

## **WPŁYW ZAWARTOŚCI FRAKCJI DROBNEJ NA CHARAKTERYSTYKI KONSOLIDACYJNE I ŚCISLIWOŚĆ GRUNTÓW ZIARNISTYCH**

Mirosław J. Lipiński, Małgorzata K. Wdowska

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** Zawartość frakcji drobnej różnicuje zachowanie gruntów, które pod względem klasyfikacyjnym znajdują się na granicy gruntów spoistych i niespoistych oraz są postrzegane jako materiały przejściowe i trudne do opisu. W artykule przedstawiono wyniki badań 5 materiałów ziarnistych o zróżnicowanej zawartości frakcji drobnej od 10 do 97%. Analizowano charakterystyki konsolidacji i ściśliwości. Analiza wyników badań pozwoliła na sformułowanie wniosków dotyczących zaobserwowanych prawidłowości w zmianach charakterystyk konsolidacji i ściśliwości wraz ze zmianą zawartości frakcji drobnej.

**Słowa kluczowe:** grunty niespoiste, zawartość frakcji drobnej, ściśliwość

### **WSTĘP**

W literaturze geotechnicznej dotyczącej określania cech i właściwości gruntów zdecydowana większość wyników badań koncentruje się na określonym rodzaju gruntu. Podstawowe badania eksperymentalne prowadzone w komorach kalibracyjnych, wirówkach, zaawansowanej aparaturze laboratoryjnej (kolumny rezonansowe, TSHC, zaawansowane aparaty trójosiowe) dotyczą zwykle czystych „akademickich” piasków, jak: Ticino, Ottawa, Toyoura, lub konkretnych gruntów spoistych, np. ilów londyńskich. Najwcześniejsza publikacja dotycząca zróżnicowanej roli w przenoszeniu naprężenia przez ziarna i cząstki gruntu o różnych wymiarach to propozycja Mitchella [1976]. Późniejsze prace dotyczyły wpływu zawartości frakcji drobnej na możliwość upłynnienia gruntu [np. Kuerbis i in. 1988] czy sztywność początkową [Rahman i in. 2012]. Niewiele jest informacji na temat gruntów przejściowych znajdujących się, z punktu widzenia uziarnienia, pomiędzy gruntami spoistymi a niespoistymi, natomiast w ogóle brak jest udokumentowanych badań zmierzających do opisu zmian podstawowych charakterystyk gruntu wraz ze zmianą

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Mirosław Lipiński, 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, mirosław\_lipinski@sggw.pl

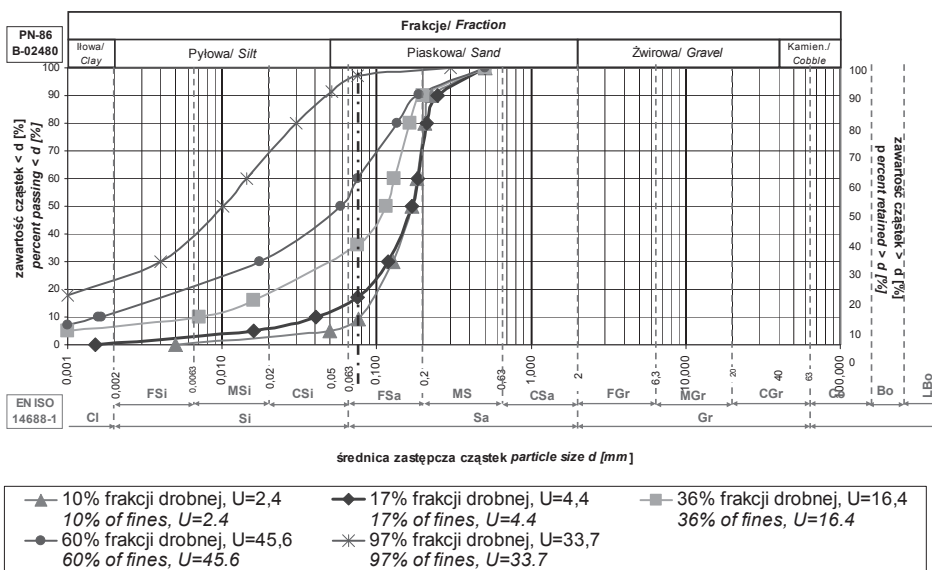
uziarnienia. Dowodem na to jest brak połączenia pomiędzy klasyfikacjami gruntów i ich właściwościami mechanicznymi. Podejmowane w przeszłości próby (np. grunty A, B, C, D, z normy PN-81/03020, uszeregowane według rodzaju i genezy) nie były (eufemistycznie to opisując) sukcesem. Tymczasem istnieje duże zapotrzebowanie na zrozumienie zachowania się gruntów przejściowych poprzez przypisanie zmian w uziarnieniu do odpowiadających im zmian parametrów mechanicznych. Potencjalne korzyści z wyjaśnienia tego zagadnienia miałyby, oprócz walorów poznawczych, wymiar praktyczny nie do przecenienia.

Jednymi z podstawowych charakterystyk właściwości mechanicznych, które dostarczają wielu cennych informacji o materiale, są charakterystyki konsolidacji i ściśliwości. W przypadku materiałów ziarnistych, zawierających znaczny procent frakcji drobnej, jest to szczególnie istotne, ponieważ grunty takie, traktowane często jako przejściowe, mogą wykazywać cechy zachowań gruntów niespoistych i spoistych. Charakterystyki ściśliwości gruntu niespoistego różnią się zasadniczo od charakterystyk ściśliwości gruntów spoistych. Główna różnica polega na tym, że w przypadku piasków możliwe jest istnienie nieskończenie wielu krzywych ściśliwości, które będą się różniły od siebie wskaźnikiem porowatości początkowej, odpowiadającym stanowi po depozycji materiału, a także zmianą wskaźnika porowatości wraz ze wzrostem naprężenia. W gruncie spoistym natomiast, w przypadku materiału bez historii obciążenia, krzywa ściśliwości jest jedna, jednoznacznie związana z jego składem granulometrycznym czy granicami konsystencji. Z faktu, czy grunt zachowuje się jak spoisty, czy niespoisty, wynika cały szereg konsekwencji dla sposobu badania materiału, a także dla jego późniejszego zachowania pod obciążeniem. Z tego względu w artykule przedstawiono charakterystyki konsolidacji i ściśliwości dla pięciu rodzajów gruntów ziarnistych zawierających różną zawartość frakcji drobnej. Termin „grunty ziarniste z różną zawartością frakcji drobnej” został użyty celowo, ażeby nie przyporządkowywać ich *a priori* do gruntów spoistych lub niespoistych. Zawartość frakcji drobnej w tym artykule rozumiana jest jako procent masy gruntu przechodzący przez sito nr 200, według ASTM, o wymiarze oczka 0,075 mm.

## METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono na gruntach ziarnistych o różnej zawartości frakcji drobnej, wynoszącej od 10 do 97%, których krzywe uziarnienia przedstawiono na rysunku 1. Dla każdego gruntu przeprowadzono co najmniej cztery badania przy różnych wartościach początkowego wskaźnika porowatości. Dokładną listę przeprowadzonych badań, dodatkowo scharakteryzowaną przez początkowe wskaźniki porowatości, przedstawiono w tabeli 1.

Badania gruntów niespoistych przeprowadzono w konsolidometrze na próbkach o średnicy 150 mm i wysokości 60 mm [Lipiński 1997]. Próbki były przygotowane w czterech warstwach. W zależności od wymaganego początkowego wskaźnika porowatości warstwy były spryskiwane wodą. Duże wymiary próbek (pow. = 176,7 cm<sup>2</sup>) wymagały przyłożenia odpowiednio dużej siły, dlatego zastosowano wielodźwigniowy system obciążania, który umożliwia zadanie siły do 60 kN (rys. 2). Takie rozwiązanie ma też pewne ograniczenia, m.in. ze względu na maksymalny skok tłoka aparatu, który w tej



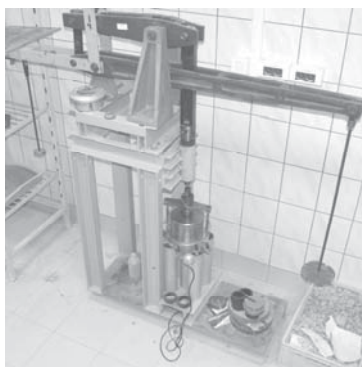
Rys. 1. Krzywe uziarnienia badanych gruntów

Fig. 1. Grain size distribution of tested soils

Tabela 1. Zestawienie wskaźników porowatości badanych próbek gruntów

Table 1. Void ratios of tested soils

Grunt – Soil	Początkowy wskaźnik porowatości – Initial void ratio, $e_0$					
10% frakcji drobnej – of fines	1,094	0,943	0,853	0,814	0,779	0,711
17% frakcji drobnej – of fines	0,994	0,950	0,828	0,702	–	–
36% frakcji drobnej – of fines	1,014	0,811	0,726	0,615	–	–
60% frakcji drobnej – of fines	1,645	1,110	0,948	0,850	0,676	–
97% frakcji drobnej – of fines	2,168	1,141	0,981	0,909	–	–



Rys. 2. Widok stanowiska badawczego oraz konsolidometru

Fig. 2. Consolidometer and loading system used during tests

konfiguracji wynosił 17 mm. Dlatego też dla luźnych gruntów zawierających więcej niż 60% frakcji drobnej stosowano jeden lub dwa cykle obciążenia-odciążenia i ponownego obciążenia, aby skok tłoka dostosować do wielkości deformacji.

Innymi ograniczeniami były:

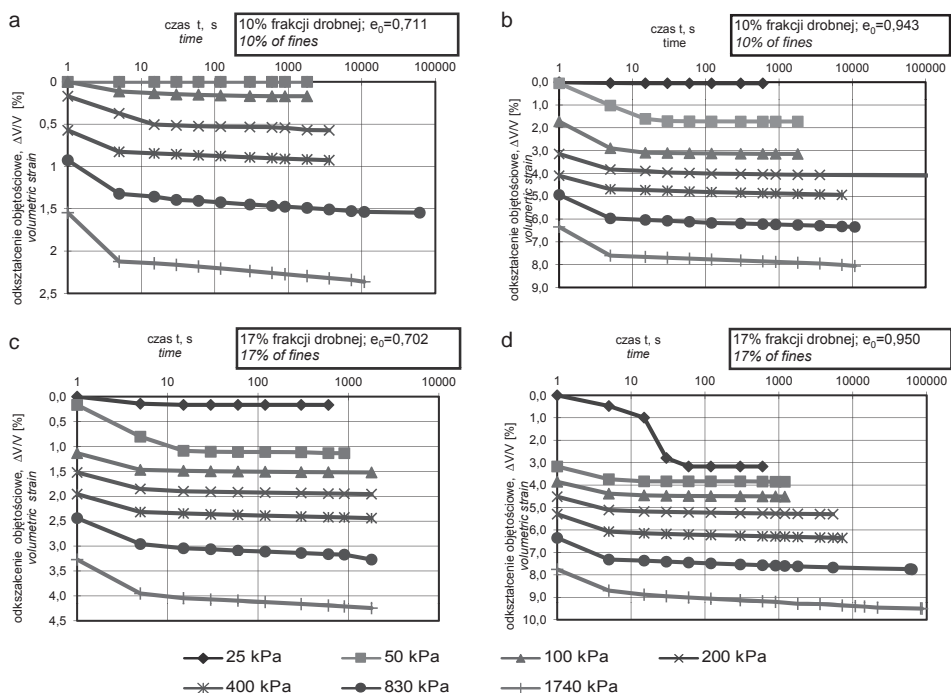
- tarcie wywołane parą pierścieni uszczelniających niezbędnych dla uszczelnienia pierścienia konsolidometru w przypadku stosowania ciśnienia wyrównawczego,
- tarcie w wielodźwigniowym systemie obciążania spowodowało powstawanie dla małego zakresu naprężeń niewielkiej histerezy podczas cyklu obciążenie-odciążenie.

Z tego powodu, pomimo że krzywe konsolidacji ilustrują faktyczny przebieg badania, powinno się je interpretować w przedziale 100–1000 kPa.

Konstrukcja konsolidometru umożliwiała zastosowanie ciśnienia wyrównawczego podczas badania (rys. 2), wyeliminowano więc najczęściej pojawiający się problem niepełnego nasycenia gruntu w badaniach konsolidacji [Lipiński i Wdowska 2004, Lipiński 2013]. Po umieszczeniu próbki w konsolidometrze przepuszczano przez nią CO<sub>2</sub> (przez minimum 2 godziny), a następnie odpowietrzoną wodę destylowaną. W trakcie nasączania ciśnienie wyrównawcze o wartości 300 kPa było wystarczające do zapewnienia pełnego nasycenia. Parametr Skemptona (*B*) zwykle osiągał wartości od 0,95 do 1,0. Należy podkreślić, że dla zachowania niezmienności naprężeń efektywnych podczas nasączania ciśnienie wyrównawcze było przykładane etapami. Po zakończeniu etapu nasączania następowało właściwe badanie edometryczne, w którym współczynnik przyrostu obciążenia (*LIR*) podczas zadawania obciążeń wynosił 1, a badanie rozpoczynano od naprężenia 25 kPa. Podczas procesu konsolidacji mierzono deformacje próbki i objętość odpływającej wody. Zastosowano dwie biurety: 20 cm<sup>3</sup> – dla odczytów początkowych i 250 cm<sup>3</sup> dla pozostałych. Biurety były podłączone do systemu zadawania ciśnienia wyrównawczego.

## CHARAKTERYSTYKI KONSOLIDACJI

Charakterystyki konsolidacji przedstawiono w postaci odkształcenia objętościowego, w zależności od czasu. Jako najistotniejsze czynniki uznano zawartość frakcji drobnej, początkowy wskaźnik porowatości i wartość efektywnego naprężenia pionowego. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono odpowiednio charakterystyki dla gruntów wykazujących zachowanie typowe dla gruntów niespoistych oraz spoistych. Z uwagi na ograniczenie objętości artykułu dla każdego rodzaju gruntu przedstawiono po dwa wyniki badań, dla małej (stan zagęszczony) i dużej (stan luźny) wartości początkowego wskaźnika porowatości. Na rysunku 3 przedstawiono charakterystyki dla gruntów zawierających 10 i 17% frakcji drobnej. Początkowe wskaźniki porowatości dla próbek zagęszczonych nieznacznie przekraczały wartość 0,7, natomiast dla gruntów luźnych w obu przypadkach wynosiły około 0,95. Wspólną cechą wszystkich wykresów jest rozproszenie nadwyżki ciśnienia wody w porach już po 5 sekundach. Tylko dla najmniejszego obciążenia dla gruntu o zawartości frakcji drobnej 17% czas ten wynosił 30 sekund. Poza tym widać, że dla tej grupy gruntów 7% różnicy w zawartości frakcji drobnej bardziej wpływa na odkształcenie gruntów zagęszczonych niż luźnych. Dla materiału zawierającego 17% frak-

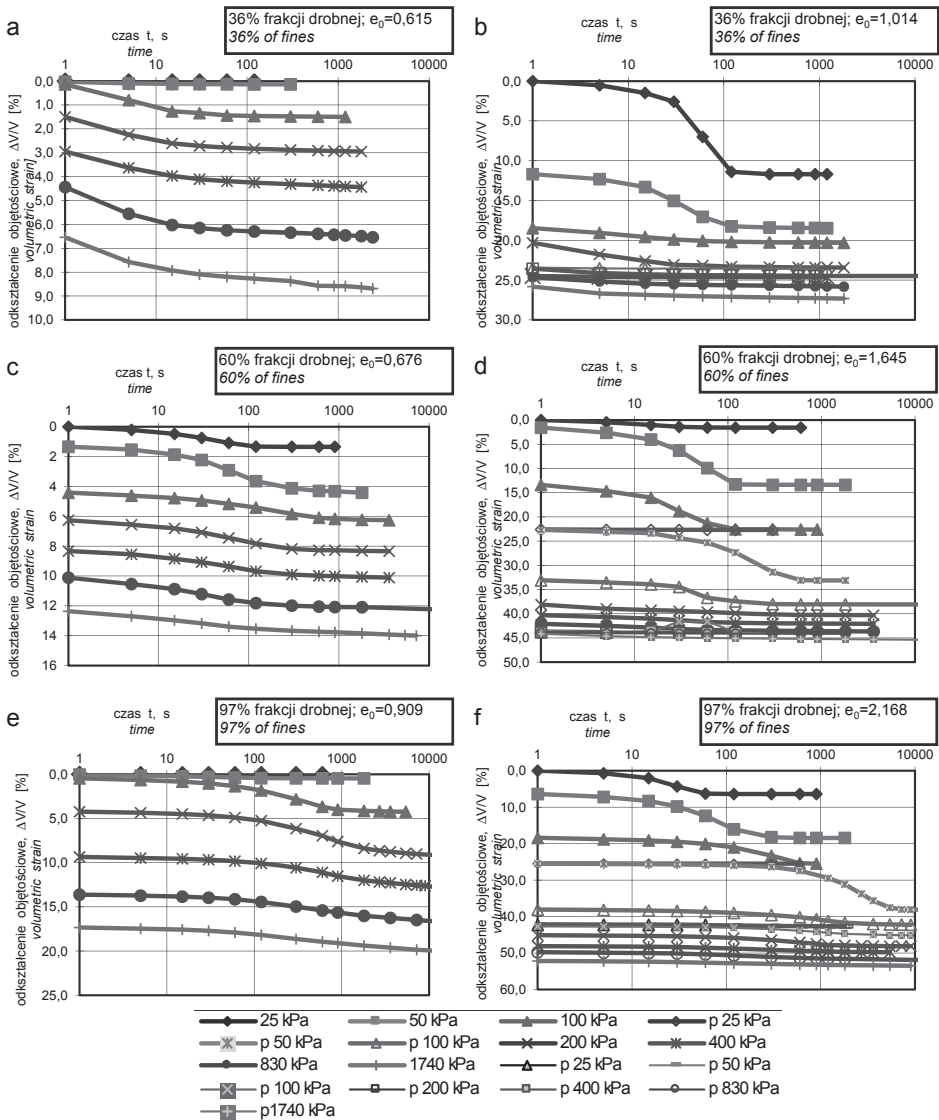


Rys. 3. Charakterystyki konsolidacji gruntów piaszczystych przygotowywanych przy małych i dużych wartościach początkowego wskaźnika porowatości

Fig. 3. Consolidation characteristics of sandy materials prepared at low and high values of void ratio

cji drobnej zagęszczenie powoduje dwukrotną redukcję odkształcenia objętościowego, podczas gdy dla materiału zawierającego 10% frakcji drobnej ta redukcja już jest prawie czterokrotna.

Nieco inaczej wyglądają charakterystyki materiałów wykazujących cechy gruntów spoistych, zawierających odpowiednio 36, 60 i 70% frakcji drobnej. Wykresy konsolidacji tych gruntów przedstawiono w analogicznym układzie jak dla gruntów piaszczystych, na rysunku 4. Odkształcenia objętościowe są większe niż w przypadku gruntów piaszczystych i rosną proporcjonalnie do zawartości frakcji drobnej. Wspólną cechą gruntów luźnych jest powstawanie relatywnie dużych odkształceń objętościowych już przy niewielkich wartościach naprężenia i późniejsze małe jego zmiany przy podwajaniu obciążenia. Dla stanów zagęszczonych początkowo przyrosty odkształcenia objętościowego są rozłożone proporcjonalnie do stosunków przyrostu obciążenia. Wspólną cechą pięciu przedstawionych wykresów jest przesunięcie punktu przegięcia krzywych konsolidacji w prawo, co świadczy o odbywającej się konsolidacji. Jedynie w badaniu zagęszczonego gruntu, zawierającego 36% frakcji drobnej, krzywe konsolidacji zachowują kształt podobny jak dla gruntów piaszczystych, co może świadczyć o tym, że grunt o tej zawartości frakcji drobnej może wykazywać cechy przejściowe.

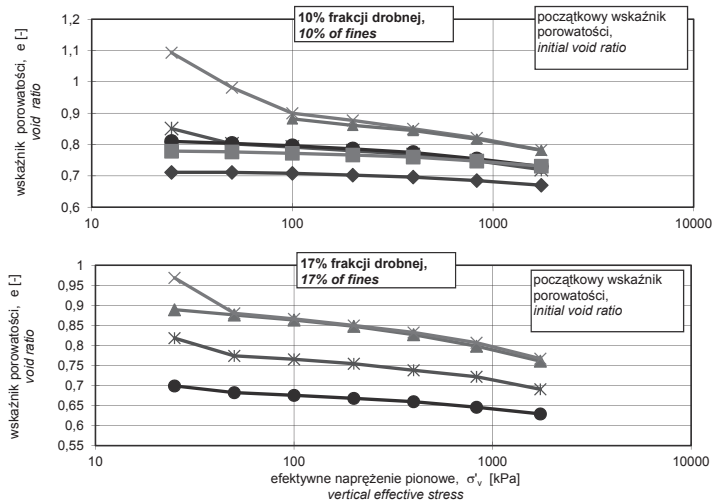


Rys. 4. Charakterystyki konsolidacji gruntów z dużą zawartością frakcji drobnej przygotowywanych przy małych i dużych wartościach początkowego wskaźnika porowatości

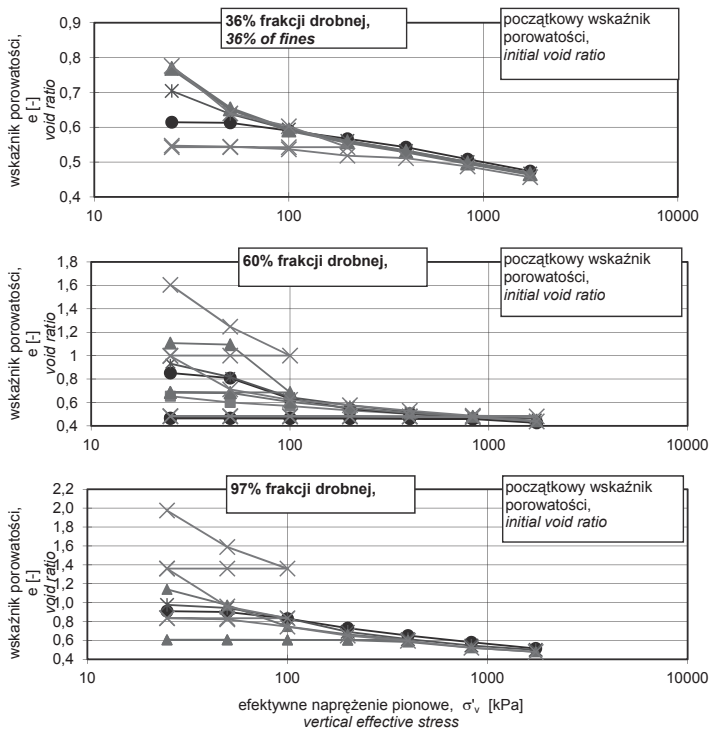
Fig. 4. Consolidation characteristics materials with high amount of fines prepared at low and high values of void ratio

## CHARAKTERYSTYKI ŚCISLIWOŚCI

Krzywe ścisłości wszystkich badań przedstawiono na rysunkach 5 i 6 w postaci zależności wskaźnika porowatości od pionowego naprężenia efektywnego przedstawionego w podziałce logarytmicznej. Na rysunku 5 przedstawiono krzywe dla gruntów piaszczy-



Rys. 5. Charakterystyki ścisłości gruntów zawierających 10 i 17% frakcji drobnej  
 Fig. 5. Compressibility characteristics for materials with 10 and 17% of fines



Rys. 6. Charakterystyki ścisłości dla gruntów zawierających 36, 60 i 97% frakcji drobnej  
 Fig. 6. Compressibility characteristics of materials with 36, 60 and 97% of fines



stych, natomiast na rysunku 6 – wykresy dla gruntów zawierających 36, 60 i 97% frakcji drobnej. Porównanie tych dwóch rysunków wyraźnie wskazuje na całkowicie odmienny charakter krzywych. W przypadku materiałów piaszczystych przyrost obciążeń jedynie w niewielkim stopniu zmienia relacje początkowych wskaźników porowatości, natomiast dla materiałów, których krzywe pokazane są na rysunku 6, od pewnego obciążenia różnice w początkowych wskaźnikach porowatości zanikają. Wartość tego naprężenia jest tym mniejsza, im większa jest zawartość frakcji drobnej. I tak dla materiałów zawierających 36, 60 i 97% frakcji drobnej wartości tych naprężeń wynoszą odpowiednio: 1740, 830 i 400 kPa.

Istotne informacje można uzyskać, śledząc charakterystyki ściśliwości w postaci zmian współczynnika ściśliwości ( $C_c$ ), w zależności od przyrostu naprężenia efektywnego. Wartość tego współczynnika określa się z następującego wzoru:

$$C_c = -\frac{de}{d \log \sigma'_v} \quad (1)$$

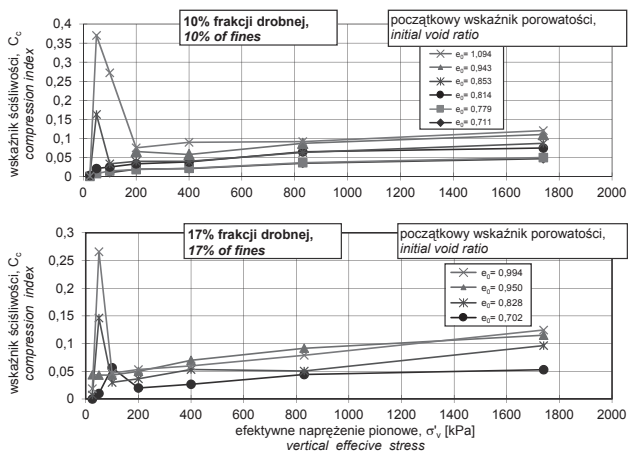
Do obliczenia  $C_c$  przyjmowano wskaźnik porowatości  $e_2$ , odpowiadający załamaniu krzywej  $e-t$ .

Analogicznie jak w przypadku krzywych konsolidacji i ściśliwości, wykresy wskaźnika ściśliwości ( $C_c$ ) pogrupowano na rysunkach 7 i 8, odpowiednio dla gruntów piaszczystych i spoistych. Analizę rysunków można przedstawić następująco:

- jednorodność rozkładu wskaźnika ściśliwości obserwowana jest w zakresie naprężeń 200–1740 kPa,
- zasadniczo można zaobserwować, że większa wartość wskaźnika ściśliwości odpowiada większej zawartości frakcji drobnych,
- dla gruntów modelowych o zawartości frakcji drobnej 10 i 17% wartości  $C_c$  mają tendencję rosnącą w zakresie naprężeń 200–1740 kPa i wyraźnie zależą od początkowego wskaźnika porowatości,
- dla gruntu zawierającego 36% frakcji drobnej rozkład wartości wskaźnika  $C_c$  w zależności od pionowego naprężenia efektywnego zasadniczo nie zmienia się i wydaje się, że nie zależy od początkowego wskaźnika porowatości,
- dla gruntów o zawartości frakcji drobnej 60 i 97% wartości wskaźnika  $C_c$  wyraźnie zmniejszają się wraz ze wzrostem pionowego naprężenia efektywnego i nie różnią się między sobą, niezależnie od początkowego wskaźnika porowatości,
- większy gradient zmiany  $C_c$  występuje dla materiału drobniejszego.

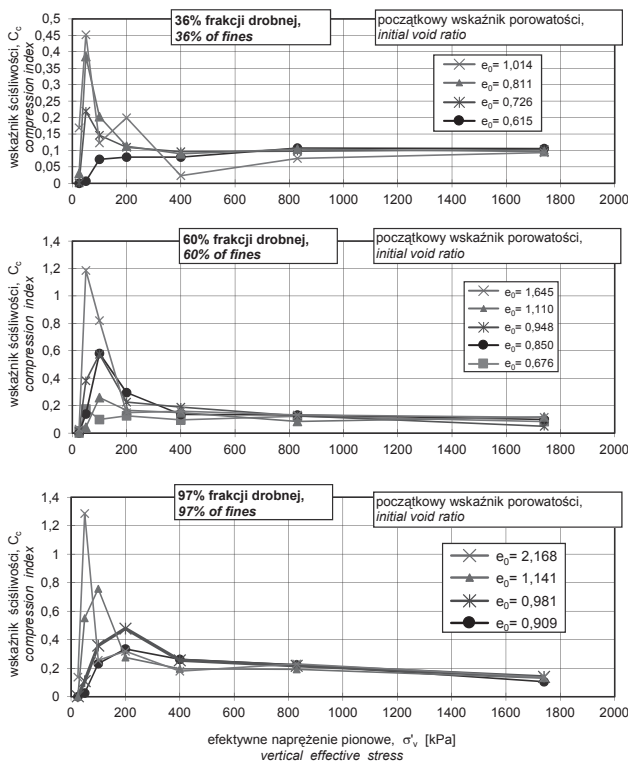
W celu porównania wpływu zawartości frakcji drobnej na zmienność wskaźnika ściśliwości ( $C_c$ ), w zależności od naprężenia pionowego, na rysunku 9 przedstawiono uśrednione wartości tego parametru dla wszystkich badanych gruntów. Rozpatrując wyniki podane na wykresie w liczbach bezwzględnych, widać, że wskaźniki ściśliwości są tym wyższe, im większa jest zawartość frakcji drobnej, przy czym współczynniki proporcjonalności pomiędzy tymi wielkościami zmniejszają się wraz ze wzrostem naprężenia. Generalizując, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem obciążenia różnice w ściśliwości poszczególnych rodzajów gruntu maleją. Taki wniosek nasuwa się automatycznie, jeżeli współczynniki ściśliwości przedstawi się w zależności od miary uziarnienia (rys. 10).





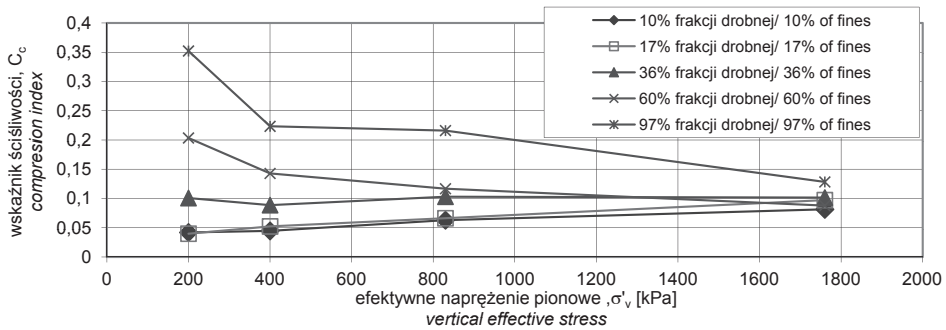
Rys. 7. Wskaźniki ścisłości w zależności od efektywnego napężenia pionowego dla gruntów piaszczystych

Fig. 7. Compression indexes against vertical effective stress for sandy materials



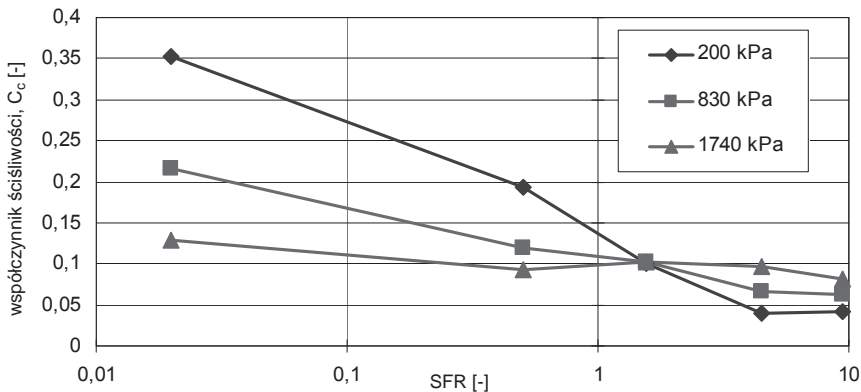
Rys. 8. Wskaźniki ścisłości w zależności od efektywnego napężenia pionowego dla gruntów z dużą zawartością frakcji drobnej

Fig. 8. Compression indexes against vertical effective stress for materials with high amount of fines



Rys. 9. Uśrednione wskaźniki ścisłości badanych gruntów w zależności od efektywnego naprężenia pionowego

Fig. 9. Average compression indexes of tested soils against vertical effective stress



Rys. 10. Współczynniki ścisłości w zależności od SFR dla wybranych wartości naprężenia pionowego

Fig. 10. Compression indices against SFR for selected values of vertical stress

Jako miarę uziarnienia przyjęto wartość wskaźnika SFR (*sand to fines ratio*) [Lipiński 2013], który, jak wynika z nazwy, jest stosunkiem masy frakcji powyżej 0,075 mm do zawartości frakcji o średnicach mniejszych od 0,075 mm. Dla czytelności rysunku pokazano jedynie trzy obciążenia (200, 830 i 1740 kPa). Dla relatywnie małej wartości efektywnego naprężenia pionowego ( $\sigma'_v = 200$  kPa) wartości  $C_c$  różnią się znacznie dla różnych gruntów: od 0,04 dla gruntu zawierającego 10% frakcji drobnej do 0,35 dla gruntu zawierającego 97% frakcji drobnej. Różnice maleją wraz ze wzrostem obciążenia i dla naprężenia 1740 kPa zakres zmienności współczynnika jest bardzo mały (0,08–0,13). Jednocześnie na wykresie widoczny jest wyraźny spadek  $C_c$  przy wzroście naprężeń dla gruntów drobniejszych oraz wzrost wartości  $C_c$  w miarę wzrostu naprężeń dla gruntów o grubszym uziarnieniu. O ile pierwsza obserwacja jest zgodna z intuicją, to już ta ostatnia wydaje się być niezgodna z oczekiwaniami. Wyjaśnieniem tego może być inny mechanizm przenoszenia obciążenia przez grunty piaszczyste i drobnoziarniste. To zagadnie-

nie zasługuje na poświęcenie mu znacznie większej uwagi w dalszych badaniach. Warto też zwrócić uwagę na fakt, że przy zawartości frakcji drobnej 36% następuje inwersja współczynników ściśliwości, co koreluje z postulatem istnienia tzw. progowej zawartości frakcji drobnej (*threshold fines content*), przy której następuje zmiana podatności na upłynnienie gruntu.

## WNIOSKI

Analiza wyników badań konsolidacji i ściśliwości przeprowadzona na pięciu rodzajach gruntów zawierających 10, 17, 36, 60 i 97% frakcji drobnej oraz przy różnych początkowych stanach zagęszczenia pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Granica zawartości frakcji drobnej, której przekroczenie wiąże się z istotną zmianą charakterystyk, na pewno zaczyna się powyżej 17%. Do tej wartości charakterystyki konsolidacji i ściśliwości wykazują cechy typowe dla gruntu piaszczystego. Grunty o zawartości frakcji drobnej 60 i 97% zachowują się jak grunty spoiste, natomiast materiał zawierający 36% frakcji drobnej w większości wykazuje cechy gruntu spoistego, ale (np. krzywe ściśliwości) w zależności od stanu początkowego może wykazywać cechy typowe dla obydwu grup gruntów.

2. W gruntach z dużą zawartością frakcji drobnej początkowy stan gruntu decyduje o rozkładzie przyrostów odkształceń objętościowych w zależności od obciążenia.

3. Rozkład współczynników ściśliwości w zależności od obciążenia wskazuje na inny mechanizm przenoszenia obciążenia w gruntach piaszczystych i bardzo drobnych.

4. W miarę przyrostu obciążenia wskaźniki ściśliwości gruntów o różnej zawartości wykazują silną konwergencję. Inwersja wskaźników ściśliwości, odpowiadająca zawartości frakcji drobnej 36%, potwierdza postulat istnienia progowej zawartości frakcji drobnej stosowanej w zagadnieniach opisu podatności na upłynnienie gruntów o zróżnicowanej zawartości frakcji drobnej.

## PIŚMIENNICTWO

- Kuerbis R., Negussey D., Vaid Y.P., 1988. Effect of gradation and fine content on the undrained response of sand. Hydraulic fill structure. Geotechnical Special Publication 21. ASCE, New York, 330–345.
- Lipiński M.J., 1997. Wyznaczenie charakterystyk konsolidacyjnych osadów na gruntach modelowych. Raport Katedry Geotechniki SGGW, Warszawa.
- Lipiński M.J., 2013. Kryteria wyznaczania parametrów geotechnicznych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Lipiński M.J., Wdowska M.K., 2004. Kryteria nasączania gruntów prekonsolidowanych metodą ciśnienia wyrównawczego. II Problematyczna Konferencja Geotechniczna „Współpraca budowlanej z podłożem gruntowym”, Białystok – Białowieża, 2, 71–81.
- Mitchel J.K., 1976. Fundamentals of soil behavior. John Wiley & Sons, New York.
- PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- Rahman M.M., Cubrinovski M., Lo S.R., 2012. Initial shear modulus of sandy soils and equivalent granular void ratio. Geomechanics and Geoengineering 7, 3, 219–226.

## **INFLUENCE OF FINES CONTENT ON CONSOLIDATION AND COMPRESSIBILITY CHARACTERISTICS OF GRANULAR SOILS**

**Abstract.** Fines content differentiates the behavior of soils which from classification point of view are between cohesive and cohesionless and therefore are perceived as the transitional soils and difficult to describe. The paper presents test results of 5 granular soils of various fines content ranging from 10 to 97%. Consolidation and compressibility characteristics were considered. Analysis of test results made possible formulation of conclusions concerning tendencies in change of compressibility characteristics with fines content change.

**Key words:** cohesionless soils, fines content, compressibility

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 19.12.2014