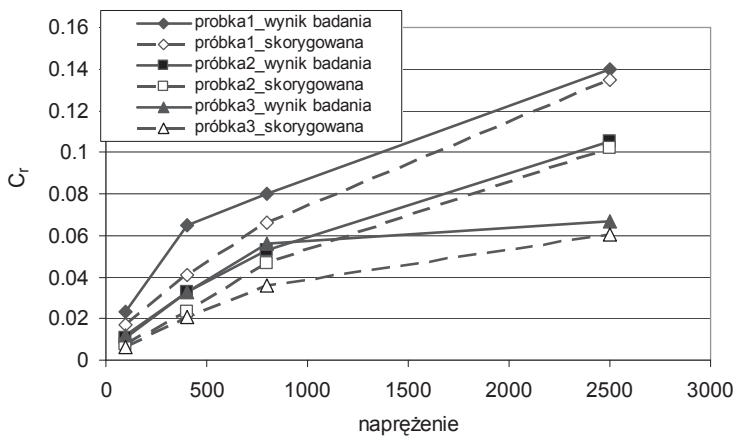
Przedstawiony na rysunku 6 przebieg hipotetycznych (oznaczonych liniami przerywanymi) krzywych ścisłości zakreśla obszar korekty krzywych otrzymanych z badań. Ze względu na różną historię napężenia i różnorodność gruntów, jakie mogą być badane w edometrze, trudno jest jednoznacznie określić, które założenie przyjąć za bardziej miarodajne. Ta decyzja powinna wynikać z konkretnego rozpatrywanego przypadku. Natomiast dla wskazania ogólnych zaleceń możliwe są różne kombinacje przedstawionych skrajnych rozwiązań. Oczywiście najprostszym rozwiązaniem jest przyjęcie wartości średniej ze skrajnych możliwych. Wynik uśrednienia wraz z pokazaniem krzywych ścisłości opartych na wartościach pomierzonych pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Porównanie krzywych ścisłości otrzymanych z badań z krzywymi skorygowanymi zgodnie z proponowaną procedurą

Fig. 7. Compressibility curves – test result and corrected curves according to proposed procedure

Uzyskane wykresy skorygowanych krzywych ścisłości różnią się znacząco co do położenia (wartości e) i ich rozkładu w funkcji naprężenia. Jednakże wpisują się dobrze w spodziewane (wynikające również z naruszenia struktury gruntu), a jednak trudne do ujęcia ilościowego zmiany położenia krzywej ścisłości. Takie ich położenie skutkuje zwiększeniem parametrów ścisłości, co w pewnym stopniu stanowi wytłumaczenie różnic w obliczeniach osiadań określonych na podstawie pomiarów edometrycznych w porównaniu z wynikami pomiarów terenowych. Różnice w wartościach wskaźnika ścisłości pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Przykładowa zmiana wskaźnika ścisłości przy korekcie krzywej ścisłości

Fig. 8. Example of recompression index change for corrected compressibility curves

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wpływ stanu uwilgotnienia prekonsolidowanego gruntu spoistego na jego charakterystyki ścisłości. Na podstawie serii edometrycznych badań wykonanych na wysokiej jakości próbkach gliny, o nienaruszonej strukturze, zaproponowano procedurę korekty otrzymanych z badań charakterystyk ścisłości. Uzyskane wyniki wskazują, że parametry ścisłości gruntu zmieniają się znacząco, wskazując na mniejszą jego ścisłość, co jest zgodne z wynikami pomiarów terenowych. Wskaźniki ścisłości dla powtórnego obciążenia w zakresie naprężeń 400–800 kPa maleją średnio o 20–25%. Korekta krzywej ścisłości (zwiększająca jej krzywiznę) pozwala również na bardziej wiarygodne określenie naprężenia prekonsolidacji.

PIŚMIENNICTWO

- Burland J.B., 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays. *Geotechnique* 40 (3), 329–378.
- Hight D.W., Leroueil S., 2002. Characterization of soils for engineering purposes. *Characterization and Engineering Properties of Natural Soil* 321–324.
- Ladd C.C., Foote R., Ishihara K., Schlosser F., Poulos H.G., 1977. Stress-Deformation and Strength Characteristics. "State-of-the-Art Report. Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering", Tokyo, 2, 421–494.
- Lipiński M.J., Wdowska M.K., 2004. Kryteria nasączenia gruntów prekonsolidowanych metodą ciśnienia wyrównawczego. *Współpraca budowli z podłożem gruntowym. II Problemowa Konferencja Geotechniczna*. T. 2, Białystok – Białowieża, 71–81.
- PN-81/B-03020. Grunty budowlane.
- PN- 88/B-04481. Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.

INFLUENCE OF CHANGE IN DEGREE OF SATURATION ON COMPRESSIBILITY CHARACTERISTICS

Abstract. Considerable differences between predicted and actual – measured in the field – deformation of subsoil create premises for hypothesis that compressibility characteristics of overconsolidated cohesive soils obtained from oedometer tests are incapable to reflect accurately soil behaviour under loading in the field. It results from the fact, that oedometer incremental loading test procedure is simplified to such extent that it does not account for many factors contributing to actual compressibility characteristics. The paper describes an approach to quantification of degree of saturation influence on compressibility characteristics. Test results of overconsolidated medium plasticity clays sampled from route of Mińsk Mazowiecki ring road. It was shown that standard procedure for determination of compressibility parameters does not account for change in degree of saturation during loading, what results in errors in prediction of soil structure interaction. Some recommendation concerning how to account for change in degree of saturation during oedometer test were given.

Key words: degree of saturation, oedometer test, compressibility characteristics

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.06.2013