Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 4 (50), 2010: 24–35
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 4 (50), 2010)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 4 (50), 2010: 24–35
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 4 (50), 2010)

Edyta MALINOWSKA, Katarzyna GABRYŚ

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

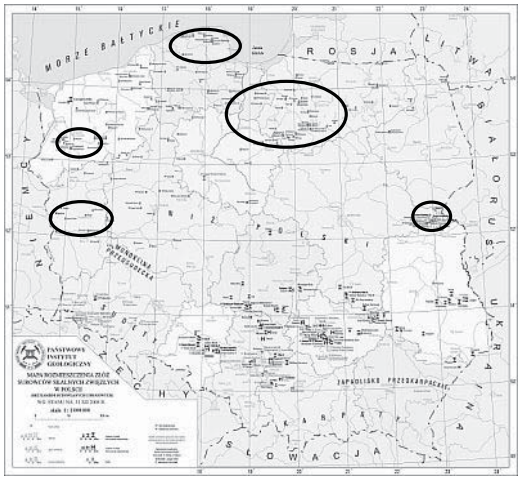
Parametry odkształceniowe i filtracyjne kredy jeziornej z obszaru Mazur
Strain and filtration parameters of lacustrine chalk from Mazury District

Słowa kluczowe: odkształcenie, kreda jeziorna, badania edometryczne
Key words: strain, lacustrine chalk, oedometer test

Określenie zmian parametrów odkształceniowych i filtracyjnych kredy jeziornej, inaczej też nazwanej wapieniem jeziornym, jest szczególnie trudne ze względu na specyfikę pochodzenia oraz właściwości fizyczne i mechaniczne tych młodych osadów postglacjalnych. Zarówno kreda jeziorna, jak i gytie zaliczane są do węglanowych osadów organicznych, które dość powszechnie występują w północnej Polsce, na Pojezierzu Środkowym i Mazurach (rys. 1).

Z każdym rokiem wzrasta zainteresowanie problematyką gruntów organicznych ze względu na ich przydatność w różnych dziedzinach gospodarki. Ze względu na fakt, iż coraz częściej zmuszani jesteśmy do wykorzystywania naturalnych zasobów kraju, istniejące torfowiska oraz inne osady organiczne dzięki różnym technikom wzmacniania gruntów słabonośnych mogą być wykorzystywane pod budowę obiektów inżynierskich.

Niektóre inwestycje związane z kształtowaniem środowiska przyrodniczego na terenach podmokłych, organicznych wymuszają na inżynierach wykonanie wielu budowli wodno-melioracyjnych (obwałowania rzek, zapory ziemne zbiorników wodnych, małe budowle melioracyjne lub nasypy drogowe). Posadawianie tych budowli na słabonośnych gruntach organicznych stwarza istotne problemy inżynierskie z uwagi na ich mą wytrzymałość i dużą ściśliwość (Lechowicz 1992). Włókniste grunty organiczne, tj. torfy, charakteryzują się także dużą wilgotnością i anizotropią strukturalną, co wpływa na zmianę wartości współczynnika filtracji pio-



RYSUNEK 1. Lokalizacja głównych obszarów kredy jeziornej (Mapa rozmieszczenia... 2008)
FIGURE 1. The localization of main areas of lacustrine chalk

nowej i poziomej w zależności od stanu naprężenia gruntu poddanego obciążeniu (Malinowska 2006). Dlatego określenie parametrów odkształceniowych i filtracyjnych w procesie konsolidacji jest niezmiernie ważne.

Pochodzenie i właściwości fizyczne kredy jeziornej

Kreda jeziorna, w przeciwieństwie do kredy piszącej, powstaje w jeziorach, bagnach i podmokłych łąkach. Tworzy się wskutek chemicznego lub biochemicznego wytrącania węglanu wapnia w środowisku słodkowodnym, zubożonym w CO_2 (w cieplejszych wodach stojących lub w wodach obfitych w fitoplankton i roślinność wodną, która pochłania CO_2 z wody) – Żurek-Pysz (2007).

Kreda jeziorna w stanie suchym rozciera się w palcach na biały proszek. Jest porowata i lekka. Burzy się z kwasem solnym.

Kreda jeziorna jest jedną z odmian litologicznych holoceńskich osadów wapiennych. Osad jest żelem, zawierającym przeciętnie 55–60% wody, mikrokrystaliczny kalcyt i różne substancje organiczne – fito- i zoogeniczne. Zawiera też detrytyczny kwarc, krzemionkę okrzemek i – rzadko – minerały ilaste (Żurek-Pysz 2007).

Właściwości fizyczne kredy jeziornej pobranej z poligonu doświadczalnego, znajdującego się na Warmii i Mazurach, na Łąkach Dymerskich (gmina Dźwierzuty oraz Biskupiec) przedstawione są w tabeli 1. Głębokość pobrania próbek: 0,8–1,0 m.

Grunty te są bardzo wrażliwe na naruszenie struktury, a więc także na zadawanie dużych obciążeń zewnętrznych.

Niestabilność substancji organicznej, zachodzące w niej przeobrażenia, powstające nowe związki, oddziałujące na pierwotnie zdeponowane składniki kredy jeziornej, to prawdopodobnie przyczyna nietrwałości podstawowego elementu konstrukcyjnego osadu. Substancja

TABELA 1. Właściwości fizyczne kredy jeziornej z obszaru Mazur
TABEL 1. Phisical properties of lacustrine chalk from Mazury District

Właściwości /Properties	Symbol Symbol	Jednostka Unit	Kreda jeziorna Lacustrine chalk
Wilgotność / Water content	w	%	150–300
Gęstość objętościowa / Bulk density	ρ	$g \cdot cm^{-3}$	1,05–1,30
Gęstość objętościowa szkieletu / Dry density	ρ_d	$g \cdot cm^{-3}$	0,29–0,44
Gęstość właściwa / Particle density	ρ_s	$g \cdot cm^{-3}$	2,66

organiczna, która jest głównym po wodzie składnikiem fazy płynnej w postaci różnego typu kwasów humusowych oraz koloidalnych składników, będącej w fazie przemian materii organicznej, jest elementem najbardziej aktywnym, niestabilnym, stwarzającym warunki „niezrównoważone", decydujące o dynamice procesów w osadzie (Myślińska 2001, 2004, Żurek-Pysz 2002).

Metodyka badań parametrów odkształceniowych

W celu określenia parametrów odkształceniowych i filtracyjnych kredy jeziornej przeprowadzono laboratoryjne badania edometryczne.

Próbki do badań laboratoryjnych zostały pobrane za pomocą próbników metodą wciskaną. Uzyskano próbki blokowe, tzw. block samples, o wymiarach 50 × 50 cm, z głębokości 1 m. Przy poborze próbek niezwykle istotna jest możliwość replikacji warunków *in situ* (Młynarek 2007).

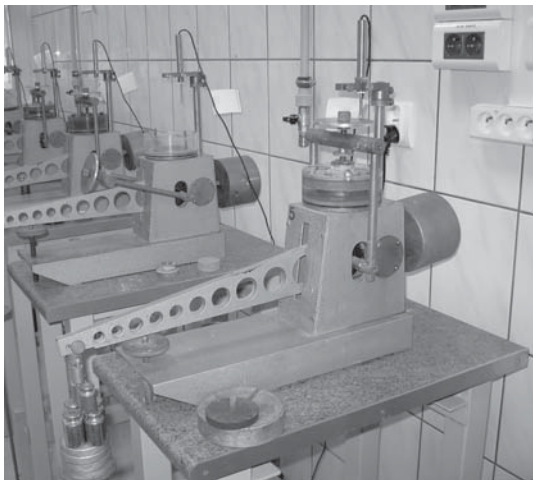
Przed rozpoczęciem właściwej części badań edometrycznych próbki były rekonsolidowane do σ'_v.

Badania zostały wykonane w standardowych aparatach (rys. 2), służących do pomiaru charakterystyk odkształceniowych w jednoosiowym oraz płaskim stanie odkształcenia. Zakres badań obejmował: standardowe badania edometryczne (IL) oraz badania CRL. Badania edometryczne służą przede wszystkim do wyznaczania parametrów odkształceniowych i konsolidacyjnych, takich jak: edometryczny moduł ściśliwości (M), który jest odwrotnością współczynnika zmian objętościowych (m_v), wskaźnik ściśliwości pierwotnej (C_c), wskaźnik ściśliwości wtórnej (C_r), współczynnik filtracji (k), współczynnik wtórnej konsolidacji (C_α).

Ze względu na dostępność aparatury laboratoryjnej badania typu IL są często stosowane jako podstawowe i jedyne w laboratoriach usługowych.

Standardowe badanie IL polega na tym, że każdy przyrost obciążenia równy jest aktualnemu obciążeniu, a kolejne przyrosty obciążenia przykładane są co 24 godziny. W celu uzyskania większej liczby punktów na krzywej naprężenie – odkształcenie w badaniach IL można stosować mniejsze przyrosty obciążenia. Ponadto w celu skrócenia czasu trwania badania można zmieniać obciążenie próbek po zakończeniu pierwotnej konsolidacji.

Metoda zaproponowana przez Bjerruma (1972) opiera się na zredukowanych przyrostach obciążenia aż do mo-



RYSUNEK 2. Standardowy edometr mechaniczny
FIGURE 2. Standard mechanical oedometer

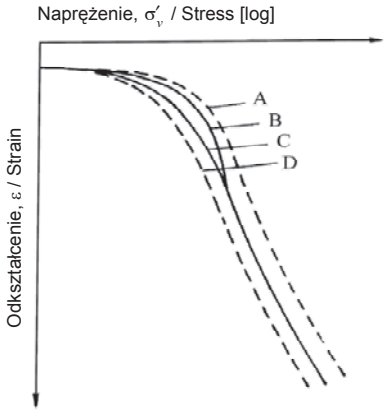
mentu osiągnięcia naprężenia prekonsolidacji. Czas między kolejnymi przyrostami obciążeń jest na tyle długi, że zapewnia osiągnięcie 100% pierwotnej konsolidacji. Po przekroczeniu naprężenia prekonsolidacji badania prowadzi się ze zwiększanymi dwukrotnie przyrostami obciążenia przez 24 godziny.

Uwzględniając wymienione wyżej zasady, można stwierdzić, że badania edometryczne typu IL mogą być przeprowadzane zgodnie z metodą Terzaghiego w celu określenia parametrów odkształceniowych i konsolidacyjnych lub według metody Bjerruma dla określenia naprężenia prekonsolidacji (rys. 3).

Wyniki badań edometrycznych IL przedstawiane są zwykle w postaci zależności między wskaźnikiem porowatości lub odkształceniem a efektywnym naprężeniem pionowym.

Standardowe badania IL, w których stosuje się wzrastające przyrosty obciążenia, wymagają długiego okresu obserwacji (2 tygodnie lub więcej). Potrzeba skrócenia badań przyczyniła się do rozwoju badań edometrycznych typu CL, wykonywanych jako:

– CRS, stała prędkość odkształcenia (Smith i Wahls 1969),
– CRL, stała prędkość obciążenia (Aboshi i in. 1970),



RYSUNEK 3. Krzywe ściśliwości: A – badanie IL z podwajaniem obciążenia w krótkim czasie, B – metoda Bjerruma, C – metoda standardowa, D – małe stopniowe obciążania w długim czasie
FIGURE 3. Oedometer test results: A – IL type with double stress in a very short time, B – Bjerrum metod, C – standard metod, D – IL type with adding little stress in a very long time

– CG, stały gradient (Lowe i in. 1969),
– CC, badanie stałej konsolidacji (Tokheim i Janbu 1980).

Główna zaleta tych badań polega na uzyskaniu ciągłych zależności naprężenie – odkształcenie i ciągłej zależności parametrów konsolidacyjnych w zależności od naprężenia efektywnego.

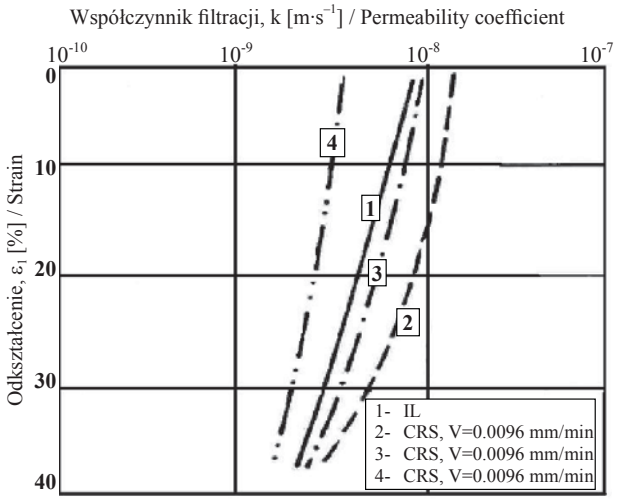
Analiza wyników badań edometrycznych dla gruntów słabych, przeprowadzona przez Szymańskiego i Lechowicza (1987), wskazuje mało znaczące różnice w krzywych ściśliwości i w zmienności parametrów konsolidacyjnych z badań typu IL i CL (rys. 4).

Pomimo że z badań edometrycznych typu CL nie uzyskuje się parametrów ściśliwości wtórnej dla celów analizy odkształceń gruntów organicznych, są one powszechnie stosowane w laboratoriach usługowych ze względu na wiele zalet. Przede wszystkim nie zajmują dużo czasu (6–48 godzin badanie CL, 3–10 dni badanie IL), umożliwiają lepsze zdefiniowanie naprężenia prekonsolidacji (σ_p') oraz określenie wpływu struktury gruntu i przyrostu odkształceń na jednowymiarową ściśliwość gruntu. Dodatkowo z badań tych można bezpośrednio uzyskać dane o zmianach przepuszczalności gruntu.

W celu określenia parametrów filtracyjnych niezbędna jest znajomość współczynnika konsolidacji, który jest ściśle związany z procesem konsolidacji, czyli zjawiskiem zmian objętościowych gruntu, jego odkształceń zachodzących w wyniku wypierania wody z porów pod wpływem przyłożonego obciążenia:

$$c_v = \frac{kM}{\gamma_w} [\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1}] \qquad (1)$$

gdzie:
k – współczynnik filtracji,
M – edometryczny moduł ściśliwości,
γ_w – ciężar objętościowy wody.



RYSUNEK 4. Wpływ metody badania na wartość współczynnika filtracji torfu (Szymański i Lechowicz 1987)
FIGURE 4. The test results for peat for different oedometer tests

Wyniki badań laboratoryjnych kredy jeziornej

Na podstawie wyników laboratoryjnych badań edometrycznych wykonanych w Katedrze Geoinżynierii SGGW w Warszawie opracowano zależności, określające zmiany parametrów odkształceniowych i filtracyjnych kredy jeziornej z okolic Olsztyna.

Zależność między odkształceniem a pionowym naprężeniem efektywnym (rys. 5) pozwala na określenie wartości modułu ściśliwości w funkcji tego naprężenia (rys. 6):

$$M = \Delta\sigma' \frac{H_2}{\Delta H_2} \quad \text{[kPa]} \qquad (2)$$

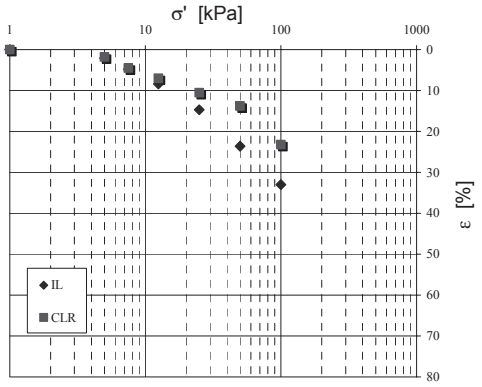
gdzie:
$\Delta\sigma'$ – przyrost naprężeń efektywnych, przy $\sigma_u = 0$,
H_1, H_2 – wysokość próbki przed obciążeniem, odpowiednio przy obciążeniu pierwszym i wtórnym,
ΔH_1, ΔH_2 – odkształcenie próbki, odpowiednio przy obciążeniu pierwszym i wtórnym.

Na podstawie badań edometrycznych ściśliwości gruntu możliwe jest określenie współczynnika konsolidacji, który stosowany jest w obliczeniach przebiegu konsolidacji w czasie. Przykładowe wykresy krzywej konsolidacji dla efektywnych naprężeń pionowych równych odpowiednio 7,5 i 12,5 przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

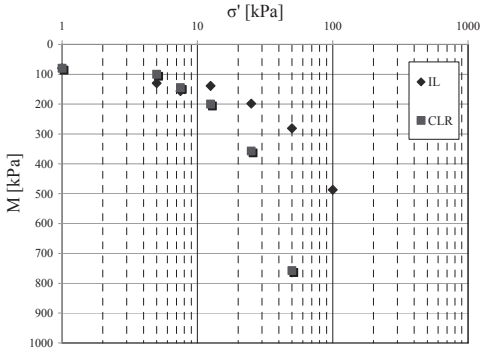
Następnie możliwe było określenie zależności współczynnika konsolidacji od wartości pionowego naprężenia efektywnego (rys. 9).

Do dalszej analizy wykorzystano tylko wyniki badań wykonane metodą IL, gdyż badanie typu CLR zostało przerwane ze względów technicznych przy wartości pionowego naprężenia efektywnego równego 50 kPa. W związku z powyższym nieznany jest cały obszar badawczy (rys. 10).

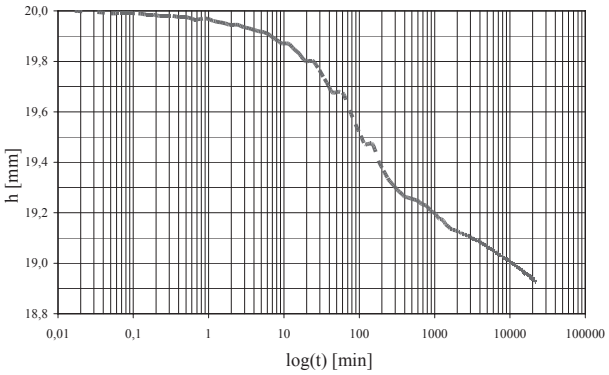
Na podstawie powyższych wyników badań określono zależność współczynnika filtracji w funkcji naprężenia (rys. 11) oraz w funkcji wskaźnika porowatości (rys. 12).



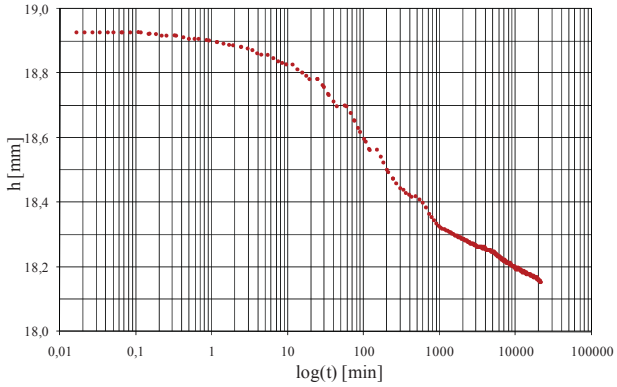
RYSUNEK 5. Zależność odkształcenia od pionowego naprężenia dla kredy jeziornej
FIGURE 5. Relationship between strain and vertical effective stress for lacustrine chalk



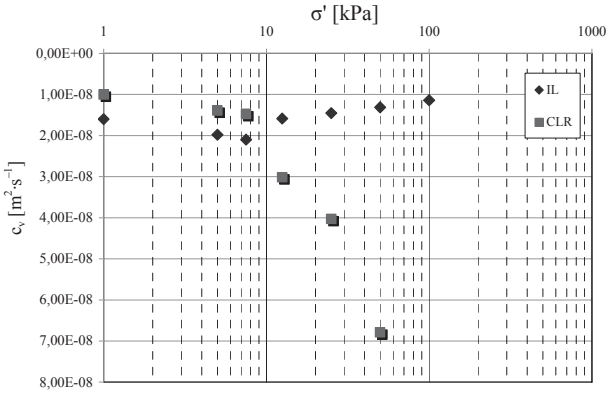
RYSUNEK 6. Zależność modułu ściśliwości od pionowego naprężenia efektywnego dla kredy jeziornej
FIGURE 6. Relationship between constrained modulus and vertical effective stress for lacustrine chalk



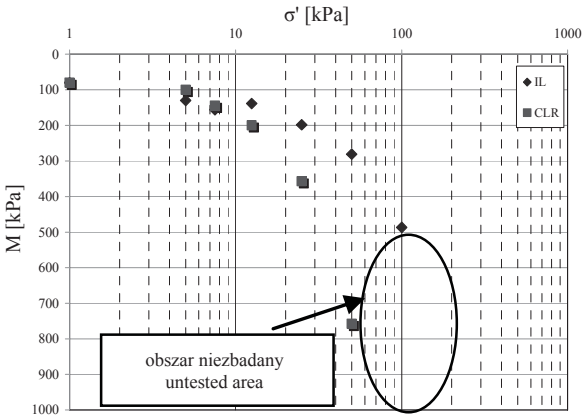
RYSUNEK 7. Krzywa konsolidacji dla kredy jeziornej przy obciążeniu równym 7,5 kPa
FIGURE 7. Consolidation curve for lacustrine chalk for loading 7.5 kPa



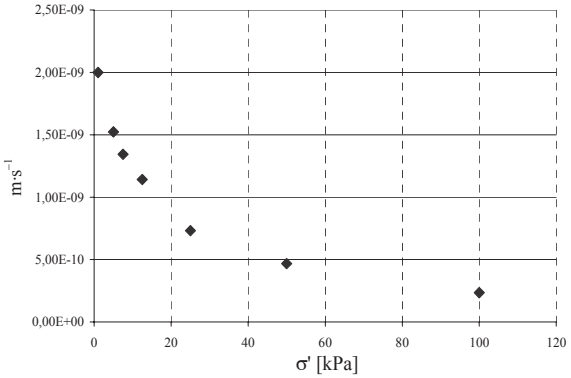
RYSUNEK 8. Krzywa konsolidacji dla kredy jeziornej przy obciążeniu równym 12,5 kPa
FIGURE 8. Consolidation curve for lacustrine chalk for loading 12.5 kPa



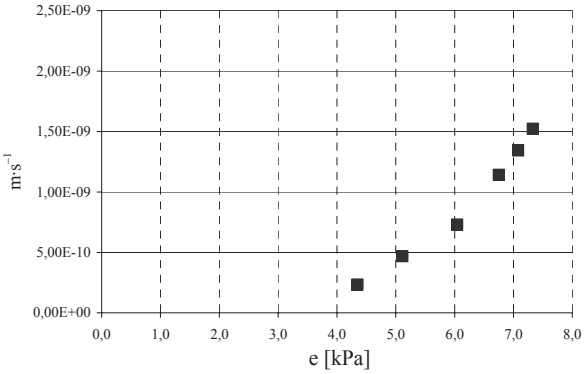
RYSUNEK 9. Zależność współczynnika konsolidacji od pionowego naprężenia efektywnego dla kredy jeziornej
FIGURE 9. Relationship between consolidation coefficient and vertical effective stress for lacustrine chalk



RYSUNEK 10. Zależność pionowego naprężenia efektywnego od modułu ściśliwości dla kredy jeziornej z niezbadanym obszarem
FIGURE 10. Relationship between vertical effective stress and constrained modulus for lacustrine chalk with untested area



RYSUNEK 11. Zależność współczynnika filtracji od pionowego naprężenia efektywnego dla kredy jeziornej
FIGURE 11. Relationship between filtration coefficient and vertical effective stress for lacustrine chalk



RYSUNEK 12. Zależność współczynnika filtracji od wskaźnika porowatości dla kredy jeziornej
FIGURE 12. Relationship between filtration coefficient and void ratio for lacustrine chalk

Analiza wyników badań laboratoryjnych kredy jeziornej

Określenie podstawowych parametrów odkształceniowych oraz filtracyjnych kredy jeziornej z obszaru Mazur pozwala na wyznaczenie zależności, które mogą prognozować zachowanie się tych słabonośnych gruntów pod obciążeniem – nasypami drogowymi czy wałami przeciwpowodziowymi.

Kreda jeziorna, podobnie jak torfy czy gytie, przez inżynierów jest zaliczana do gruntów słabonośnych, problematycznych. Niemniej jednak jej właściwości mechaniczne są różne od dużo bardziej odkształcalnych i zmiennych torfów.

Pomimo iż właściwości fizyczne kredy jeziornej z obszaru Mazur nie odbiegają znacząco od właściwości fizycznych torfów czy gytii, to jej parametry mechaniczne są znacznie lepsze.

Wartości odkształcenia dla kredy jeziornej nie przekraczają 33% przy pionowym naprężeniu efektywnym równym 100 kPa. Wartość modułu ściśliwości dla torfów jest mniejsza niż dla kredy jeziornej. Natomiast wartość współczynnika konsolidacji jest większa, co ma bezpośredni wpływ na wartość współczynnika filtracji.

Opracowane zależności pozwoliły na wyznaczenie równania konstytutywnego, opisującego zmianę współczynnika filtracji na skutek przyłożonego naprężenia pionowego, które w terenie może odzwierciedlać obciążenie nasypem budowli inżynierskich (rys. 13):

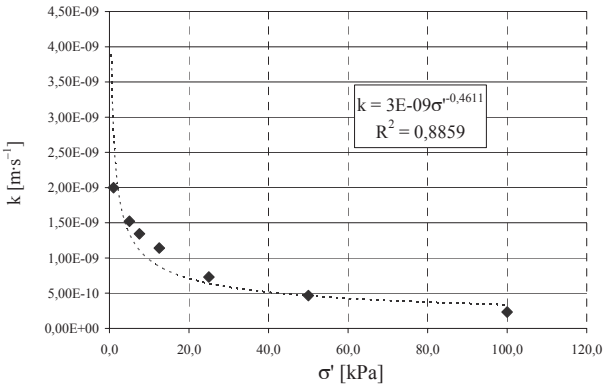
$$k = 3{,}0 \cdot 10^{-9} \cdot \sigma'^{-0{,}46}$$

gdzie:
k – parametr filtracyjny,
σ' – pionowe naprężenie efektywne.

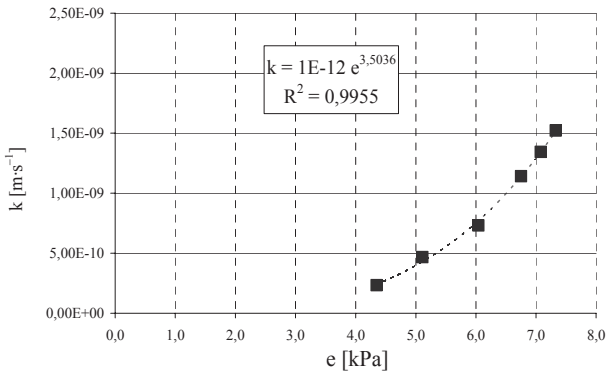
Zależność konstytutywną w postaci funkcji wyznaczono także dla współczynnika filtracji w zależności od wskaźnika porowatości (rys. 14):

$$k = 1{,}0 \cdot 10^{-12} \cdot e^{3{,}5}$$

gdzie:
k – parametr filtracyjny,
e – wskaźnik porowatości.



RYSUNEK 13. Zależność współczynnika filtracji od pionowego naprężenia efektywnego dla kredy jeziornej z równaniem konstytutywnym
FIGURE 13. Relationship between filtration coefficient and vertical effective stress for lacustrine chalk with the most correlated equation



RYSUNEK 14. Zależność współczynnika filtracji od wskaźnika porowatości dla kredy jeziornej z równaniem konstytutywnym
FIGURE 14. Relationship between filtration coefficient and void ratio for lacustrine chalk with the most correlated equation

Dla pierwszej zależności współczynnik korelacji R^2 = 0,98 przy funkcji logarytmicznej jest większy niż dla innych zależności konstytutywnych. Niemniej jednak nie jest znacząco większy niż dla funkcji potęgowej (R^2 = 0,89), ale jednocześnie jest on największy przy drugiej zależności (R^2 = 0,995). Dlatego w celu prognozy wpływu wartości obciążenia nasypem inżynierskim na parametr przepływu, jakim jest współczynnik filtracji, należy zastosować funkcję potęgową.

Wnioski

Kreda jeziorna z obszaru Mazur jest gruntem organicznym, zawierającym stosunkowo duże ilości wody. Podobnie jak w przypadku silnie odkształcalnych torfów początkowo duży wskaźnik porowatości maleje znacząco pod wpływem przyłożonego obciążenia, co przekłada się w krzywoliniową zależność współczynnika filtracji od wartości pionowego naprężenia efektywnego.

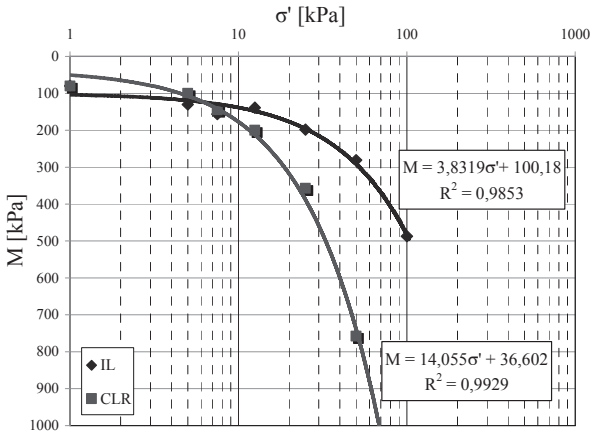
Pomimo iż właściwości fizyczne kredy jeziornej z obszaru Mazur nie odbiegają znacząco od właściwości fizycznych torfów czy gytii, to jej parametry mechaniczne są stosunkowo lepsze.

Wartość odkształcenia kredy jeziornej jest bardzo zmienna pod wpływem przyłożonego obciążenia (10–100 kPa) i waha się w zakresie od 5 do 35%.

Wartość modułu ściśliwości wynosi 500 kPa dla pionowego naprężenia efektywnego równego 100 kPa. Zależność modułu ściśliwości jest tym większa, im większe są naprężenia. Zmienność tego parametru najlepiej opisuje funkcja liniowa (rys. 15).

Wartość współczynnika konsolidacji dla kredy jeziornej jest mniejsza o jeden rząd wielkości, co wpływa na wielkość współczynnika filtracji. Zależność zarówno parametrów odkształceniowych, jak i filtracyjnych od wartości obciążenia budowlą inżynierską jest nielinowa i zmienna.

Parametr filtracyjny może być opisany przez zmianę współczynnika filtracji



RYSUNEK 15. Zależność modułu ściśliwości od pionowego naprężenia efektywnego dla kredy jeziornej wraz z równaniem konstytutywnym
FIGURE 15. Relationship between constrained modulus and vertical effective stress for lacustrine chalk with the most correlated equation

w zależności od wskaźnika porowatości i prognozowany za pomocą równania konstytutywnego w następującej postaci:

$$k = 1,0 \cdot 10^{-12} \cdot e^{3,5}$$

gdzie:
k – parametr filtracyjny,
e – wskaźnik porowatości.

Podobnie jak torfy i gytie, kreda jeziorna z obszaru Mazur jest gruntem słabonośnym, wykazującym zmienność i nielinowość parametrów odkształceniowych i filtracyjnych.

Literatura

ABOSHI H., YOSHIKUNI H., MARUYAMA S. 1970: Constant loading rate consolidation test. *Soils and Foundation* X, 1: 43–56.

BJERRUM L. 1972: Embankments on soft ground. Proceedings of the specialty conference on performance of earth and earth-supported structures. Lafayette, Indiana 2: 1–54.

LECHOWICZ Z. 1992: Ocena wzmocnienia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Rozpr. Nauk. i Monogr. 162, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

LECHOWICZ Z., SZYMAŃSKI A. 1984: Prediction of consolidation of organic soil. *Annals of Warsaw Agricultural University* – SGGW, *Land Reclamation* 20: 55–59.

LOWE J., JONAS E., OBRICIAN V. 1969: Controlled gradient consolidation test. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div*. 95, 1: 77–97.

MALINOWSKA E. 2006: Badania zmian współczynnika filtracji dla potrzeb oceny odkształceń konsolidacyjnych gruntów słabonośnych. Warszawskie Seminarium Naukowe Doktorantów i Młodych Pracowników Nauki. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 1: 45–52.

Mapa rozmieszczenia złóż surowców skalnych zwięzłych w Polsce, 2008. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.

MŁYNAREK Z. 2007: Site characterization and mapping in urban area. 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Madrid 1: 175–202.

MYŚLIŃSKA E. 2001: Grunty organiczne i laboratoryjne metody ich badania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

MYŚLIŃSKA E. 2004: Występowanie agregatów w gruntach spoistych i ich wpływ na ocenę

niektórych właściwości tych gruntów. *Przegl. Geol*. 52, 8/1: 653–656.
SZYMAŃSKI A., LECHOWICZ Z. 1987: Badania ściśliwości w warunkach ciągłego wzrostu obciążenia. VIII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Wrocław.
TOKHEIM O., JANBU N. 1980: A continous consolitadion test. Norwegian Geotechnical Institute 9.
ŻUREK-PYSZ U. 2002: Zmiany fizyczne i chemiczne wybranych wskaźników litologicznych kredy jeziornej wywołane obciążeniem. *Górn. Odkrywk*. 2–3: 137–141.
ŻUREK-PYSZ U. 2007: Specyficzne właściwości litologiczne holoceńskiej kredy jeziornej. *Geologos* 11: 321–329.

Summary

Strain and filtration parameters of lacustrine chalk from Mazury District. In this paper the strain and filtration parameters of lacustrine chalk from Mazury District are presented. To determinate the main engineers' parameters the oedometer tests have been obtained. There were two types of laboratory tests: IL standard one and CLR – with the constant loading. The tests were performed on lacustrine chalk from Mazury District in North East Poland. The tests results allowed to describe relationships between stain and vertical effective stress. Also the relationship between constrained modulus and vertical effective stress with the most correlated equation was proposed. The relationship between filtration coefficient and void ratio was obtained. The constitutive equation for the relationship between filtration coefficient and void ratio was proposed: $k = 1{,}0 \cdot 10^{-12} \cdot e^{3{,}5}$, where: k – filtration parameter, e – void ratio. Strain and filtration parameters obtain from laboratory oedometer tests proved the nonlinear relationship between stress-strain and stress-filtration.

Author's address:
Edyta Malinowska, Katarzyna Gabryś
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa
Poland
e-mail: edyta_malinowska@sggw.pl
katarzyna_gabrys@sggw.pl