

Ocena doświadczalnych rozkładów ciśnienia porowego w badaniach konsolidometrycznych typu CL

Sebastian Kowalczyk*



The assessment of pore pressure experimental distributions during continuous loading (CL) consolidation tests. *Prz. Geol.*, 53 : 162–167.

S u m m a r y. The pore pressure variations that were obtained during CL consolidation tests are discussed in this paper. The comparative analysis was made on the base of observed changes to confront information on experimental soil behavior with theoretical solutions of the primary (filtration) consolidation process. On the basis of obtained experimental data, the factors resulting in the incompatibility with the theoretical models, were identified and discussed in this paper. This incompatibility results from degree of saturation, conditions of dispersion of pore water pressure and load rate path.

Key words: consolidation, CL consolidation test, variability of pore water pressure, parameter C_{CL}

Badania konsolidacji gruntów są prowadzone od dziesięcioleci. Początkowo były wykonywane w celu prognozowania przebiegu osiadania podłoża budowlanego. Rozwój mechaniki gruntów i lepsze zrozumienie istoty konsolidacji pozwoliły wskazać nowe zastosowania badań konsolidacyjnych. Obecnie badania konsolidacji coraz częściej są wykorzystywane do określania właściwości izolacyjnych gruntów słabo przepuszczalnych. Zarówno dla poprawnej prognozy przebiegu osiadań, jak i oceny przepuszczalności gruntów niezbędna jest ocena udziału czynnika filtracyjnego w przebiegu konsolidacji.

Uwarunkowania teoretyczne

Konsolidacja jest procesem równoczesnego zmniejszania zawartości wody oraz objętości porów w gruncie na skutek zmiany stanu naprężenia. Może być wywołana obciążeniem zewnętrznym lub zmianami naprężeń pierwotnych, spowodowanymi na przykład odwodnieniem masywu gruntowego. Proces ten jest opisywany w funkcji czasu. Parametrami charakteryzującymi konsolidację są: moduł ściśliwości M_0 (współczynnik ściśliwości a_v oraz współczynnik ściśliwości objętościowej gruntu m_v), współczynnik konsolidacji c_v , ciśnienie wody w porach gruntu u , a także długość drogi drenażu H w obrębie konsolidowanej warstwy. Współczynnik konsolidacji c_v jest stałą w równaniu opisującym przebieg rozpraszania ciśnienia wody w przestrzeni porowej

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

gdzie:

u — ciśnienie wody w porach gruntu,
 z — odległość od granicy konsolidowanej warstwy,
 t — czas.

Współczynnik konsolidacji ma także określony sens fizyczny. Jest on zależny od zmian porowatości e , współczynnika filtracji k , jak również parametrów charakteryzujących ściśliwość gruntu (a_v , m_v lub M_0).

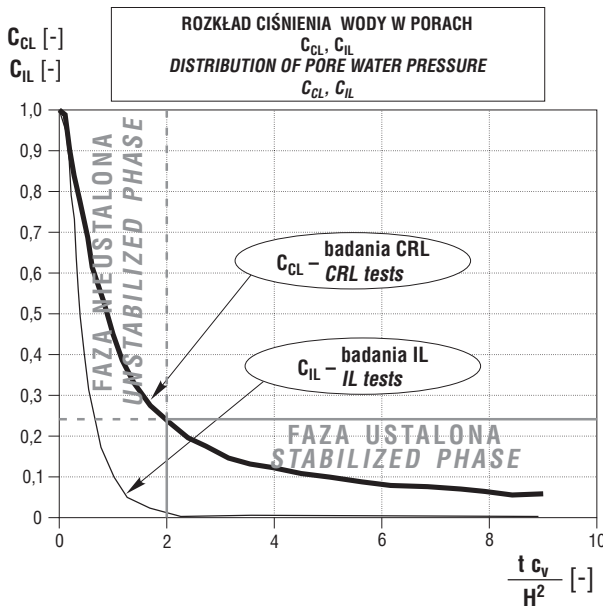
$$c_v = \frac{k \times (1+e)}{\gamma_w \times a_v} = \frac{k}{\gamma_w \times m_v} = \frac{k \times M_0}{\gamma_w}$$

Istotą nowoczesnych badań konsolidacji jest możliwość pomiaru ciśnienia wody w porach, zarówno w standardowych badaniach edometrycznych (*incremental loading* — IL), jak i w badaniach z obciążeniem rosnącym w sposób ciągły (*continuous loading* — CL). W tych ostatnich znane są rozmaite odmiany — badania ze stałą prędkością obciążenia (*constant rate of loading* — CRL) lub odkształcenia (*constant rate of strain* — CRS). Analiza procesu konsolidacji na podstawie obserwacji zmian ciśnienia porowego w badaniach typu IL może być upowszechniona dzięki wprowadzeniu do praktyki laboratoryjnej konsolidometru Rowe'a. Wcześniej, w badaniach typu IL, analiza opierała się zazwyczaj tylko na obserwacji przebiegu osiadania w czasie. Natomiast w badaniach typu CL zmiany wartości ciśnienia porowego przy wszystkich programach obciążenia (CRL, CRS) rejestrowane są obligatoryjnie. Obserwacje te umożliwiają określenie wartości współczynnika konsolidacji na podstawie odpowiednich formuł obliczeniowych (Wissa i in., 1969; Janbu i in., 1980; ASTM).

Wyniki uzyskiwane w toku laboratoryjnych badań konsolidacji są często niejednoznaczne i zróżnicowane w zależności od zastosowanego systemu obciążenia (IL, CL) oraz metod interpretacji. Jednak zawsze wartości współczynnika konsolidacji są uwarunkowane wielkością oraz tempem rozpraszania ciśnienia wody w porach gruntu (ryc. 1). Zmiany ciśnienia porowego są uzależnione od filtracyjnych cech ośrodka gruntowego, długości drogi drenażu oraz sposobu przyłożenia obciążenia. Im wyższe wartości ciśnienia porowego otrzymujemy w toku badań, tym zazwyczaj niższa jest wartość współczynnika konsolidacji i tym dłuższy czas rozpraszania się ciśnienia porowego, a co za tym idzie dłuższy czas osiadania gruntu.

Ze względu na przebieg zmian ciśnienia porowego wyróżniono w badaniach CL dwa etapy (Vu Cao Minh, 1976): nieustalony, w którym ciśnienie porowe wzrasta krzywoliniowo i dąży do określonej wartości, oraz ustalony, w którym ciśnienie porowe winno stabilizować się i osiąga maksymalną wartość dla danego badania mimo nadal trwającego wzrostu obciążenia (ryc. 2). Wyjaśnienie zjawiska stabilizacji ciśnienia porowego w warunkach badania CL jest związane zastępowaniem rozpraszanej nadwyżki ciśnienia porowego przez włączanie systematycznie kolejnego przyrostu Δu w warunkach stałego wzrostu obciążenia i przy nie zmienionych parametrach

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; s.kowalczyk@uw.edu.pl



Ryc. 1. Teoretyczne charakterystyki zmian parametru ciśnienia wody w porach u/σ w przebiegu konsolidacji typu CRL oraz IL (wg Dobaka, 1999)

Fig. 1. Theoretical characteristics of variability of pore water pressure parameter u/σ for CRL and IL test program of consolidation (after Dobak, 1999)

filtracyjno-konsolidacyjnych gruntu. Według Dobaka (1999) stan quasi-stabilizacji jest osiągnięty po czasie

$$t_{100\%} \approx \frac{2c_v}{H^2}$$

Zmiany ciśnienia porowego w trakcie badania można bezwymiarowo przedstawić stosując parametr C_{CL} , analogiczny do powszechnie stosowanego parametru C (Lambe & Whitman, 1969). Wyraża on stosunek wartości ciśnienia porowego u do całkowitego naprężenia osiowego σ , działającego na grunt w danej chwili.

Procesy zachodzące w gruncie podczas badań konsolidacyjnych rozpatrywano w nawiązaniu do teorii jednoosiowej konsolidacji filtracyjnej Terzaghiego. Według tej teorii grunt ma właściwości sprężysto-lepkie, których odwzorowaniem jest reologiczne ciało Kelvina. Natychmiast po przyłożeniu naprężenia całe obciążenie powinna przenieść

woda i wówczas $C = C_{CL} = 1$. Następnie, wraz z uruchomieniem procesu filtracji coraz większą rolę w przenoszeniu naprężenia odgrywa szkielet gruntowy, a więc maleje wartość

$$C_{CL} = \frac{u}{\sigma}$$

Gdy rozpatruje się niewielkie przedziały obciążeń, wartości współczynnika konsolidacji powinny być stałe. Tymczasem w wielu badaniach uzyskuje się zmienne wartości c_v . Przyczyną tego jest przede wszystkim niezgodność przebiegu badań z rozwiązaniami teoretycznymi — obserwowana w wielu przypadkach. Ta niezgodność jest też najczęściej podstawową przyczyną zmienności współczynnika konsolidacji. Powstaje zatem pytanie, jak ocenić miarodajność wyników i kiedy można je ze sobą porównać?

W badaniach typu IL zaawansowanie procesu konsolidacji możemy ocenić poprzez zmiany stopnia konsolidacji gruntu S_k . Określają one aktualną wartość odkształcenia w stosunku do odkształcenia całkowitego. Jednak w badaniach prowadzonych w warunkach stałego wzrostu obciążenia (CL) nie definiuje się odkształcenia końcowego. Stąd bezużyteczne staje się klasyczne pojęcie stopnia konsolidacji i trzeba szukać innych kryteriów oceny zaawansowania procesu.

W niniejszym artykule przyjęto dwa takie kryteria. Wynikają one z teoretycznych rozwiązań przedstawionych przez P. Dobaka (1999). Są to określone wartości:

1) stosunku $\frac{t \cdot c_v}{H^2}$;

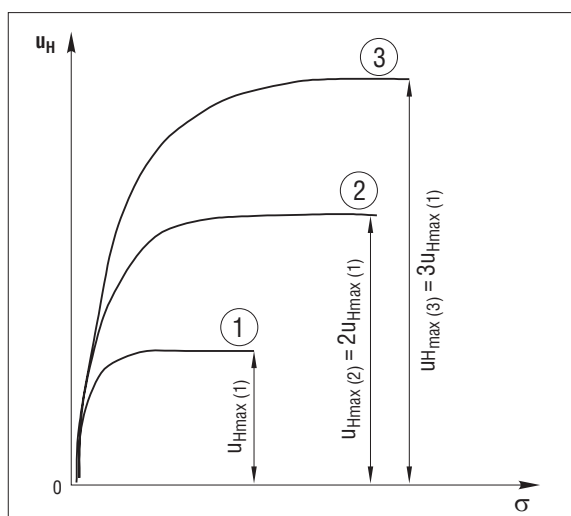
gdzie $\frac{t \cdot c_v}{H^2} > 2$, to badanie CL jest na etapie ustalonym,

a wartości c_v wykazują zazwyczaj quasi-stabilizację (w rzeczywistości zdążają one asymptotycznie do zera);

2) parametru C_{CL} ;

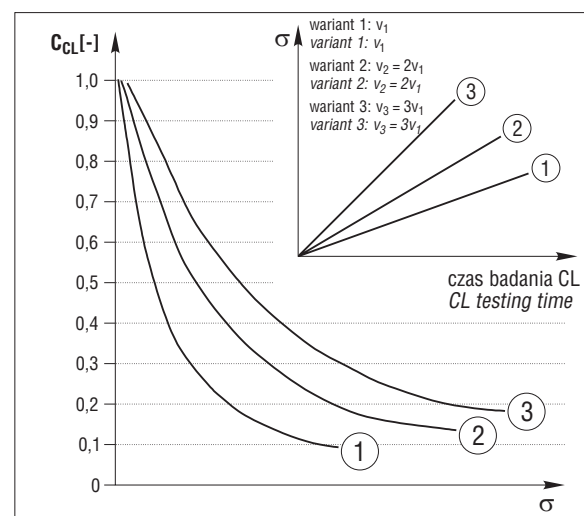
w badaniach ze stałą prędkością obciążenia (CRL) etap ustalony występuje wtedy, gdy $C_{CL} < 0,24$. Natomiast w badaniach ze stałą prędkością odkształcenia graniczna wartość C_{CL} jest z reguły nieco wyższa i może być dokładnie wyznaczona z obliczeń teoretycznych. W praktyce więc w badaniach CRS wykorzystuje się tylko pierwsze z omawianych kryteriów.

Z rozwiązań teoretycznych, pokazanych na ryc. 1, wynika, że w chwili przyłożenia do gruntu obciążenia parametry



Ryc. 2. Teoretyczna zmienność ciśnienia porowego w warunkach liniowego przyrostu naprężenia (wg Dobaka, 1999)

Fig. 2. Theoretical variability of pore water pressure — loading proportional to the rate of stress increase (after Dobak, 1999)



C_{CL} oraz C_{IL} przyjmują wartość maksymalną — równą 1. Oznacza to, że początkowo całe obciążenie przejmuje woda znajdująca się w przestrzeni porowej. Ciśnienie porowe, dzięki przepuszczalności ośrodka gruntowego, rozprasza się i wartości parametru C szybko maleją w funkcji czasu. W modelowych rozwiązaniach przebiegu badań CL zmiana parametru C_{CL} , czyli u/σ , jest jednak znacznie wolniejsza niż w przypadku stałego obciążenia (badania IL). W testach typu CL dopiero po długim czasie badania udział ciśnienia porowego w przenoszeniu obciążeń jest tak znikomy, że grunt zaczyna się zachowywać jak pod obciążeniem typu IL.

Na przebieg konsolidacji gruntu i kształtowanie się rozkładu u/σ w badaniach CL istotny wpływ mają:

- przyjęty program prędkości przyrostu obciążenia;
- stopień wilgotności gruntu;
- przepuszczalność gruntu;
- zaburzenia strukturalne.

Wartości ciśnienia porowego w znacznym stopniu zależą od zastosowanej prędkości przyrostu obciążenia. Podczas stosowania większych prędkości przyrostu naprężenia $\Delta\sigma/\Delta t$, wartości ciśnienia porowego u oraz parametru C_{CL} są odpowiednio większe, a osiągnięcie fazy ustalonej następuje przy wyższych naprężeniach σ (ryc. 2). Jeżeli prędkość przyrostu obciążenia będzie bardzo mała, to rozkład ciśnienia porowego wody może być bardzo podobny do rozkładu w warunkach stałego obciążenia.

Teoria Terzagiego i model Kelvina są wyprowadzone dla przypadku pełnego nasycenia fazą ciekłą przestrzeni porowej. Gdy grunt nie jest w pełni nasycony, układ jest trójfazowy, a w toku badania możemy wyróżnić dwa etapy:

- etap związany z nieustalonym przebiegiem procesu; odnotowuje się tu także nie w pełni zgodny z rozwiązaniami teoretycznymi udział wody w przenoszeniu naprężenia;
- etap właściwy — o ustalonym przebiegu procesu konsolidacji i w dużym stopniu zgodny z teoretycznymi oczekiwaniami.

Doświadczalne charakterystyki konsolidacyjne

Do analizowanych w niniejszym artykule badań wykorzystano różne litologicznie i genetycznie grunty, pochodzące z rowu Kleszczowa i pobrane z wyrobiska KWB *Bełchatów*. Badano grunty neogeńskie — beidelitowe iły zielone i iły nadwęglowe — i plejstoceny — zastoiskowe osady warwowe (iły pylaste i pyły) oraz gliny zlodowacenia warty (tab. 1).

Tab. 1. Parametry fizyczne badanych gruntów

Table 1. Physical parameters of examined soils

| Nazwa gruntu <i>Name of soil</i> | Wiek <i>Age</i> | Wilgotność początkowa <i>Initial water content</i> [%] | Gęstość objętościowa <i>Bulk density</i> [Mg/m ³] | Gęstość właściwa <i>Density</i> [Mg/m ³] | Wskaźnik porowatości początkowy <i>Initial void ratio</i> e_0 [-] | Badania CL <i>CL tests</i> |
|---|----------------------------------|--|---|--|---|-------------------------------|
| Gлина zlod. Warty <i>Wartanian glacial tills</i> | plejstocen <i>Pleistocene</i> | 11,8 ÷ 13,1 | 2,19 ÷ 2,25 | 2,68 ÷ 2,71 | 0,34 ÷ 0,39 | 6 |
| Osady warwowe <i>Varved sediment</i> | plejstocen <i>Pleistocene</i> | 17,0 ÷ 22,8 | 1,90 ÷ 2,04 | 2,66* | 0,60* | 8 |
| Il zielony <i>Green clay</i> | pliocen <i>Pliocene</i> | 12,3 ÷ 21,2 | 1,99 ÷ 2,21 | 2,67 ÷ 2,74 | 0,42 ÷ 0,63 | 29 |
| Il nadwęglowy <i>Overcoal clay</i> | miocen <i>Miocene</i> | 32,3 ÷ 40,8 | 1,57 ÷ 1,80 | 2,59 ÷ 2,65 | 0,97 ÷ 1,22 | 9 |

Badania zostały wykonane w dwóch różnych aparatach konsolidacyjnych: konsolidometrze Rowe'a (3 próbki) oraz w konsolidometrze niskociśnieniowym (49 próbek). Przeprowadzono je ze stałą prędkością przyrostu obciążenia. W badaniach wykonanych w konsolidometrze niskociśnieniowym prędkość obciążania była determinowana przez alternatywne prędkości ruchu zespołu napędzającego aparat trójosiowego ściskania (1,6; 2,4; 4,8 mm/h). Zastosowanie systemu obciążenia tego aparatu nie pozwala na uzyskanie w pełni stałej prędkości przyrostu naprężenia lub odkształcenia, lecz wielkości te są wzajemnie ze sobą powiązane i uzależnione od typu odkształcalności badanego gruntu.

Wyniki badań wskazują na różnorodne typy i przyczyny niezgodności zachowań gruntu z teorią. Doświadczalne rozkłady odbiegają od teorii w dwóch podstawowych aspektach. Po pierwsze w żadnym z przeprowadzonych badań maksymalne wartości C_{CL} nie osiągają 1, a po drugie w wielu przypadkach nie występuje opisana w teorii tendencja spadkowa wartości C_{CL} w funkcji σ .

Z uwagi na to, że w trakcie badania ciśnienie porowe w gruncie jest niezgodne z modelem teoretycznym, P. Dobak (1999) wyróżnił cztery typy rozkładu C_{CL} w zależności od σ :

- QT (quasi-teoretyczny) — najbardziej zbliżony kształtem do teoretycznego rozkładu; wykazuje na początku badania największe wartości C_{CL} , po czym ulegają one obniżeniu. Rozbieżności w stosunku do modelowych rozwiązań teoretycznych polegają na uzyskaniu wartości $C_{CL\max} < 1$;
- PT (quasi-teoretyczny z przesunięciem maksimum) — najwyższa wartość C_{CL} nie występuje na początku badania, lecz jest osiągana po pewnym czasie, który w niniejszym artykule określa się jako czas reakcji;
- NZ (nieregularny, zmienny) — charakteryzuje się na przemian przyrostami i spadkami parametru C_{CL} ;
- CR (rosnący w sposób ciągły) — wartość C_{CL} wzrasta wraz z naprężeniem konsolidacyjnym, bez osiągnięcia wyraźnego maksimum i późniejszego spadku.

W przeprowadzonych badaniach konsolidacyjnych zaobserwowano trzy z wyróżnionych wyżej typów rozkładów ciśnienia porowego: PT, NZ i CR.

Typ PT występował najczęściej. W rozkładzie tym wartości parametru C_{CL} wolno wzrastają i dopiero po pewnym czasie osiągają maksimum, by następnie, zgodnie już z rozwiązaniami teoretycznymi, stopniowo zmniejszać się. Opóźnione osiągnięcie wartości $C_{CL\max}$ związane jest z przede wszystkim z początkowym, niepełnym nasyceniem przestrzeni porowej wodą. Pod wpływem rosnącego obciążenia zmniejsza się porowatość, a zwiększa objętościowy udział

→

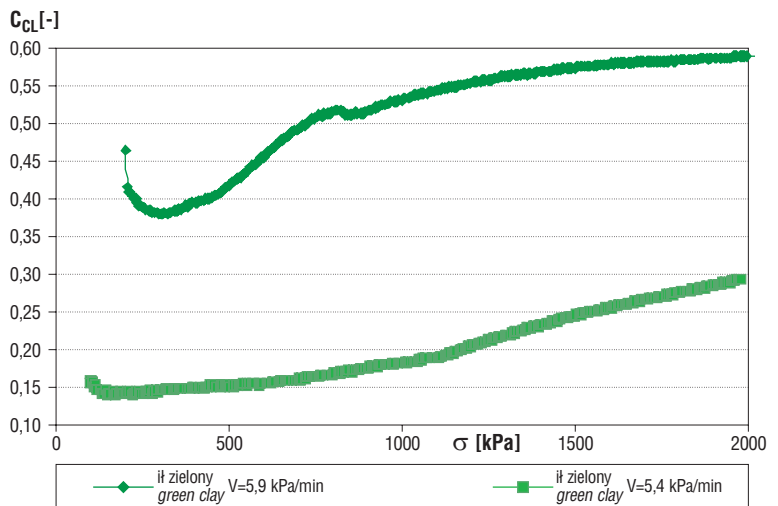
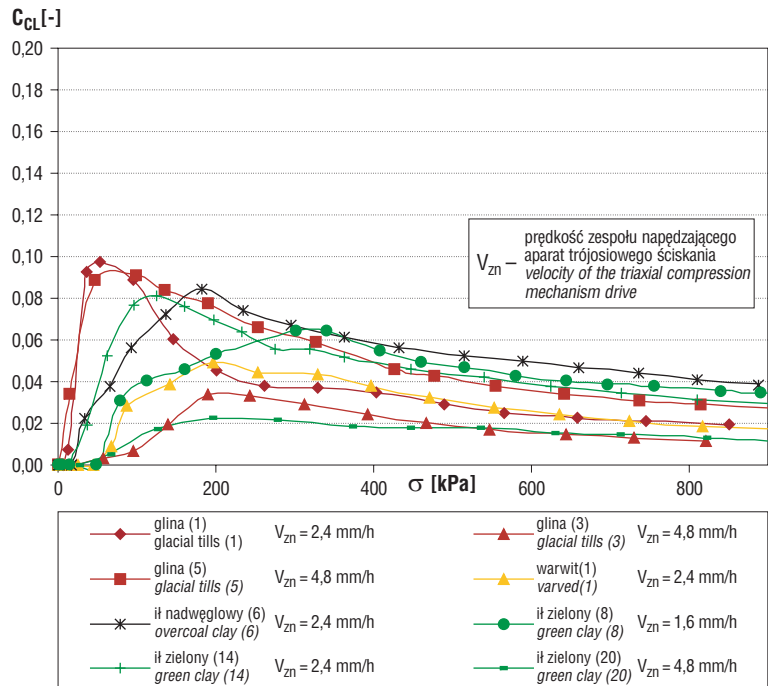
Ryc. 3. Rozkład C_{CL} typu PT
Fig. 3. C_{CL} distribution — type PT

wody w przestrzeni porowej. W ten sposób osiągnięty jest stan quasi-nasylenia, któremu odpowiada wartość $C_{CL\ max}$. W tych warunkach udział szkieletu gruntowego w przenoszeniu obciążeń jest już jednak duży i wartości $C_{CL\ max}$ są znacznie mniejsze od 1. Osiąganie $C_{CL\ max}$ następuje w rozkładach typu PT po pewnym czasie i przesunięcie to może być określane jako czas reakcji, który może być wyrażony zarówno w wartościach czasu lub skorelowanych z nimi wartościach naprężenia. Czas reakcji jest więc czasem potrzebnym do nasylenia porów fazą ciekłą na skutek zmniejszenia się ich objętości i wyparcia fazy gazowej. Czas reakcji nie zawsze zależy wprost od zastosowanej prędkości przyrostu obciążenia, chociaż na ogół przy wysokich prędkościach mobilizacja ciśnienia porowego jest szybsza. Typ rozkładu PT po osiągnięciu $C_{CL\ max}$ w dalszym przebiegu badania zachowuje się w sposób bardzo zbliżony do teoretycznego rozkładu przedstawiającego filtracyjny model procesu. Rozkład PT przedstawia więc proces podobny do modelowego (ryc. 3). W zbliżonych genetycznie i litologicznie gruntach, przy zastosowaniu podobnej prędkości przyrostu naprężenia, początkowy udział fazy ciekłej w przenoszeniu obciążeń jest różny zarówno pod względem wielkości, jak i czasu reakcji. Wskazuje to na dużą rolę czynnika losowego, przede wszystkim niejednorodnego stanu nasylenia gruntu.

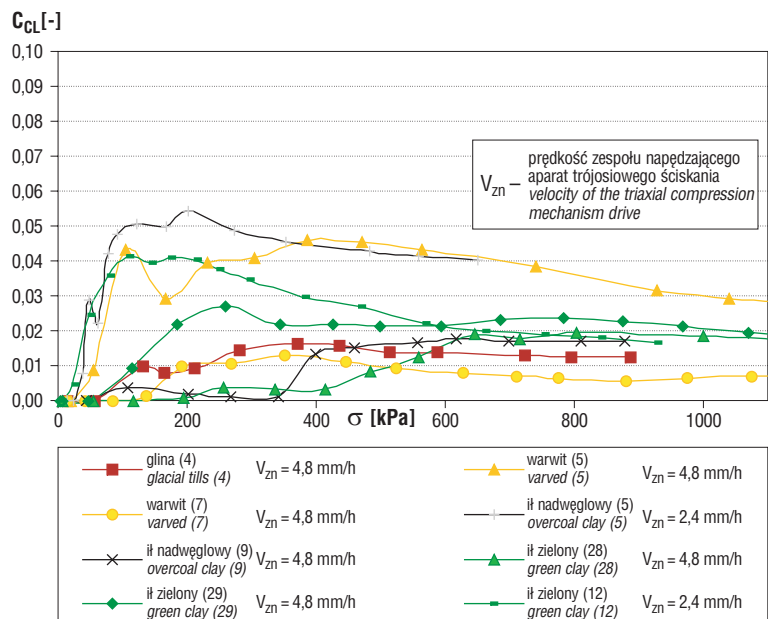
Rozkład typu CR (ryc. 4) charakteryzuje w toku badania zwiększanie udziału fazy ciekłej w przenoszeniu obciążeń kosztem spadku udziału szkieletu. Ten typ rozkładu wystąpił w badaniach w dwóch próbkach badanych w konsolidometrze Rowe'a. Pierwsza z tych próbek (obciążana z prędkością $V = 5,9$ kPa/min.) była nasycona metodą *back pressure*, druga zaś była badana bez nasylenia. W drugiej próbce (obciążanej z prędkością $V = 5,4$ kPa/min.) podczas umieszczania jej w konsolidometrze ujawniły się mikroszczeliny, którymi wypływała woda, a po zakończeniu badania powtórnie ujawniły się one w trakcie wysychania próbki. Podczas konsolidacji spękania te najpierw stanowiły uprzywilejowaną drogę filtracji (wówczas wartości współczynnika filtracji k rosły), a następnie były zaciskane (najprawdopodobniej w wyniku rosnącego obciążenia), co powodowało spadek przepuszczalności. Ten efekt strukturalny warunkował ciągły przyrost ciśnienia porowego, odwzorowujący się wzrostem parametru C_{CL} (rozkład CR).

→

Ryc. 5. Rozkład C_{CL} typu NZ^a
Fig. 5. C_{CL} distribution — type NZ^a



Ryc. 4. Rozkład C_{CL} typu CR
Fig. 4. C_{CL} distribution — type CR



W świetle uzyskanych wyników badań rozkład typu NZ można podzielić na dwa podtypy. W podtypie a (ryc. 5) możemy zauważyć wyraźne maksima i minima. Po osiągnięciu jednego z maksimów wykres C_{CL} na ogół zaczyna spadać. Podtyp b (ryc. 6) charakteryzuje się w fazie ustalonej badania quasi-liniowym przebiegiem wykresu, co świadczy o prawie stałym udziale fazy ciekłej w przenoszeniu naprężeń.

Z przedstawionych wyżej analiz wynika, że kształtowanie się rozkładów ciśnienia porowego zależy przede wszystkim od stanu nasycenia gruntu i jego właściwości strukturalnych.

Rozkłady typu

- PT występują przy niepełnym nasyceniu wodą gruntu i jednorodnej strukturze;
- NZ związane są z niepełnym nasyceniem i niejednorodną strukturą;
- CR wskazują na znaczące ograniczenie przepuszczalności gruntu (dużą zawartość frakcji ilowej i możliwość występowania zjawiska kontrakcji — dławienia przepływu).

Ocena zaawansowania konsolidacji

Wyniki badań zostały przedstawione na wykresach jako zależności C_{CL} od σ (ryc. 3–6) oraz od tc_v/H^2 (ryc. 7–9; na ryc. 8 widoczny jest pewien rozrzut wyników, wynikający z czułości aparatury). Analiza tych zależności pozwala na ocenę zgodności zachowania się ośrodka gruntowego z teorią. Przedstawienie zmienności C_{CL} w funkcji tc_v/H^2 pozwala w łatwy sposób ocenić zaawansowanie procesu konsolidacji z uwzględnieniem dwóch wymienionych wyżej kryteriów ($tc_v/H^2 > 2$; $C_{CL} < 0,24$).

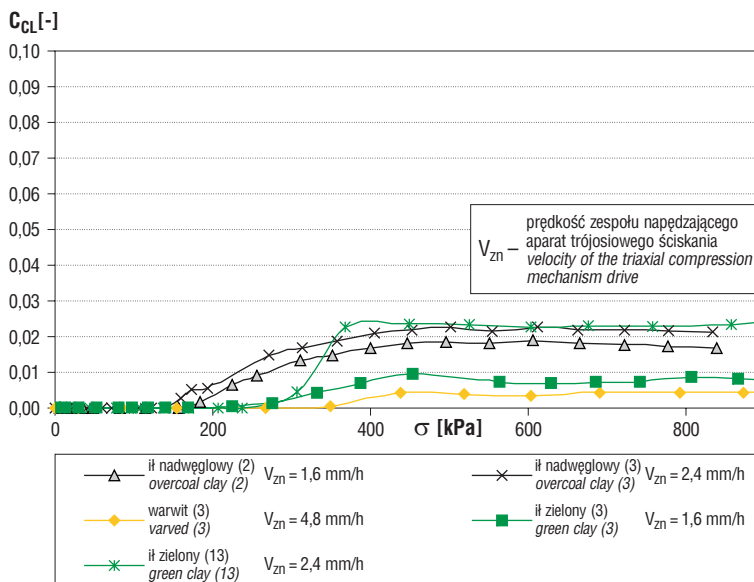
W badaniach przeprowadzonych w konsolidometrze niskociśnieniowym przeważnie przekraczano progowe kryterium fazy ustalonej: $tc_v/H^2 > 2$. Przy przyjętych prędkościach przyrostu obciążenia uzyskiwano w toku badań efekty recesji zaawansowania procesu konsolidacji, związane z intensywnym zmniejszeniem się porowatości i przepuszczalności gruntu przy jednoczesnym silnym wzroście wartości ciśnienia porowego. Występowanie tego zjawiska sygnalizuje wykres zależności C_{CL} od tc_v/H^2 , gdzie wartości argumentu cofają się. Przebieg tego zjawiska w zależności od typu rozkładu pokazano na rysunkach 7 i 9.

Pojęcie recesji zaawansowania konsolidacji CL wynika bezpośrednio z modelowych teoretycznych rozwiązań procesu (Dobak, 1999). W przypadku, gdy przepuszczalność ośrodka gruntowego zmniejsza się tylko nieznacznie,

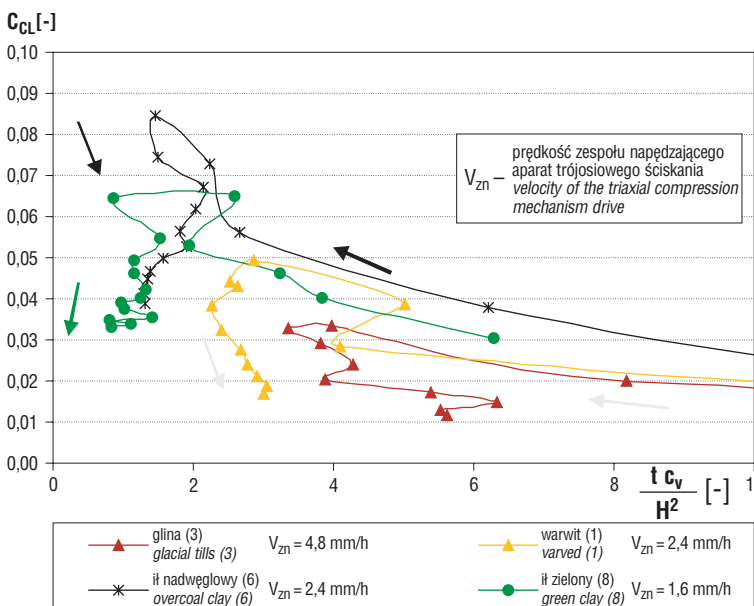


Ryc. 8. Doświadczalna charakterystyka przebiegu procesu konsolidacji na wybranych przykładach rozkładu typu CR

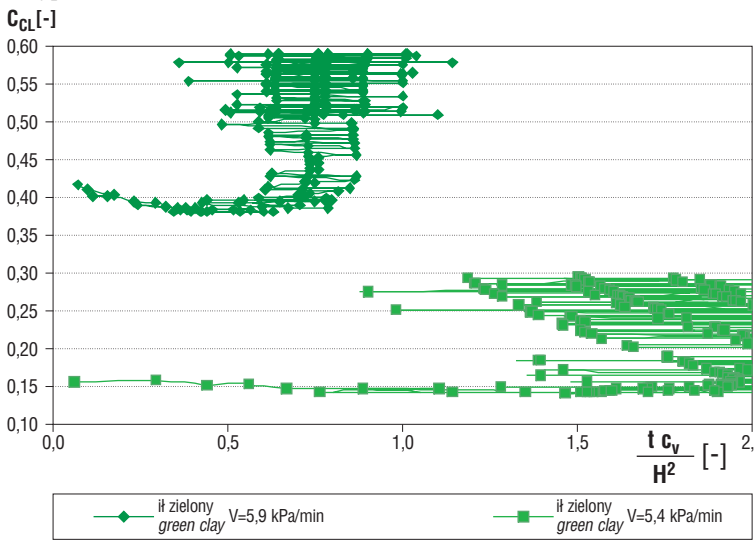
Fig. 8. Experimental characteristic of consolidation process in selected samples of type CR distribution



Ryc. 6. Rozkład C_{CL} typu NZ^b
Fig. 6. C_{CL} distribution — type NZ^b



Ryc. 7. Doświadczalna charakterystyka przebiegu procesu konsolidacji na wybranych przykładach rozkładu typu PT
Fig. 7. Experimental characteristic of consolidation process in selected samples of type PT distribution



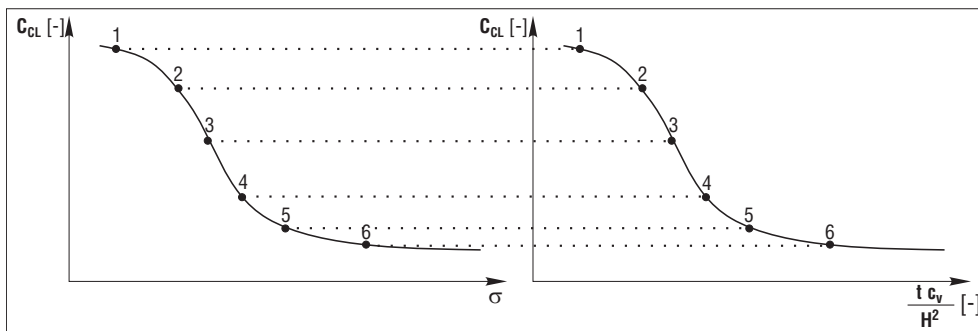
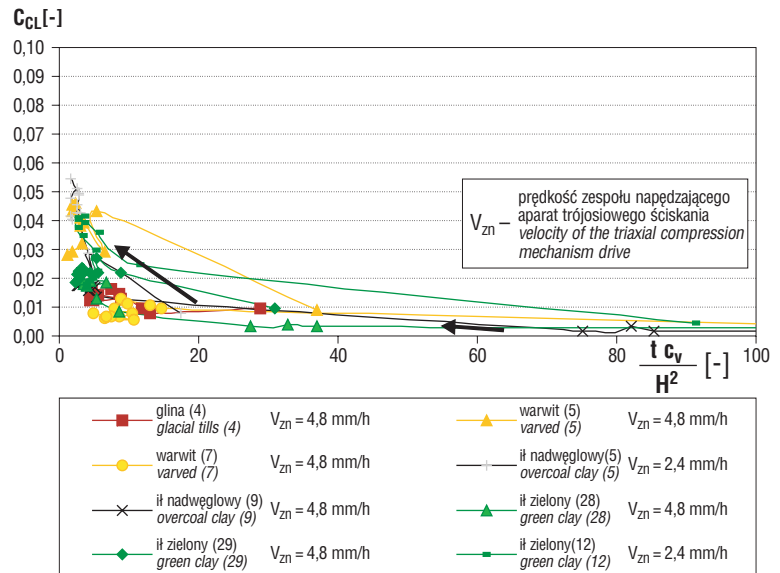
→

Ryc. 9. Doświadczalna charakterystyka przebiegu procesu konsolidacji na wybranych przykładach rozkładu typu NZ^a

Ryc. 9. Experimental characteristic of consolidation process in selected samples of type NZ^a distribution

uzyskuje się modelowe rozkłady C_{CL} w zależności od σ oraz od tc_v/H^2 (ryc. 10).

Natomiast, gdy przepuszczalność gruntu w toku konsolidacji szybko zmniejsza się lub (i) prędkość przyrostu obciążenia jest znaczna, może wystąpić okresowe zmniejszanie wartości parametru tc_v/H^2 . Wskazuje to na istotne, chociaż chwilowe, ograniczenie przepuszczalności ośrodka gruntowego. Efekty te często występują przy stosowaniu dużych prędkości obciążenia,



←

Ryc. 10. Modelowe rozkłady C_{CL} w zależności od σ oraz od tc_v/H^2

Fig. 10. Model $C_{CL}-\sigma$ and $C_{CL}-tc_v/H^2$ distributions

stąd w programowaniu badań powinno się dokonać analizy ścieżki prędkości obciążenia w dostosowaniu do istniejących warunków terenowych (Dobak, 1999, 2003).

Wnioski

1. Doświadczalne rozkłady ciśnienia porowego, uzyskiwane w badaniach konsolidometrycznych CL, odbiegają od rozwiązań teorii konsolidacji Terzagiego w dwóch podstawowych aspektach: $C_{CL \max}$ nie osiąga wartości 1 i nie zawsze występuje przewidziana w teorii tendencja spadku wartości C_{CL} w funkcji σ . Pierwszą z niezgodności należy wiązać z faktem, że badane grunty były ośrodkami trójfazowymi, a więc miały stopień nasycenia S_r mniejszy od 1. Drugą przyczyną niezgodności doświadczalnych rozkładów z teorią leży w pogarszaniu warunków rozpraszania ciśnienia porowego w czasie badania konsolidacji.

2. Rejestrowanie niezgodności zachowania się gruntu z rozwiązaniami teoretycznymi Terzagiego wynikają przede wszystkim z trójfazowości ośrodka oraz zmian jego przepuszczalności, na co duży wpływ ma system wymuszenia obciążenia i przyrost jego prędkości.

3. Analiza zależności C_{CL} od σ i od tc_v/H^2 pozwala ocenić typ procesu konsolidacji w warunkach ciągłego obciążenia przy zmniejszającej się przepuszczalności ośrodka. Zjawisko recesji procesu ilustruje sytuację, w której prędkość przyrostu obciążenia jest większa niż możliwość rozproszenia ciśnienia porowego.

4. Właściwy dobór metody badania polega na uwzględnieniu ścieżki prędkości obciążania. Jeżeli spodziewamy się małych prędkości przyrostu naprężenia w maszywie, to trzeba stosować odpowiednio zredukowane prędkości przyrostu naprężenia w badaniach laboratoryjnych. Pozwoli to uniknąć efektów zjawiska recesji. Badania są wówczas zbliżone do systemu obciążenia IL.

Literatura

- CZARNECKI L. 2000 — Formowanie skarpy zboczy transportowych w utworach zastoiskowych, w świetle badań geologiczno-inżynierskich w KWB *Belchatów*, Archiwum KWB *Belchatów*.
- DOBĄK P. 1999 — Rola czynnika filtracyjnego w badaniach jednoosiowej konsolidacji gruntów. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- DOBĄK P. 2000a — Metody oceny miarodajności parametrów jednoosiowej konsolidacji wyznaczanych w badaniach laboratoryjnych. Mat. XII Konf. Nauk., Korbiewów, 20–30.
- DOBĄK P. 2000b — Kryteria zgodności przebiegu badań IL oraz CL z teorią konsolidacji filtracyjnej. Mat. Sesji Nauk. *Geotechnika w budownictwie i inżynierii środowiska*, Gdańsk, 237–244.
- DOBĄK P. 2003 — Loading velocity in consolidation analysis. *Geol. Quart.*, 47: 13–20.
- GLAZER Z. & DOBĄK P. 1979 — Określanie wartości edometrycznego modułu ściśliwości ogólnej z badań prowadzonych ze stałą prędkością odkształcenia. *Prz. Geol.*, 28: 618–623.
- JANBU N., TOKHEIM O. & SENNESET K. 1980 — Consolidation tests with continous loading. *Norwegian Geotech. Inst. Publ.*, 9.
- LAMBE T.W. & WHITMAN R.V. 1969 — *Soil mechanics*. MIT. J. Wiley and Sons, Inc. New York-London-Sydney-Toronto.
- WISSA A.E.Z., CHRISTIAN J.T., DAVIS E.H. & HEIBERG S. 1969 — Consolidation under constant rate of strain. *J. Soil Mech. Fund. Div.*, 97 (SM2).
- VU CAO MINH 1976 — Jednoosiowa konsolidacja gruntów z uwzględnieniem pełzania. *Arch. Wyd. Geologii UW*, nr D152.