

Szymon TOPOLIŃSKI, Maciej Kordian KUMOR

MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA ANALIZY TOMOGRAFICZNEJ W GEOTECHNICZNEJ OCENIE GRUNTÓW

Streszczenie

W niniejszym artykule prezentuje się nowe podejście do problemów oceny gruntów metodą nie wymagającą preparatyki próbek, nieniszczącą z zastosowaniem tomografu komputerowego. Praca przedstawia przykładowe wyniki badań dotyczących wykorzystania standardowego medycznego tomografu komputerowego do jakościowej oceny struktury oraz obserwacji mechanizmów zniszczenia kompozytu gruntowego cement/torf.

Badania z zastosowania tomografu komputerowego w mikro mechanice gruntów, mają charakter poglądowy, a przedstawione wnioski, stanowią propozycję dalszych kierunkowych prac badawczych.

WPROWADZENIE

Mikroanaliza gruntów przy obecnych wymaganiach oceny ryzyka realizowanych dużych budowli geotechnicznych jest konieczna, szczególnie w ocenie podłoża składających się z minerałów wtórnych, silnie zdyspergowanych o złożonych właściwościach. Dotychczas jedyną stosowaną metodą pozwalającą na bezpośrednią obserwację cząstek gruntu dużo mniejszych niż 2 μm były analizy elektromikroskopowe. Analizy mikroskopowe wymagają zawsze odpowiedniej, często skomplikowanej preparatyki próbek [13]. Mikrofotografie powierzchni strukturalnej pozwalają precyzyjnie określić kształt, wymiary cząstek mineralnych i stopień dyspersji. Szczególnie jest to ważny problem przy identyfikacji nietypowych właściwości gruntów spoiistych np.: typu genetycznego, mikrostruktury, ekspansywności. Grunty spoiiste składają się przede wszystkim z frakcji ilowej i koloidalnej zbudowanej z minerałów wtórnych- ilastych. Badania wykonuje się na próbkach quasi nienaruszonych, odpowiednio przygotowanych. Trudności pojawiają się, gdy badane są ośrodki wrażliwe na zmiany wilgotności i następują deformacje objętościowe (iły ekspansywne) lub strukturalne tj.: niszczenie mostków między agregatowych, charakterystyczne np.: w glinach zapadowych [13, 14].

Wyniki badań mikrostrukturalnych w połączeniu z analizami chemicznymi i mineralogicznymi są obecnie stosowane z powodzeniem nie tylko do celów naukowych. Również do identyfikacji i określenia czasu powstania uszkodzeń obiektów z przyczyn geotechnicznych (osuwiska, awarie budowli), a także w zawilgczonych przypadkach rozstrzygnięć sądowych.

W inżynierii geotechnicznej przy wzmacnianiu podłoża za pomocą spoiw, istotnym jest określenie stopnia wykrystalizowania i rozkładu kryształów spoiwa oraz zmian i domieszek chemicznych kompozytu kształtujących wytrzymałość oraz trwałość w okresie użytkowania. Współczesne techniki badań stosowane od wielu lat w innych dziedzinach niż gruntoznawstwo techniczne, umożliwiają bezinwazyjne śledzenie dynamicznych zmian nawet na mokrych próbkach ośrodka.

Rentgenowski tomograf komputerowy (TK lub z angielskiego CT- Computed Tomography) jest jednym z najpopularniejszych urządzeń diagnostycznych używanych w medycynie. Ma zadziwiająco możliwości badawcze umożliwiające w sposób bezinwazyjny uzyskać trójwymiarowy obraz wnętrza badanego medium przedstawianego badaczowi w postaci plastrów (greckie- tomos) z opisem (graphia). Za wynalazców urządzenia uważa się Allana MacLeod Cormacka i Godfreya Newbold Hounsfielda. Pierwszy tomograf

według ich pomysłu zaczęto stosować na początku lat 70 ubiegłego wieku [8].

Tomografia komputerowa zrewolucjonizowała obrazowanie biomedyczne i coraz częściej znajduje zastosowanie w innych dziedzinach nauki, również w geotechnice.

Metoda tomografii zalicza się do badań nieniszczących, a zarazem nieinwazyjnych. Oznacza to, że nie zmienia właściwości chemicznych i fizycznych próbki, a ponieważ nie jest konieczne wprowadzenie jakichkolwiek urządzeń pomiarowych do jej wnętrza, nie niszczy jej struktury (poza samym pobraniem próbki). Przygotowanie do badań nie wymaga zatem zaawansowanej preparatyki laboratoryjnej, co pozwala zaoszczędzić czas i ograniczyć koszt badań [18].

W 1982 roku po raz pierwszy użyto rentgenowskiego tomografu komputerowego do analizy gruntów. Prowadzone przez Petrovica i innych badania [15], potwierdziły liniową zależność między gęstością gruntu, a osłabieniem natężenia strumienia promieniowania rentgenowskiego przechodzącego przez próbkę gruntu. Rozszerzenie zastosowania TK do badań gruntów było ściśle uzależnione od wzrastających w czasie trzech dekad możliwości pomiarowych urządzeń.

Obecnie, w geotechnice używa się tomografów przede wszystkim w jakościowym oraz ilościowym badaniu struktury gruntów w szczególności występujących tam porów, ocenie warunków hydro-fizycznych, a także badań gęstości [18]. Używane są zarówno medyczne rentgenowskie tomografy komputerowe, jak i tomografy przemysłowe oraz mikrotomografy (μCT).

Ze studiów literaturowych zastosowania tomografii komputerowej w badaniach gruntów wynika, że zdecydowanie mniej uwagi badacze poświęcają organicznym składnikom gruntów. TK otwiera szerokie możliwości zbadania szczególnie organicznych składników, gdyż właśnie do badania tego typu materii została tomografia komputerowa opracowana i przystosowana.

Zainteresowanie materia organiczną w gruntach związane jest z badaniami zarówno ich żywej jak i nieożywionej części. W przypadku tej pierwszej, analizie za pomocą TK poddawana jest fauna, flora oraz mikroorganizmy występujące w gruncie. Badane jest między innymi występowanie i przestrzenne rozłożenie systemów korzeniowych roślin [np. 10], występowanie i przemieszczanie się charakterystycznych organizmów [np. 11], a nawet przestrzenne rozłożenie drażonych przez dżdżownice korytarzy [4].

Bardziej interesujące, z punktu widzenia tematyki pracy autorów, są jednak wyniki badań części nieożywionych- substancji organicznej, będącej głównym składnikiem gruntów organicznych.

W przypadku występowania wysokiej zawartości substancji organicznych, uwaga skupiona jest przede wszystkim na ocenie wybranych właściwości fizycznych i warunkach hydrofizycznych gruntów. TK znalazł zastosowanie między innymi do analizy struktury gruntu [np. 19], zawartości biogazów [12], czy wpływu wielkości i kształtu porów na przepływ wody w torfie [16, 17].

Jak dotąd w Polsce nie stosowano tomografu komputerowego w pracach badawczych w geotechnice, poza pojedynczymi przypadkami [5], do analiz kompozytów gruntowych stabilizowanych cementem metodą mieszania in situ. Dobra dostępność urządzeń medycznych, brak konieczności preparatyki próbek, a także liczne prace naukowe potwierdzające skuteczność stosowania tych urządzeń do badań zaczynu cementowego np. [1], zainspirowały autorów do przeprowadzenia badań kompozytów gruntowych z wykorzystaniem tomografu komputerowego.

W niniejszym artykule dokonano analizy tomograficznej użytych w badaniach wytrzymałościowych próbek kompozytu gruntowego cement/torf. Badaniom zostały poddane próbki o różnej zawartości cementu i substancji organicznej po 28 dniach dojrzewania. Celem artykułu jest przedstawienie możliwości badawczych standardowego medycznego tomografu komputerowego do jakościowej oceny struktury oraz mechanizmów zniszczenia próbek badanego kompozytu. Badania te mają charakter poglądowy, są częścią rozprawy doktorskiej jednego z autorów [20], a przedstawione wnioski, posłużą do wytyczenia kierunku dalszych prac autorów.

1. BUDOWA I PODSTAWY DZIAŁANIA TOMOGRAFU KOMPUTEROWEGO

Tomograf komputerowy dzięki odpowiednim algorytmom matematycznym pozwala zrekonstruować pojedyncze przekroje- zdjęcia rentgenowskie w trójwymiarową wizualizację. Nie byłoby to możliwe bez wsparcia wydajnych komputerów zdolnych do jednoczesnego przetwarzania wielu informacji. Idea działania tomografu pojawiła się dość wcześnie, ale dopiero rozwój nauk informatycznych i technik obliczeniowych umożliwił opracowanie odpowiedniego urządzenia [8].

Od powstania pierwszych urządzeń, przez następne 40 lat udoskonalano budowę rentgenowskich tomografów komputerowych. Od połowy lat dziewięćdziesiątych nastąpił rozwój tomografów spiralnych (helikalnych), w których lampa rentgenowska obraca się wokół badanego obiektu przy jednoczesnym posuwistym ruchu stołu (wzdłuż dłuższej osi badanego obiektu). Najbardziej zaawansowaną generacją urządzeń są wieloprzekrojowe spiralne aparaty tomograficzne z wiązką promieniowania uformowaną w stożek. Dzięki zastosowaniu tablicy składającej się z wielu rzędów detektorów, możliwe jest jednoczesne uzyskanie kilku sąsiadujących ze sobą przekrojów. Obecnie, najnowocześniejsze tomografy mają 256, a nawet 320 rzędów detektorów i mogą być wyposażone nawet w dwie lampy rentgenowskie [8, 9].

W skład tomografu niezależnie od generacji urządzenia wchodzi stały zestaw elementów. Można wyróżnić między innymi [6, 8]:

- system akwizycji danych wykorzystujący promienie rentgenowskie,
- system komputerowy przetwarzający dane i rekonstruujący obrazy z projekcji,
- system prezentacji obrazu pozwalający na wizualizację i kontrolę bieżącej pracy urządzenia, umieszczony w pomieszczeniu kontrolnym wraz z konsolą operatorską,
- urządzenie zasilające tomograf w prąd,
- systemy archiwizacji danych.

Najważniejszą i najbardziej rozpoznawalną częścią urządzenia jest system akwizycji danych. Jego częściami składowymi są [8]:

- brama, powszechnie nazywana gantrą,
- lampa rentgenowska,
- tablica detektorów,
- stół umożliwiający w sposób ręczny lub zautomatyzowany odpowiednie ułożenie badanego materiału.

Tomografia jest techniką wykorzystującą promienie rentgenowskie. Źródło promieniowania poruszając się po okręgu prześwietla wąską wiązką badany obiekt. Proces ten jest powtarzany wielokrotnie dla różnych kątów między osią lampa-obiekt-detektor, a pionem. Wewnątrz badanego obiektu następuje szereg procesów fizycznych. W zależności od wartości współczynnika absorpcji danego materiału następuje różne osłabienie przechodzącego promieniowania rentgenowskiego, rejestrowane przez detektory umieszczone po przeciwnej stronie lamp. Interpretacja uzyskanych wartości pochłaniania promieniowania rentgenowskiego w poszczególnych projekcjach pozwala na zrekonstruowanie obrazu przekrojów. Dalsza analiza przy użyciu odpowiedniego oprogramowania umożliwia stworzenie przestrzennego obrazu badanego obiektu [7, 8, 9].

W praktyce wartość współczynnika pochłaniania promieniowania rentgenowskiego określa się w jednostkach Hounsfielda HU (z angielskiego- HounsfieldUnits). W systemie tym liczbę HU poszczególnych pikseli przelicza się odnosząc uzyskaną wartość pochłaniania do wartości oznaczonej dla wody (wartość referencyjna) zgodnie ze wzorem 1 [9]:

$$HU = \frac{(\mu_{\text{piksela}} - \mu_{\text{wody}})}{\mu_{\text{wody}}} \times 1000 \quad (1)$$

gdzie:

HU- jednostka Hounsfielda,

μ_{piksela} - współczynnik pochłaniania piksela (w przypadku rekonstrukcji przestrzennej- voxela),

μ_{wody} - współczynnik pochłaniania wody.

Wartości liczb Hounsfielda w obrazowaniu biomedycznym mieszczą się w zakresie od -1000 dla gazów, poprzez 0 dla wody, do +4000 dla kości. Dla większej przejrzystości system akwizycji danych przypisuje wartościom liczbowym skalę odcieni szarości (każdemu pikselowi przypisana jest odpowiednia gęstość wyrażona za pomocą tej skali). Niestety, możliwości ludzkiego oka do ich rozróżniania są ograniczone. Dla zmniejszenia ich zakresu do 256 odcieni (ilość odcieni wyświetlana przez tradycyjne monitory w 8-bitowej głębi barw) stosuje się okno, czyli fragment skali definiowany przez jego środek C, WL (z angielskiego- windowcenter lub windowlevel) i szerokość W, WW (z angielskiego- windowwidth). Środek okna to inaczej środek zastosowanej skali, a szerokość to pełen jej zakres. W zależności od potrzeb i rodzaju materiału stosuje się odpowiednie wartości tych parametrów. Specjalne oprogramowanie umożliwia zastosowanie wielu różnych programów tematycznych umożliwiających wyszczególnienie charakterystycznych obszarów badanego materiału [6, 7, 8].

2. PRZYGOTOWANIE MATERIAŁU DO BADAŃ

Przygotowanie do badań nie wymaga pracochłonnej preparatyki i ogranicza się wyłącznie do samego przygotowania kompozytów o odpowiednim kształcie, wymiarach i udziale składników. Konieczne było jedynie owinięcie próbek folią, aby zabezpieczyć je przed przypadkowym zniszczeniem, a także, aby nie zanieczyścić stołu urządzenia.

Analizie tomograficznej poddane zostały kompozyty gruntowe (spoiwo cementowe-torf) formowane metodą mieszania in situ, w

postaci próbek cylindrycznych o średnicy 71 mm i wysokości 140 mm. Próbkę dojrzewały w wodzie w specjalnie skonstruowanych pojemnikach zgodnie ze skandynawskimi procedurami [2], pod obciążeniem 18 kPa, które według [3] odpowiada stosowanemu w warunkach rzeczywistych. Po 28 dniach określono wytrzymałość próbek na jednoosiowe ściskanie w maszynie wytrzymałościowej (prasie hydraulicznej).

Podstawowym składnikiem mieszanek był torf niski, turzycowotrzciniowy o stopniu humifikacji według skali von Posta H₃/H₄, o średniej zawartości substancji organicznej $I_{om}=83,64\%$, wilgotności naturalnej $w_n=323,13-419,72\%$ oraz średniej gęstości objętościowej $\rho=1,04 \text{ g/cm}^3$. Torf do analiz pobrano z kopalni torfu w miejscowości Nowe Dąbie w okolicach Bydgoszczy.

Torf stabilizowano powszechnie dostępnym popiołowym cementem portlandzkim o wysokiej wytrzymałości wczesnej- CEM II/B-V 32,5R. Zawartość substancji organicznej zmniejszono poprzez dodawanie określonej ilości obojętnego chemicznie piasku kwarcowego. Ze względu na trudności w określeniu gęstości objętościowej mieszanki ilość dodawanego cementu określano w odniesieniu do masy gruntu suchego (stosunek m_d/m_s). Dodatkowo, w każdym przypadku, obliczano rzeczywisty wskaźnik w/c , będący podstawowym parametrem przy projektowaniu mieszanek betonowych.

Wykonano tomogramy dwóch przykładowych próbek o różnym udziale cementu i substancji organicznej. Pierwsza z próbek, w dalszej części artykułu nazywana K1, charakteryzowała się zawartością substancji organicznej $I_{om}=20\%$ i stosunkiem masy dodanego cementu do masy suchego gruntu $m_d/m_s=1,75$. Druga z nich próbka- K2 miała naturalną zawartość substancji organicznej oraz stosunek $m_d/m_s=2,25$.

3. OBRAZOWANIE ZA POMOCĄ TK

Obrazowanie zostało przeprowadzone w Zakładzie Radiologii Kujawsko- Pomorskiego Centrum Pulmonologii w Bydgoszczy. Do badań zastosowano 16-rzędowy spiralny tomograf komputerowy firmy Siemens-model Somatom Emotion-16. Próbkę ustawiono tak, aby przesuw stołu urządzenia był zgodny z dłuższą osią badanych walców (osią obrotu). Grubość przekrojów na potrzeby badań ustawiono na 1mm. Przedstawione obrazy dwuwymiarowe miały wielkość 512x512 pikseli. Wszelkie analizy przeprowadzono na powszechnie dostępnym oprogramowaniu OSIRIX do przeglądania i przetwarzania obrazów do celów medycznych w formacie DICOM.

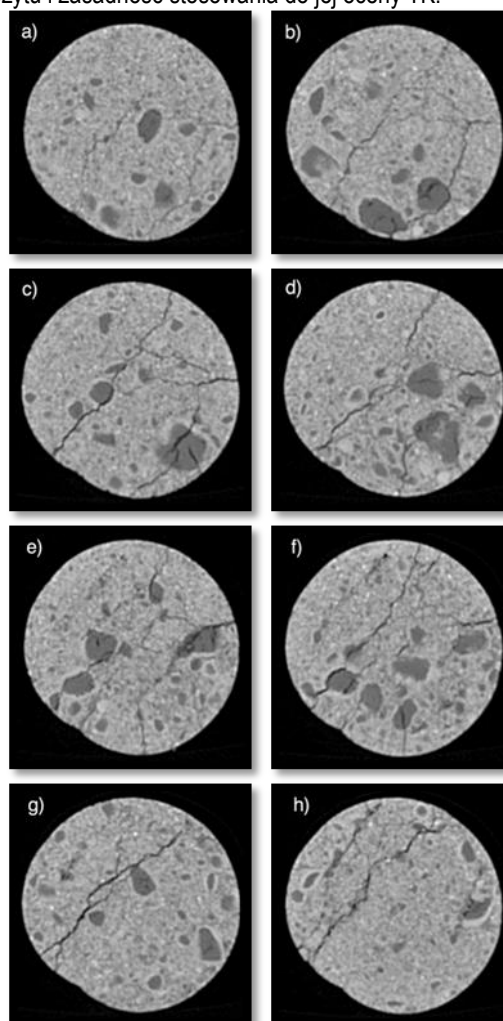
Na tym etapie wiedzy przedstawiono jedynie jakościową analizę uzyskanych obrazów, szczególnie zwracając uwagę na możliwości oprogramowania i potencjalne dalsze wykorzystanie medycznego rentgenowskiego tomografu komputerowego w badaniach kompozytów.

Na rys. 1 przedstawiono zdjęcia próbki kompozytu K1 bezpośrednio po oznaczeniu wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Na jednym z nich zaznaczono kolorem czerwonym powstałe w czasie niszczenia pęknięcia. Na podstawie tego obrazu możemy co najwyżej określić zasięg pęknięć oraz typ odkształcenia powstałego w wyniku przeprowadzonych badań. Widoczny jest charakterystyczny sposób zniszczenia- ukośne *kruche* ścięcie. Takie wstępne wnioski można wyciągnąć na podstawie makroskopowej analizy próbek kompozytu.



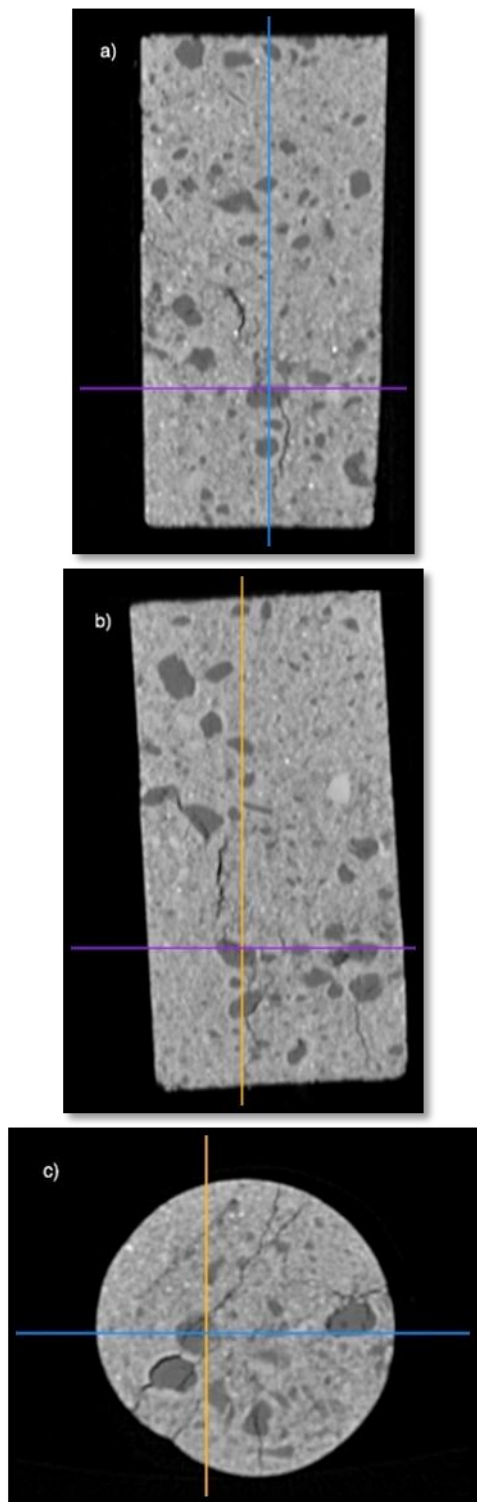
Rys. 1. Zniszczone próbki kompozytu K1 bezpośrednio po badaniach wytrzymałościowych [20].

Jakościowa analiza tej samej próbki za pomocą TK daje szereg niespotykanych jak dotąd możliwości obserwacji mechanizmów jej zniszczenia. Na rys. 2 przedstawiono wybrane przekroje poprzeczne przez próbkę K1. Prześledzono, zaczynając od góry do około połowy wysokości próbki, występujące w niej pęknięcia. Jak wskazują wstępne analizy zaobserwować można pewne prawidłowości. Miejsca wystąpienia i zasięg ścięcia próbki jest zależny od rozkładu w kompozycie skoncentrowanych agregatów organicznych. Jest to szczególnie widoczne na rycinie 2 b), c) oraz f) gdzie pęknięcia *wybijają sobie drogę* przez naturalne organiczne osłabienia (widoczne na zdjęciach jako ciemniejsze skupienia) zgodnie z zasadą mechaniki- zasadą najmniejszego działania Hamiltona. Potwierdza to duży wpływ stopnia homogenizacji na końcową wytrzymałość kompozytu i zasadność stosowania do jej oceny TK.



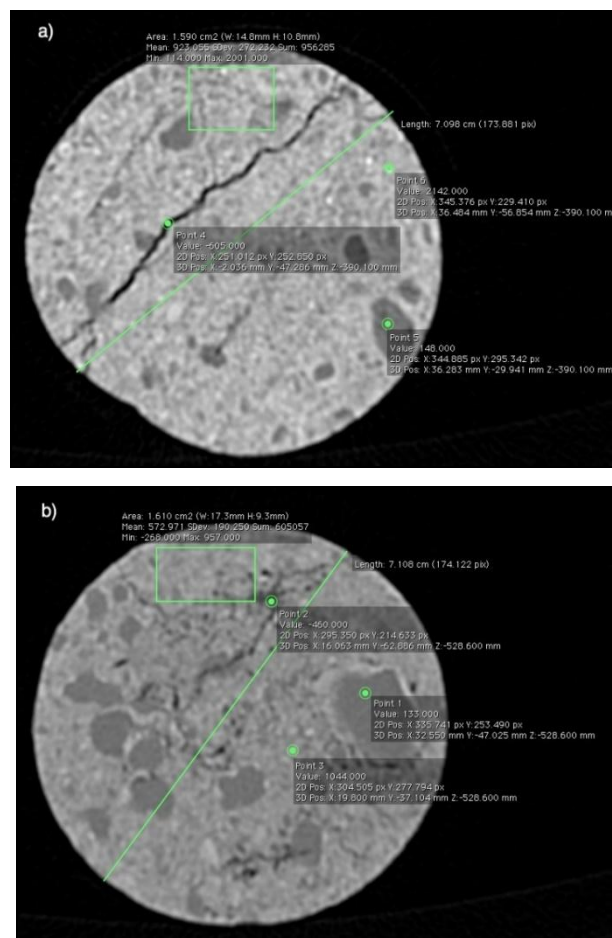
Rys. 2. Analiza wybranych przekrojów poprzecznych kompozytu K1 [20].

Bardziej precyzyjna analiza z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania pozwala na dokładne umiejscowienie wybranego punktu słabego, np. organicznego agregatu w przestrzeni, to znaczy we wzajemnie prostopadłych przekrojach podłużnych- rys. 3 a) i b) oraz odpowiadającego im przekroju poprzecznego- rys. 3 c). Umożliwia to na bardzo dokładne prześledzenie kierunku i powierzchni, w zależności od ustawionej grubości przekroju, praktycznie każdej strefy wewnętrznego osłabienia masywu kompozytu.



Rys. 3. Przestrzenna analiza wybranego punktu kompozytu: a), b) przekroje podłużne, c) przekrój poprzeczny [20].

Interesujące z inżynierskiego punktu widzenia jest również użycie funkcji związanych z polami zainteresowań ROI (z angielskiego *Region of Interest*). Pozwalają one w wybranym przekroju określić wiele ważnych cech takich jak wyznaczenie współczynników absorpcji punktu jak i zaznaczonego, dowolnego obszaru. Możliwe jest także powiększenie wybranego obszaru, jego zwymiarowanie, a także wiele innych możliwości. Poniżej porównano ze sobą przykładowe przekroje kompozytu K1- rys. 4 a) i z K2- rys. 4 b). Analiza zdjęć pozwala stwierdzić znacznie wyższą gęstość kompozytu K1 (im większa wartość pochłaniania promieniowania tym jaśniejsze zabarwienie w skali szarości). Widoczna jest także znacznie większa porowatość kompozytu K2 w stosunku do K1. Analiza wybranych obszarów prostokątnych ROI (oznaczone jako *Area*) pokazuje średnią liczbę HU dla K1 (ok. +923) prawie dwukrotnie wyższą od K2 (ok. +572) co jest zgodne z oczekiwaniami. Znacznie wyższa maksymalna wartość liczby HU (ok. +2001) w kompozycie K2 związana jest z występowaniem ziaren piasku kwarcowego. Wszelkie pory, pęknięcia wypełnione powietrzem powinny mieć ujemną wartość w skali HU, na przykład punkt 4 na rys. 4 a) czy punkt 2 na rys. 4 b). Substancja organiczna przyjmuje znacznie niższe wartości na analizowanych przekrojach od +133 dla K1 do +148 dla K2 w skali HU.



Rys. 4. Zastosowanie funkcji ROI do analizy przykładowych przekrojów: a) kompozytu K1, b) kompozytu K2 [20].

PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań i analizy tomograficznej wskazują jednoznacznie, że zachowanie się kompozytów grunto- wych cement/torf, pod obciążeniem zależy od ich indywidualnej

budowy wewnętrznej, mikrostruktury, a przede wszystkim rozkładu, zawartości spoiwa i udziału części organicznych.

Tomograf (TK) umożliwia poznanie struktury i przestrzennego rozkładu oraz ułożenia poszczególnych składników trójfazowego kompozytu. Analiza geotechniczna struktury ośrodka i zakresu deformacji przestrzennej daje możliwość określenia wielu istotnych cech gruntów, takich jak: podatność na zniszczenie i powstanie dyatacji, stopień homogenizacji, porowatość, a nawet gęstość. Najistotniejszymi danymi jakie można uzyskać to przede wszystkim dynamiczna ocena powstawania powierzchni poślizgu oraz rozwój i typ mechanizmu zniszczenia w odniesieniu do tekstury. Cechy wytrzymałościowe ośrodka spoiwo cementowe/grunt organiczny widziane bezpośrednio pozwalają już obecnie na nowe ujęcie roli lokalnej wytrzymałości, w skali mikro, przy małych odkształceniach, które mają bezpośredni wpływ na własności mechaniczne stabilizowanych masywów gruntowych w skali rzeczywistej.

Autorzy uważają, że analiza geotechniczna wytrzymałości i odkształcalności w klasycznych próbach wytrzymałościowych pozwoli lepiej dostosować modele mechaniczne niszczenia ośrodków rozdzielonych o zróżnicowanej mikrostrukturze.

Przeprowadzone badania potwierdzają zasadność stosowania rentgenowskich tomografów komputerowych do celów inżynierskich, w tym również do badań kompozytów gruntowych. Badanie miały charakter pilotujący i stanowią wstęp do dalszych badań z wykorzystaniem tomografii komputerowej w geotechnice i mikromechanice gruntów silnie zdyspergowanych.

Pracę zrealizowano w ramach badań własnych oraz tematu BS Katedry Geotechniki UTP Bydgoszcz. Autorzy dziękują Dr Róży Kozłowskiej za pomoc w przeprowadzeniu badań tomograficznych.

BIBLIOGRAFIA

- Aruntas H., Y., Tekin I., R. Birgul, Determining Hounsfield Unit values of mortar constituents by computerized tomography. *Measurement*, 2010, vol. 43, 410-414.
- Axelsson K., S. E. Johansson, R. Andersson, Stabilization of Organic Soils by Cement and Pozzolanic Reactions – feasibility study. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 3, Stockholm, 2000.
- Ahnberg H, Strength of stabilized soils. A laboratory study on clays and organic soils stabilised with different types of binder. Doctoral thesis. Swedish Deep Stabilization Research Centre, Report 16, Lund, 2006.
- Bastardie F., Capowiez Y., de Dreuz J. R., Cluzeau D., X-ray tomographic and hydraulic characterization of burrowing by three earth worm species in repacked soil cores. *Applied Soil Ecology*, vol. 24, 2003, s. 3-16.
- Bąkowska A., Zachowanie się glin lodowcowych rejonu Warszawa-Służew pod wpływem obciążeń dynamicznych, Rozprawa doktorska. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Warszawa, 2010.
- Beale S., Todd C., Tomografia komputerowa. Rozdział 17 w książce *Radiografia. Podręcznik dla techników elektroradiografii* Red. Easton S., Wydawnictwo Elsevier Urban & Partner, Wrocław, 2011, s. 221-229.
- Chmielewski L., Kulikowski J. L., Nowakowski A., *Obrazowanie biomedyczne*. Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa, 2003.
- Cierniak R., Tomografia komputerowa. Budowa urządzeń CT. Algorytmy rekonstrukcyjne. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2005.
- De Feyter P. J. i inni, Achenbach S.: Tomografia komputerowa, Rozdział 4 w książce *Choroby serca i naczyń*. Tom I. Red. Camm A. J., Luscher T. F., Serruys P. W., Termedia Wydawnictwo Medyczne, Poznań, 2006, s. 119-143.
- Heereman D. A., Hopmans J. W., Claustnitzer V., Three dimension alimaging of plant roots in situ with X- raycomputed tomography. *Plant Soil*, vol. 189, 1997, s. 167- 179, Visualizing three-dimensional root networks using computed tomography.
- Johnson S., N., Read D., B., Gregory P. J., Tracking larval insect movement with insoilusing high resolution X-raymicrotomography. *Ecological Entomology*, vol. 29, 2004, s. 117- 122.
- Kettridge N., Binley A., X- rsycomputed tomography of peat soils: measuring gas content and peat structure. *Hydrological Processes*, vol. 22, 2008, s. 4827- 4837.
- Kumor M.K. (1985). Metoda przygotowania zamrożonych ilów do badania struktury elektronowym mikroskopem skaningowym (SEM), *Archiwum Hydrotechniki*, t. XXXII, z. 2, 309- 324.
- Kumor M.K. (1985a). Change in structure and microstructure of clays due to cyclicfreezing-thawing. *Symposium franco-polonais "Gel et Genie Civil" Varsovie*, 63-72.
- Petrovic A. M., Siebert J. E., Rieke P. E., Soilbulkdensityanalysis in three dimensions by computed tomographic scanning. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 46, No. 3, 1982, s. 445-450.
- Rezanezhad F., Quinton W. L., Price J. S., Elrick D., Elliot T. R., Heck R. J., Examining the effect of poresizedistribution and shape on flow through unsaturated peat using computed tomography. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 13, 2009, p. 1993-2002.
- Rezanezhad F., Quinton W. L., Price J. S., Elliot T. R., Elrick D., Shook K. R., Influence of poresize and geometry on peat unsaturated hydraulic conductivity computed from 3D computedtomography image analysis. *HydrologicalProcesses*, vol. 24, 2010, s. 2983- 2994.
- Skierucha W. M.: *Nondestructivemeasurements in soil*. Rozdział w książce *Encyclopedia of Agrophysics*. Red. Gliński J., Horabik J., Lipiec J., Wydawnictwo Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2011, s. 513- 516.
- Sleutel S., Cnudde V., Masschaele B., Vlassenbroek J., Dierick M., Van Hoorebeke L., Jacobs P., De Neve S., Comparison of differentnano- and micro-focus X-raycomputedtomography set-ups for the visualization of the soilmicrostructure and soilorganicmatter. *Computers&Geosciences*, vol. 34, 2008, s. 931- 938.
- Topoliński S., Badanie wytrzymałości kompozytów grunt organiczny-spoivo cementowe formowanych metodą mieszania, Rozprawa doktorska. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Bydgoszcz, 2014.