

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2016), 25 (3), 277–289
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2016), 25 (3)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2016), 25 (3), 277–289
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2016), 25 (3)
http://iks_pn.sggw.pl

Łukasz KACZMAREK^{1,2}, Kamil KIEŁBASIŃSKI¹

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski
Faculty of Geology, University of Warsaw

² Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska
Faculty of Materials Science and Engineering, Warsaw University of Technology

Propozycja wykorzystania wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej do analizy gruntu spoistego w badaniach pełzania

Proposition of high-resolution computed microtomography use in the study of cohesive soil creep

Słowa kluczowe: badania trójosiowego ściskania, pełzanie gruntu, mikrotomografia komputerowa, pasta łu mio-plioceńskiego, mioceńskie łożyska

Key words: triaxial test, soil creep, computed microtomography, paste of Mio-Pliocene clay, Miocene clay-slate

Wprowadzenie

Pełzanie gruntu jest utożsamiane z długoterminowym, powolnym odkształceniem gruntu w wyniku obecności nieniszczącego pola naprężeń (Kisiel, 1982), na skutek zmiany struktury gruntu dostosowującej się do nowych warunków zalegania. Prędkość pełzania gruntu może być wygaszająca, stała, jak również przyspieszająca do zniszczenia (Kisiel, 1982). Z tych powodów jest to ważne zagadnienie

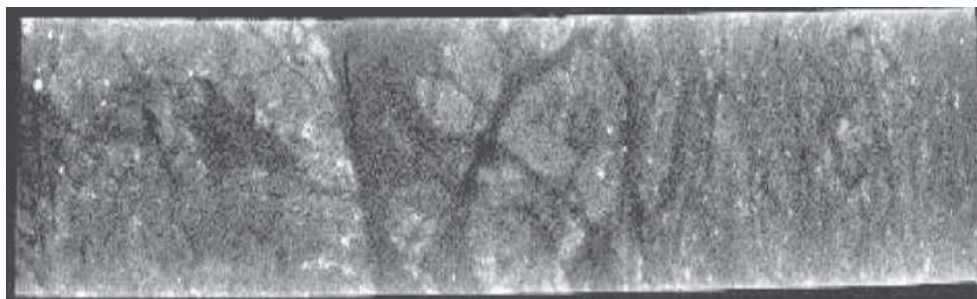
badawcze znajdujące zastosowanie w praktyce inżynierskiej.

Analizę zjawiska pełzania można znaleźć w różnych artykułach (Vermeer i Neher, 1999; Fatahi i inni, 2012; Grimstad i inni, 2015), co potwierdza istotność i aktualność problemu. Nie ma jednoznacznie przyjętej teorii tłumaczącej obserwowane powolne odkształcenia gruntu. W artykule Le i współpracowników (2012) zostały przedstawione różne aspekty pełzania gruntu. Zagadnienie pełzania spotykane jest często przy analizie stateczności skarp i zboczy, jak również konsolidacji podłoża obciążonych nasypami obiektów liniowych lub innymi obiektami inżynierskimi. W wyniku powolnego przemieszczenia się mas gruntu w obszarze skarpy następuje zmiana reżimu sił i momentów, co w konsekwencji może doprowadzić do

powstania czynnych procesów geodynamicznych, takich jak osuwiska. Z tego powodu obserwowane pełzanie gruntów w tych obszarach powinno być uwzględniane jako dodatkowy czynnik przyczyniający się do destabilizacji. Obecnie w badaniach pełzania gruntów dominują analizy w jednoosiowym stanie odkształcenia realizowane na przykład w edometrze. Jednak dla lepszego poznania zachowania się gruntu w stanie trójosiowego pola naprężeń, tak jak ma to miejsce w warunkach pracy *in situ*, niezbędne jest przeprowadzenie badań trójosiowych obciążeń. Dodatkowo w badaniach laboratoryjnych przyjmuje się założenie dotyczące jednorodności próbek, wynikające z założeń mechaniki gruntu (Wiłun, 1976). Warto tutaj przytoczyć artykuł Pinińskiej i współpracowników (1993) pokazujący istotny wpływ struktury gruntu na wyniki badań. Jednym z nowoczesnych narzędzi badawczych pozwalających właśnie na taką analizę uwzględniającą budowę i strukturę wewnętrzną próbek zarówno na etapie przygotowawczym, jak i po badaniu jest wysokorozdzielcza mikrotomografia komputerowa. Metoda ta obecnie daje możliwości sprawdzenia tego, co przez ostatnie dziesięciolecie zakładano *a priori*. Mnogość zastosowań μ CT potwierdzają publikacje dokumentujące przydatność metody w przemyśle metalurgicznym, bioinżynierii, medycynie, a nawet w przemyśle spożywczym (Pławsowski, 2009; Wejrzanowski i inni, 2015). Jedną z zalet tej nieniszczącej i nieinwazyjnej metody jest możliwość analizy dużego obszaru badawczego, a nie tylko wycinka, jak w przypadku obrazowań SEM. Kolejnym atutem w porównaniu z badaniami w mikroskopie elektronowym jest to, że w analizach SEM pre-

paratyka próbki uniemożliwia późniejsze jej badanie i obserwację zmian na podstawie obrazowania zarówno przed badaniem wytrzymałościowym jak i po badaniu. W przypadku μ CT jest to jak najbardziej możliwe i dodatkowo pozwala na wstępną ocenę materiału badawczego, podnosząc efektywność badań. Opis metody analiz w naukach geologicznych przy wykorzystaniu mikrotomografu został przedstawiony w artykule Ketchama i Carlsona (2001). W geologii inżynierskiej mikrotomografia nie jest powszechnie wykorzystywana. Jedne z pierwszych prób w Polsce zastosowania naświetlania rentgenowskiego do badania gruntów były wykonywane z użyciem tomografu medycznego (Bąkowska, 2000; Barański i inni, 2004). Przeprowadzone przez Barańskiego badania w dużej skali fragmentów rdzeni pokazują, że struktura gruntu iłów mio-plioceńskich jest bardzo zmienna, a masyw gruntowy nawet w obrębie długości próbnika wykazuje duże zróżnicowanie strukturalne, wilgotnościowe i granulometryczne (rys. 1). Warto przytoczyć również przykład zastosowania techniki mikrotomografii komputerowej do analiz i interpretacji wyników badań obciążenia statycznego w aparacie trójosiowym (Stefaniuk i inni, 2014).

Celem pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania nowoczesnej techniki wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej w laboratoryjnych badaniach gruntu na przykładzie badań w powszechnie wykorzystywanej aparaturze trójosiowego ściskania. Wyniki analizy jakościowej oraz ilościowej badanych próbek za pomocą techniki μ CT zostały wykorzystane w wizualizacji efektów pełzania gruntów.



RYSUNEK 1. Przekrój tomograficzny próbki łu pobranej do próbnika wciskanego Shelby'ego (Barański i inni, 2004)

FIGURE 1. Tomographic cross-section of clay core sample, taken with use of Shelby push probe (Barański et al., 2004)

Material

Do badań wykorzystano serie próbek czarnej pasty łuw mio-plioceńskich (rys. 2), wyciętych i przygotowanych z monolitów pobranych ze ściany wykopu stacji metra Centrum Naukowe Kopernik w Warszawie, z głębokości 10 m p.p.t. Materiał badawczy to łu, w którym głównie występuje beidelit i kaolinit (Kaczmarek i Gawriuczenkow, 2016). Paster łu wykorzystana do badań charakteryzowała się wskaźnikiem konsystencji

równym $I_c = 0,55$, średnią wilgotnością $w = 57\%$, co stanowi $w = 1,4$ wp₂, gęstością objętościową $\rho = 1,70$ Mg/m³ oraz średnią zawartością frakcji łuwej $f_{Cl} = 46\%$, frakcji pyłowej $f_{Si} = 39\%$ i frakcji piaskowej $f_{Sa} = 15\%$.

Drugim typem gruntu wybranym do badań były ciemnopopielate łułupki z Chełma (rys. 3) w województwie małopolskim (utwory mioceńskie, należące do warstw chodenickich). Próbki gruntu w stanie zwartym pochodziły z rdzenia uzyskanego z głębokości 11,3



RYSUNEK 2. Przygotowanie próbek z past łuw mio-plioceńskich

FIGURE 2. Preparation of the triaxial samples from Mio-Pliocene clay paste



RYSUNEK 3. Rdzeń iłolupków mioceńskich
FIGURE 3. Core of Miocene clay-slate

do 13 m p.p.t.. Średnia wilgotność gruntu wynosiła $w = 27\%$, gęstość objętościowa $\rho = 1,97 \text{ Mg/m}^3$, a średnia zawartość frakcji iłowej $f_{Cl} = 40,5\%$, frakcji pyłowej $f_{Si} = 44\%$, frakcji piaskowej $f_{Sa} = 5\%$.

Warto zaznaczyć, że materiał badawczy wybrano dla przedstawienia kontrastu obrazu budowy wewnętrznej gruntu o utraconej pierwotnej strukturze (próbki pasty gruntowej) oraz gruntu o naturalnej wyraźnej strukturze, gdzie pełzanie gruntu powinno być marginalne (próbki iłolupków).

Do badań w aparacie trójosiowego ściskania przygotowano próbki walcowe o smukłości $H/D = 2$ i średnicy $D = 3,6 \text{ cm}$ (zgodnie z normą PKN-CEN ISO/TS 17892-9:2009).

Metody

Badania w aparacie trójosiowego ściskania

Klasyczne badania trójosiowego ściskania próbek gruntu w próbie statycznej były ustalone według metodyki i wskazówek podanych w podręczniku Heada (1986), w normie PKN-CEN ISO/TS 17892-9:2009 oraz zgodnie z procedurami przedstawionymi w granicie KBN zrealizowanym w Zakładzie Geologii In-

żynierskiej UW (Barański i inni, 2004). Podczas badań wykorzystano aparat firmy Wykhem Farrance (rys. 4). Badania w aparacie w pierwszej części przedstawianej procedury wykonano według metody CU (ang. *consolidated undrained*), czyli z konsolidacją izotropową i ściskaniem bez odpływu, z pomiarem ciśnienia wody w porach gruntu, z uprzednim nasyceniem próbek iłów metodą ciśnienia wyrównawczego (ang. *back pressure*).



RYSUNEK 4. Aparat trójosiowego ściskania wykorzystywany do badań wytrzymałościowych oraz pełzania. Na zdjęciu próbka po zakończeniu badania pełzania przy osiowym naprężeniu równym 60% naprężeń niszczących

FIGURE 4. Triaxial apparatus which was used for strength and creep tests. In the picture, a sample after the end of creep test with axial stress equal to 60% of shear stress

W przypadku pasty ilów po nasyceniu próbek uzyskano wartość parametru $B \approx 0,97$, a dla iłolupków $B \approx 0,78$.

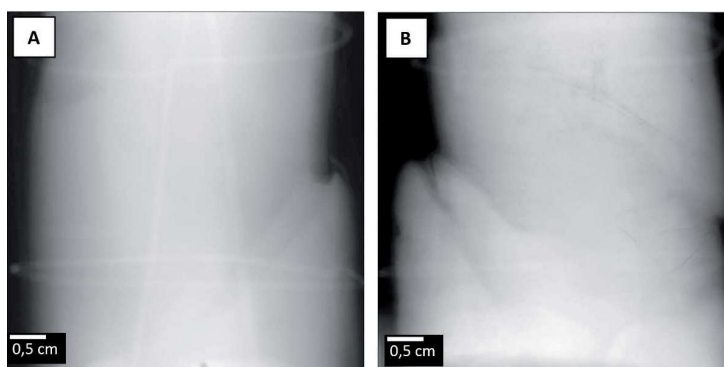
Drugi etap badań dotyczył analizy pełzania gruntu w warunkach trójosiowego stanu naprężenia. Na podstawie wyników uzyskanych w pierwszym etapie w badaniach CU zaprojektowano analizę pełzania próbek gruntu ze wstępną konsolidacją izotropową na poziomie naprężeń *in situ*. Dla wywołania przemieszczeń gruntu o charakterze pełzaniowym zdefiniowano stały dewiator naprężenia na poziomie 30%, a następnie 60% wartości naprężenia niszczącego w warunkach bez drenażu ($q = 0,3q_f$ i $q = 0,6q_f$).

Badania z wykorzystaniem techniki μ CT

Mikrotomografia komputerowa to technika obrazowania polegająca na różnicowaniu cząstek i obszarów o dużym

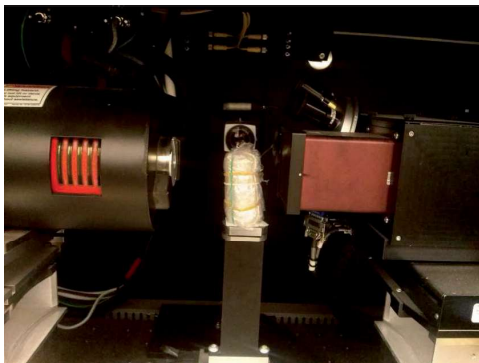
kontraście liniowego współczynnika absorpcji promieniowania rentgenowskiego. Im większy kontrast współczynników, tym wyraźniej można określić wewnętrzną strukturę analizowanych próbek. Liniowy współczynnik absorpcji jest funkcją gęstości, składu chemicznego badanego materiału oraz kwantów promieniowania padających na cząsteczki gruntu. Iły stanowią rozdrobniony materiał badawczy, który ma słabe właściwości transparentności, co utrudnia wykorzystanie techniki μ CT. W badaniach μ CT można wyszczególnić trzy główne fazy: rejestrację danych w mikrotomografie, rekonstrukcję projekcji (w wyniku której powstają tzw. radiografy; rys. 5) oraz przetwarzanie obrazów wraz z wizualizacją.

W badaniach wykorzystano mikrotomograf MicroXCT-400 firmy Xradia (rys. 6). Dwa główne elementy mikrotomografu to źródło (inna lampa lub działo) promieniowania rentgenowskiego oraz detektor promieniowania,



RYSUNEK 5. Radiografy badanych próbek po rekonstrukcji obrazów projekcji: A – próbka pasty ilu po badaniu pełzania, wywołanego dewiatorem naprężenia równym 60% wartości dewiatora naprężenia niszczącego (przy konsolidacji izotropowej dla efektywnego naprężenia $\sigma_3' = 200$ kPa); B – próbka nr 2 iłolupka po zniszczeniu w badaniu trójosiowego ściskania typu CU przy konsolidacji izotropowej, poprzedzającej etap zniszczenia (dla efektywnego naprężenia $\sigma_3' = 250$ kPa)

FIGURE 5. Radiographs of examined samples, after the reconstruction of projection: A – sample of clay paste after creep test which was induced by deviatoric stress equal to 60% of shear deviatoric stress (with previous stage of $\sigma_3' = 200$ kPa effective isotropic consolidation); B – clay-slate sample no 2 after failure in the static triaxial test (with previous stage of $\sigma_3' = 250$ kPa effective isotropic consolidation)

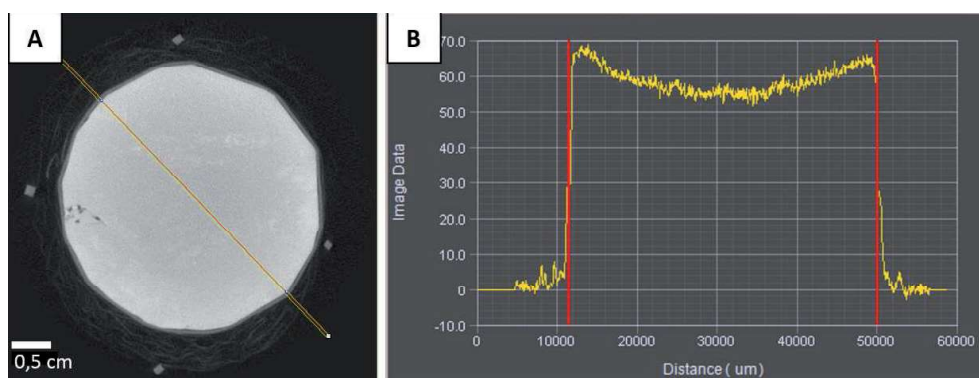


RYSUNEK 6. Walcowa próbka położona na holderze, między lampą rentgenowską (z lewej strony) a detektorem CCD (z prawej strony) w komorze mikrotomografu
 FIGURE 6. Cylindrical sample on holder, between the X-ray source (left) and the CCD detector (right) in chamber of the microtomography

którym jest kamera z układem wielu elementów światłoczułych. Dokładność obrazowania z wykorzystaniem techniki μ CT wyraża się długością boku voxela obrazu (trójwymiarowy piksel), która jest wypadkową wielkości próbki i parametrów technicznych mikrotomografu. Przy

wykorzystanych próbkach walcowych 36×72 mm długości boku voxela mieściły się w zakresie od 38 do 50 μm . Czas pojedynczego skanowania z tą rozdzielczością wynosił 2 h i wynikał z czasu wykonania serii 1024 zdjęć przy pięciosekundowym naświetlaniu pojedynczego zdjęcia.

Próbki badane za pomocą mikrotomografu były zabezpieczane przed utratą wilgotności gumowymi membranami oraz folią. Po umiejscowieniu próbki w mikrotomografie na tak zwanym holderze przeprowadzono naświetlanie wraz z rejestracją danych. Podczas tej fazy wykorzystano płytkę z miedzi (między źródłem a próbką) w celu absorpcji niskoenergetycznego spektrum wiązki promieniowania rentgenowskiego (Dohnalik, 2013), co pozwoliło w dalszych etapach na uzyskanie obrazu z mniejszą ilością sztucznych zaburzeń. Następnie wykonano rekonstrukcję projekcji z wcześniejszym usunięciem efektu „twardnienia wiązki”, który jest



RYSUNEK 7. A – Przykładowy zaburzony obraz przekroju poprzecznego próbki itu mio-pliocenińskiego zjawiskiem „twardnienia wiązki”; B – wykres wartości pochłaniania promieniowania rentgenowskiego w przekroju liniowym próbki, gdzie oś odciętych to długość przekroju, a oś rzędnych to wartość pochłaniania

FIGURE 7. A – Example of distorted cross-section image of Mio-Pliocene clay sample by beam hardening occurrence; B – graph of sample X-ray attenuation in the line section, where the abscissa is the length of the section, and the axis of ordinate is the value of the attenuation

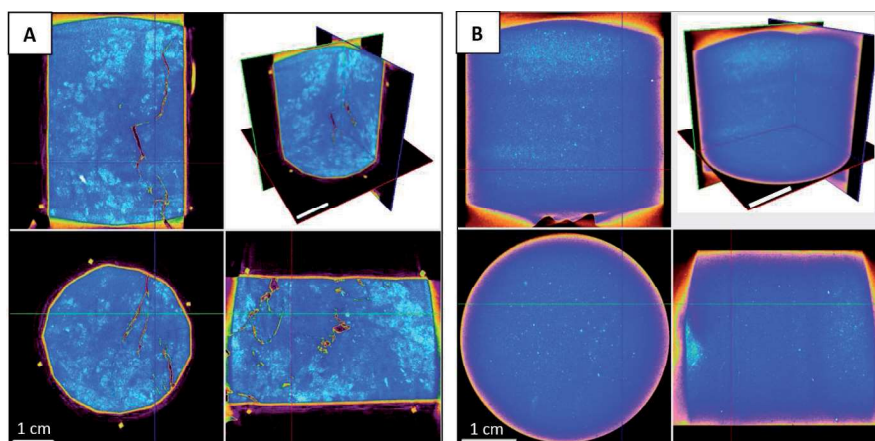
spowodowany nierównomierną energią promieniowania rentgenowskiego penetrującego próbkę. Efektem tego jest sztuczne nierównomierne pochłanianie promieniowania, w szczególności w pobliżu krawędzi próbki (rys. 7). Kolejny etap badania dotyczył procedury przetwarzania obrazu, w efekcie którego otrzymano obrazy 2D i 3D struktury wewnętrznej badanych próbek. Do tego celu wykorzystano programy CT-Analyser, DataViewer firmy Bruker oraz programu Avizo firmy FEI. Szczegółowy opis wykorzystanej metodyki można znaleźć u Kaczmarek (2016).

Wyniki

W pierwszym etapie badań wykorzystano technikę mikrotomografii komputerowej do wyselekcjonowania serii próbek pasty łu, w których struktura wewnętrzna była jednorodna i ciągła. Równocześnie obrazy przekrojów wewnętrznych próbek stanowiły referencję

w stosunku do obrazów po zniszczeniu lub po badaniu pełzania. Na rysunku 8 przedstawiono dla porównania wyniki badań μ CT próbki łu o naturalnej strukturze (rys. 8A) oraz jednolitej paście (rys. 8B). W odróżnieniu od obrazu pasty na przekrojach próbki NNS można zaobserwować obszary o różnej jasności świadczące o heterogenicznej strukturze. Zmienność ta jest wynikiem zróżnicowanej gęstości próbki oraz składu chemicznego. Warto zaznaczyć, że obserwowane są pojedyncze ziarna o większej średnicy. Dodatkowo dobrze widoczne są naturalne szczeliny rozciągające się pionowo w stosunku do próbki, których rozwarcie mogło zostać zaindukowane odprężeniem gruntu podczas pobierania i następnie wycinania.

Na podstawie przeprowadzonego badania CU ze stałą prędkością przemieszczenia ($v_s = 0,01$ mm/min) oraz po etapie konsolidacji odtwarzającym warunki *in situ* zniszczenie nastąpiło przy maksymalnej wartości dewiatora naprężenia równego $q_f = 105,2$ kPa. Efektywne war-



RYSUNEK 8. Przekroje próbki łu mio-pliocenińskiego: A – próbka o naturalnej strukturze; B – próbka z pasty

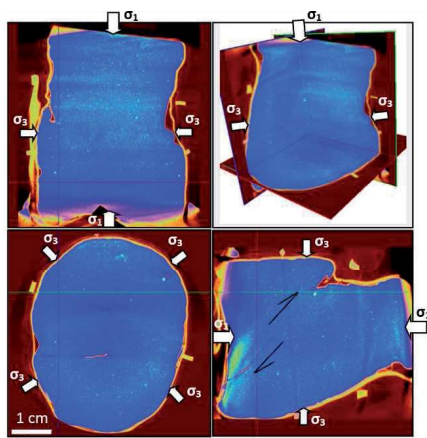
FIGURE 8. Cross-sections of Mio-Pliocene clay samples: A – undisturbed sample; B – paste sample

tości kohezji i kąta tarcia wewnętrznego określone na podstawie badań całej serii wyniosły $c' = 14$ kPa, $\varphi' = 9,4^\circ$. W badaniach pełzania gruntu analogicznie odtworzono w trakcie konsolidacji izotropowej ($\sigma_3' = 200$ kPa) warunki *in situ*. Analiza zmian dewiatora naprężenia oraz wyniki obrazowania rentgenowskiego (rys. 9) wskazały, że zniszczenie

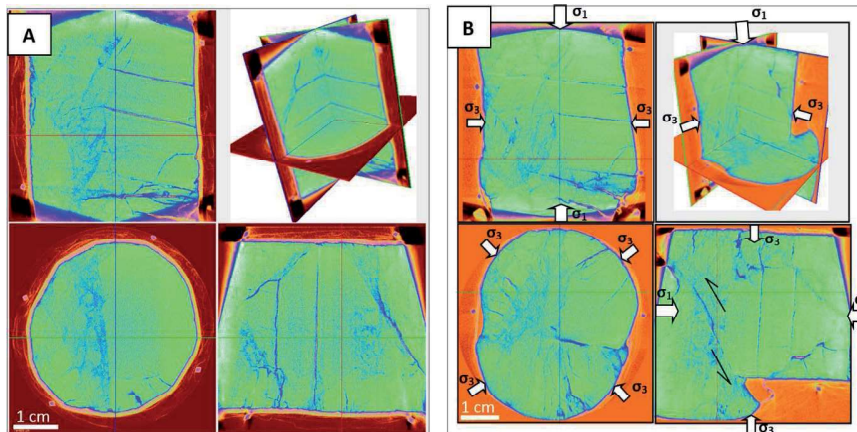
miało charakter ciągły. Analizując obraz pozniszczeniowej geometrii próbki, można zauważyć charakter plastycznego zniszczenia z zaznaczającą się szczeliną pozniszczeniową. Szczeliny te dobrze są widoczne blisko krawędzi, zanikając częściowo kontynuują się w głąb przekroju. Kąt nachylenia płaszczyzny zniszczeniowej można w przybliżeniu określić na $\theta \approx 46^\circ$, co w nawiązaniu do kryterium zniszczenia Coulomba–Mohra oraz wyników badań trójosiowych (Gasparre, 2005) świadczy o zniszczeniu przy maksymalnym naprężeniu osiowym.

W celu weryfikacji techniki badawczej wybrano grunt o odmiennej i wyraźnej strukturze w postaci łożupków, dla których przeprowadzono analogiczną procedurę, jak dla pasty iltu. W tym przypadku analiza obrazu dotyczyła rozwoju szczelinowatości w trakcie badań wytrzymałościowych. Rysunek 10 przedstawia prostopadłe przekroje próbki uzyskane po naświetleniu rentgenowskim.

W przypadku łożupków otrzymane wyniki pozwoliły na rozpoznanie powierzchni łupliwości, szczelin po-



RYSUNEK 9. Przekroje próbki iltu z pasty nr 2 po badaniu trójosiowym typu CU
FIGURE 9. Cross-sections of clay paste sample no 2 after CU test in triaxial apparatus

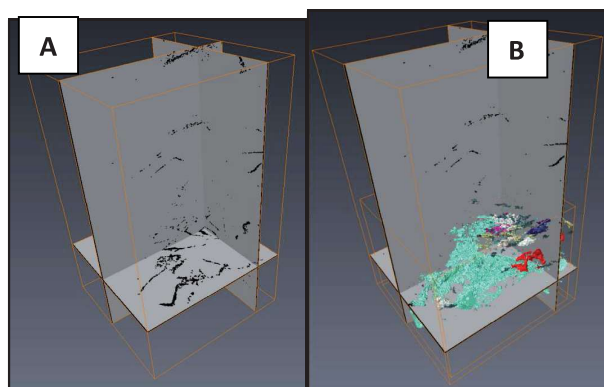


RYSUNEK 10. Przekroje próbki łożupka nr 2: A – przed badaniem w aparacie trójosiowego ściskania; B – po badaniu trójosiowym typu CU
FIGURE 10. Cross-sections of clay-slate sample no 2: A – before CU triaxial test; B – after CU triaxial test

zniszczeniowych oraz różnych strukturalnie i gęstościowo obszarów cząstek mineralnych wewnątrz próbki. Kąt nachylenia płaszczyzny zniszczeniowej można w przybliżeniu określić na $\theta \approx 27^\circ$, co jak pokazuje obraz μ CT jest konsekwencją uprzywilejowanych płaszczyzn zniszczenia. Ważnym wynikiem analizy próbek łożupków z wykorzystaniem μ CT była możliwość obliczenia procentowego udziału objętości szczelin naturalnych ($\sim 0,84\%$) oraz powstałych w wyniku badania trójosiowego ściskania ($\sim 0,74\%$) do objętości próbek (V_v). Trend zmiany szczelinowości jest malejący (spadek o $\sim 0,10\%$), co świadczy o konsolidacji próbki, nawet pomimo maskującego efekt procesu odprężenia następującego po wyjęciu próbki z komory.

Dzięki odpowiedniej jakości zarejestrowanego obrazu możliwe było wykonanie rozwiniętej analizy obrazu oraz stworzenie modelu 3D próbek,

w których następnie wyselekcjonowano szczeliny (rys. 11). Dla wygenerowania modelu szczelin wykorzystano procedurę składającą się z: (a) zaimportowania 1024 obrazów poprzecznych przekrojów próbki, (b) przetwarzanie obrazu (poprzez np. polecenia wygładzenia granic, uśrednienia wartości pikseli, zwiększenia kontrastów), (c) określenia obszaru roboczego analizy oraz wygenerowania obrazów różnych przekrojów, (d) binaryzacji wybranych elementów próbki oraz zdefiniowania obszarów poszczególnych materiałów, (e) pomiaru wybranych i określonych parametrów (np. objętości szczelin), (f) wygenerowania modelu numerycznego poprzez dyskretyzacje materiałów siatką objętości skończonych, (g) wizualizacji wybranych struktur oraz możliwości przeprowadzenia symulacji numerycznych (np. przepływu cieczy, rozkładu ciśnienia przepływającej cieczy).



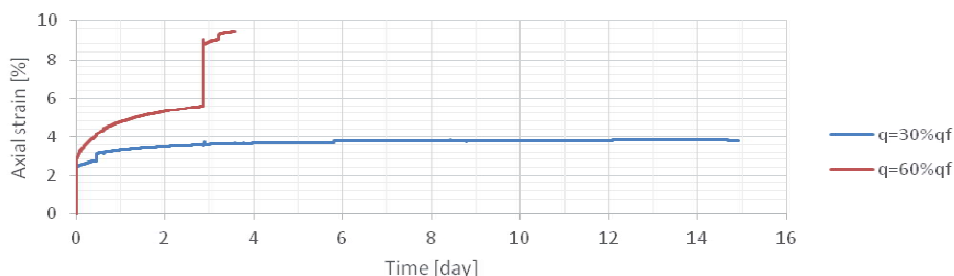
RYSUNEK 11. Przetwarzanie danych po naświetlaniu rentgenowskim próbki łożupku nr 3 zniszczonej w aparacie trójosiowego ściskania (w badaniu typu CU): A – zbinaryzowane obrazy przekrojów próbki; B – trójwymiarowy obraz rozciągłości szczelin wygenerowany na podstawie modelu numerycznego

FIGURE 11. Data processing after X-ray irradiation of clay-slate sample no 3, damaged in CU triaxial test: A – binarized images of sample cross-sections; B – three-dimensional picture of the fractures extension, generated on the basis of the numerical model

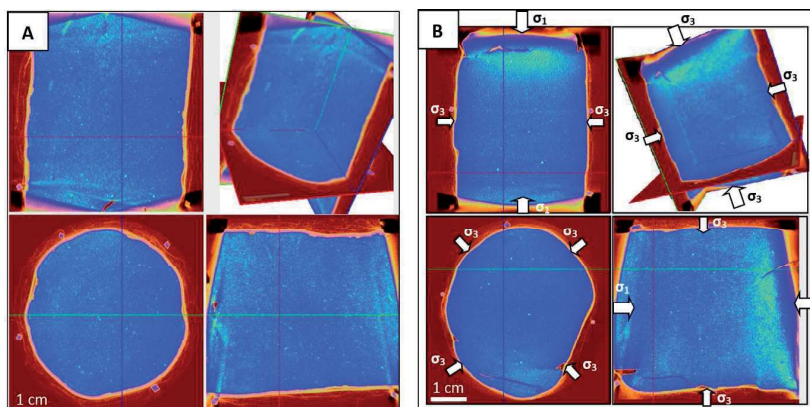
Dla łąłupków, podobnie jak w przypadku pasty łąłw, przeprowadzono badania CU. W trakcie konsolidacji odtworzono stan naprężenia w warunkach *in situ*. Kruche (nieciągłe) zniszczenie nastąpiło przy maksymalnej wartości dewiatora naprężenia $q_{\max} = 217,6$ kPa. Efektywne wartości kohezji i kąt tarcia wewnętrzznego określone na podstawie

badan całej serii wyniosły $c' = 34$ kPa, $\varphi' = 18,9^\circ$.

Dalszy etap badań dotyczył analizy zjawiska pełzania w trójwymiarowym stanie naprężenia. Wyniki badań pasty łął mio-pliocenińskiego przedstawiono na rysunkach 12 i 13. Badania łąłupków są aktualnie w trakcie realizacji i ze względu na ich czasochłonność zostaną opracowane w najbliższym czasie.



RYSUNEK 12. Osiowe odkształcenia próbek pasty łął w czasie trójosiowych badań pełzania (po wcześniejszej konsolidacji izotropowej przy naprężeniach efektywnych $\sigma_3' = 200$ kPa)
 FIGURE 12. Axial strain of clay paste vs time, during triaxial creep tests (with previous stage of $\sigma_3' = 200$ kPa effective isotropic consolidation)



RYSUNEK 13. Przekroje próbki pasty łął mio-pliocenińskiego poddanej naświetlaniu rentgenowskim: A – przed badaniem pełzania; B – po badaniu pełzania ze stałym dewiatorem naprężenia równym 60% wartości dewiatora naprężenia niszczonego (po wcześniejszej konsolidacji izotropowej przy efektywnym naprężeniu $\sigma_3' = 200$ kPa)
 FIGURE 13. Cross-sections of Mio-Pliocene clay paste after X-ray irradiation: A – before creep test; B – after creep which was induced by deviatoric stress equal 60% of shear deviatoric stress (with previous stage of $\sigma_3' = 200$ kPa effective isotropic consolidation)

W przypadku badania pełzania ze stałym dewiatorem naprężenia równym 60% wartości dewiatora naprężenia niszcącego ($q = 0,6q_f$) próbka uległa zniszczeniu po prawie trzydniowym etapie pełzania. Takie zniszczenie świadczy o przyspieszającym charakterze pełzania. W drugim przypadku badania pełzania ze stałym dewiatorem naprężenia równym 30% wartości dewiatora naprężenia niszcącego ($q = 0,3q_f$) nastąpiło zahamowanie prędkości odkształceń, co świadczy o wygaszającym charakterze pełzania gruntu, zakończonego relaksacją naprężenia osiowego.

W przypadku pierwszego badania pełzania, zakończonego zniszczeniem, na obrazie μ CT można zauważyć krótkie szczeliny zniszczeniowe ($\theta \approx 55^\circ$), wskazujące na powierzchnię zniszczeniową, która ma charakter plastyczny, co powoduje zanik obrazu szczeliny wewnątrz próbki. W drugim przypadku badania pełzania (przy długości boku pojedynczego woksela $\sim 40 \mu\text{m}$), nie zaobserwowano w paście dobrze widocznych zmian struktury gruntu.

Podsumowanie

W celu aproksymacji rzeczywistych wyników badań trójosiowych, w tym również pełzania w stanie trójosiowego naprężenia, wykorzystuje się różnego rodzaju założenia i modele konstytutywne. Jednym z fundamentalnych założeń jest jednorodność badanej serii próbek gruntu. Obecnie nie stosuje się żadnych form weryfikacji wewnętrznej budowy i struktury próbek w badaniach komercyjnych, nawet w przypadku budowy konstrukcji obiektów budowlanych o szczególnym

znaczeniu inwestycyjnym i przy skomplikowanych warunkach geologicznych. Przedstawiana metodyka pozwala na zwiększenie wiarygodności oraz rzetelności różnych rodzajów badań laboratoryjnych. W szczególności badań struktury gruntu, jakimi są badania pełzania. Przy uzyskanej rozdzielczości otrzymano klarowny obraz struktury wewnętrznej gruntu przed badaniami, jak również po badaniach. Na podstawie uzyskanych wyników możliwa była właściwa interpretacja oraz dalsza analiza. W przypadku pasty z łu mio-plioceńskiego zniszczenia mają charakter plastyczny, gdzie pomimo powstania zniszczenia nie dochodzi do utworzenia ciągłej powierzchni poślizgu. Podobnie w trakcie badania pełzania również nie zaobserwowano powstania ciągłej powierzchni zniszczenia. W tym przypadku w chwili dojścia do zniszczenia przy stałym dewiatorze naprężenia na poziomie 60% wartości dewiatora naprężenia niszcącego zidentyfikowano drobne szczeliny przy krawędzi próbki. Dla tej samej próbki gruntu zaobserwowano pełzanie o charakterze przyspieszającym, świadczące o degradacji parametrów wytrzymałościowych gruntu w funkcji czasu. Druga próbka pasty łu, która została poddana pełzaniu ze stałym dewiatorem naprężenia na poziomie 30% wartości dewiatora naprężenia niszcącego, wykazała znikający charakter pełzania, zakończony relaksacją naprężenia osiowego, o czym świadczy spadek prędkości przyrostu odkształceń osiowych. W przypadku łułupków zaś cenną informacją była odpowiedź na pytanie, czy powierzchnia zniszczenia wykorzystuje predysponowane powierzchnie łupliwości. Analiza trzywymiarowego obrazu roz-

ciągłości szczelin umożliwiła dokładną analizę przebiegu powstałych szczelin. Dodatkowo technika μ CT pozwoliła na określenie udziału szczelin naturalnych ($\sim 0,84\%$) oraz pozniszczeniowych w próbkach iłupków ($\sim 0,74\%$).

Literatura

- Barański, M., Kaczyński, R., Borowczyk, M., Krauzlis, K., Trzciniński, J., Wójcik, E. i Zawrzykraj, P. (2004). *Ocena zachowania się ilów plioceńskich ze Stegien w warunkach naprężeń efektywnych. Projekt badawczy KBN Nr 5 T12B 041 22*. Warszawa: Archiwum NCN.
- Bąkowska, A. (2009). *Zachowanie się glin lodowcowych rejonu Warszawa – Służew pod wpływem obciążeń dynamicznych. Rozprawa doktorska*. Warszawa: Uniwersytet Warszawski.
- Dohnalik, M. (2013). *Zwiększenie możliwości wyznaczania parametrów zbiornikowych skał z wykorzystaniem rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej. Rozprawa doktorska*. Kraków: AGH.
- Fatahi, B., Le T.M., Le M.Q. i Khabbaz, H. (2013). Soil creep effects on ground lateral deformation and pore water pressure under embankments. *Geomechanics and Geoengineering*, 8 (2), 107-124.
- Gasparre, A. (2005). *Advanced laboratory characterization of London clay. PhD thesis*. London: Imperial College London.
- Grimstad, G., Mehli, M. i Degago, S.A. (2015). Creep in clay during the first few years after construction. W *Proceedings of International Symposium of the 6th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, 915-922. Buenos Aires: Millpress.
- Head, K.H. (1986). *Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 3: Effective Stress Tests*. London: Pentech Press.
- Kaczmarek, Ł. (2016). Możliwości wykorzystania wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej w badaniach geologiczno-inżynierskich na przykładzie analizy ilów mio-plioceńskich. *Przegląd Geologiczny*, 64 (2), 105-112.
- Kaczmarek, Ł. i Gawriuczenkow, I. (2016). Porównanie wyników różnych analiz zawartości substancji organicznej w ilach mio-plioceńskich z podłoża stacji Centrum Nauki Kopernik II linii metra w Warszawie. *Przegląd Geologiczny*, 64 (7), 489-494.
- Ketcham, R. i Carlson, W. (2001). Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*, 27, 381-400.
- Kisiel, I. (1982). *Mechanika skał i gruntów*. Warszawa: PWN.
- Le, T.M., Fatahi, B. i Khabbaz, H. (2012). Viscous behaviour of soft clay and inducing factors. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30 (5), 1069-1083.
- Pinińska, J., Dobak, P. i Łukaszewski, P. (1993). Ocena stateczności zboczy drogi między regionalnej w warunkach fliszu karpackiego. W *X Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania 21-22.10, Warszawa*. Warszawa.
- Pląskowski, W. (2009). System X-ray w przemyśle spożywczym. *Badania Nieniszczące*, 1. 08. Pobrano z lokalizacji: http://www.badania-nieniszczace.info/Badania_Nieniszczace-Nr-01-08-2009/Serwis-Badania-Nieniszczace-01-08-2009-art-nr6.html.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-9:2009. *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 9: Badanie gruntów w aparacie trójosiowego ściskania po nasyceniu wodą*.
- Stefaniuk, D., Tankiewicz, M. i Stróżyk, J. (2014). X-ray microtomography (μ CT) as a useful tool for visualization and interpretation of shear strength test results. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 36 (4), 47-55.
- Vermeer, P.A. i Neher, H.P. (1999). A soft soil model that accounts for creep. W *Proceedings of International Symposium "Beyond 2000 in Computational Geotechnics"*, 249-261. Rotterdam: Balkema.
- Wejrzanowski, T., Skibiński, J., Cwieka, K. i Kurzydłowski, K.J. (2015). Micro-computed tomography and finite element method study of open-cell porous materials. W *The 4th International Conference on Material Science and Engineering Technology Sin-*

gapore, October 26-28, 2015. Singapore: MATEC Web of Conferences 30.

Wiłun, Z. (1976). *Zarys geotechniki*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności sp. z o.o..

Streszczenie

Propozycja wykorzystania wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej do analizy gruntu spoistego w badaniach pełzania. W artykule przedstawiono wyniki badań z wykorzystaniem wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej (μ CT) zastosowanej w celu uzyskania obrazu struktury wewnętrznej gruntu. Wyniki prześwietlań μ CT zostały wykorzystane do selekcji miarodajnych próbek do badań, a także do oceny zmian struktury w analizie pełzania gruntu podczas badań trójosiowych. Badania przeprowadzono na pastach gruntowych wykonanych z ilów mio-poliocenijskich pobranych z Warszawy oraz próbkach NNS mioceńskiego iłolupka pochodzącego z zapadliska przedkarpackiego. Pierwszą serię badań przeprowadzono na iłowych pastach gruntowych, a następnie na iłolupkach, prowadząc standardowe badania typu CU z określeniem maksymalnych parametrów wytrzymałościowych oraz naprężeń niszczących wykorzystywanych w późniejszych badaniach pełzania. W kolejnym etapie badań, z wykorzystaniem próbek wstępnie przebadanych w mikrotomografii, przeprowadzono badania pełzania gruntu w aparacie trójosiowego ściskania przy naprężeniach osiowych nieprzekraczających maksymalnej wartości dewiatora naprężenia. Na podstawie uzyskanych obrazów struktury wewnętrznej gruntu określono typy zniszczeń w poszczególnych próbkach oraz obliczono zawartość szczelin naturalnych i pozniszczeniowych. Dodatkowo uzyskano trójwymiarowe modele próbek, które można wykorzystać do dalszych symulacji badań laboratoryjnych. Obrazy 2D i 3D wewnętrznej struktury gruntów spoistych stwarzają nowe możliwości w poznawaniu procesów zmian właściwości gruntów.

Summary

Proposition of high-resolution computed microtomography use in the study of cohesive soil creep. Article presents results of high-resolution computed microtomography (μ CT) use in internal structure of soil samples' image analysis. These results enable the determination of reliable series of samples. Furthermore, μ CT analysis revealed structure changes during static load and creep triaxial tests. The study was performed with the use of Mio-Pliocene clay paste and undisturbed Miocene clay-slate samples. The μ CT tests were implemented before and after triaxial tests. Firstly, the remoulded clay samples from Warsaw were analysed and then clay-slate samples from the Carpathian Foredeep. Before creep triaxial tests were done, standard static load triaxial tests (type CU) were performed. Thanks to previous analysis stage, strength parameters and maximum failure axial stress were defined. The next stage were the creep triaxial tests with non-failure stress field condition, which were determined according to the previous study stage. Based on the obtained μ CT images of the structure, the types of failure were characterised and three-dimensional models of samples were generated. Additionally, fractions of natural and post-failure fractures were calculated. Two- and three-dimensional images of the internal structure of cohesive soils establish new opportunities in the analysis of soil properties adjustment processes.

Author's address:

Łukasz Kaczmarek
Uniwersytet Warszawski
Wydział Geologii
Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej
02-089 Warszawa, ul. Żwirki i Wigury 93,
Poland
e-mail: lukasz.kaczmarek@uw.edu.pl