

# PRZYDATNOŚĆ WYBRANYCH SYSTEMÓW POMIARU ODKSZTAŁCEŃ W BADANIACH TRÓJOSIOWYCH SŁABYCH GRUNTÓW SPOISTYCH

**Małgorzata JASTRZĘBSKA, Magdalena KOWALSKA\***

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono najczęściej stosowane systemy służące do pomiaru małych odkształceń w badaniach trójosiowych: LVDT, czujniki wykorzystujące efekt Halla oraz czujniki zbliżeniowe. Omówiono ich przydatność w badaniach słabych gruntów spoistych ze szczególnym uwzględnieniem aspektów montażowych. Zaprezentowano również metodę tomografii RX jako alternatywę dla czujników lokalnych.

**Słowa kluczowe:** wewnętrzny pomiar odkształceń w badaniu trójosiowym, słabe grunty spoiste, czujniki zbliżeniowe, LVDT, efekt Halla, tomografia RX.

## 1. Wprowadzenie

Dokładny pomiar odkształceń poziomych oraz pionowych mniejszych niż 0,1 %, obejmujących krzywoliniowy odcinek charakterystyki naprężenie-odkształcenie, wymaga zastosowania w badaniach trójosiowych, tak zwanych wewnętrznych systemów pomiaru mikroprzemieszczeń. Według Scholeya i in. (1995) dzielą się one na systemy lokalne (elektryczne) oraz obejmujące całą próbkę (obrazowe).

W pierwszym typie systemów czujniki montowane są wewnątrz komory aparatu trójosiowego. Pomiar odkształceń pionowych przeprowadza się na podstawie względnego przemieszczenia dwóch punktów leżących w pewnej odległości bazowej w centralnej części próbki, dzięki czemu można wyeliminować wpływ niejednorodności występujących na jej końcach. Zmiana średnicy mierzona jest natomiast w połowie wysokości próbki. W ostatnich trzydziestu latach, odkąd zdefiniowano niedokładności pomiaru odkształceń czujnikami zewnętrznymi, powstało wiele systemów tego typu (Scholey i in., 1995, Świdziński, 2007). Oprócz wykorzystanej technologii, zakresu pomiarowego i rozdzielczości, systemy te różnią się również sposobem montażu sensorów na próbce gruntu, a ten – łącznie z gabarytami czujników oraz ich ciężarem, decyduje często o ograniczeniach stosowania poszczególnych metod.

Druga grupa systemów pomiaru odkształceń opiera się na skanowaniu tomograficznym promieniami Roentgena bądź specjalnej rejestracji odkształceń

za pomocą układu dwóch kamer. Wymagane tu są przede wszystkim rozbudowane stanowiska badawcze.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wybranych metod pomiaru odkształceń w badaniach trójosiowych pod kątem ich przydatności do stosowania w przypadku słabych gruntów spoistych. Specyfiką tych materiałów jest przede wszystkim bardzo duża odkształcalność, która powoduje, że zakres lokalnych czujników mikroprzemieszczeń jest często za mały, aby uzyskać pełną krzywoliniową charakterystykę zmian sztywności gruntu, szczególnie w przypadku obciążeń cyklicznych. Poza tym, sztywność początkowa próbki zakładanej do aparatu trójosiowego nierzadko jest tak mała, że zastosowanie systemu pomiarowego wymagającego montażu czujników o znacznej masie bezpośrednio na próbce okazuje się niemożliwe. Alternatywą mogą się okazać metody obrazowe, jednakże z uwagi na problemy techniczne związane głównie z rozdzielczością obrazu, nie znalazły one jeszcze zastosowania w badaniach gruntów spoistych.

W artykule będą omówione następujące systemy lokalnego pomiaru odkształceń: transformatorowe czujniki różnicowe LVDT, czujniki wykorzystujące efekt Halla, bezkontaktowe czujniki zbliżeniowe PT oraz metoda alternatywna – tomografia komputerowa. Przydatność poszczególnych systemów do badań słabych gruntów spoistych zostanie skomentowana na przykładzie wyników badań opisanych w literaturze, jak również doświadczeń własnych dotyczących badań trójosiowych z użyciem czujników wykorzystujących efekt Halla, zbliżeniowych oraz LVDT – wykonanych w Katedrze

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: magdalena.kowalska@polsl.pl

Geotechniki Politechniki Śląskiej oraz w Laboratorium geotechnicznym Wydziału Budownictwa Uniwersytetu Bristolskiego.

## 2. Wybrane systemy wewnętrzznego pomiaru odkształceń

### 2.1. Czujniki LVDT

Czujniki LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*), czyli transformatorowe czujniki różnicowe przemieszczeń liniowych, były jednymi z pierwszych używanych do lokalnego pomiaru odkształceń w badaniach gruntów (Brown i Snaith, 1974; Cuccovillo i Coop, 1997; Da Re i in., 2001). Są one czujnikami indukcyjnymi, dzięki czemu, w porównaniu z rezystancyjnymi, są mniej wrażliwe na wpływy temperatury. Mierniki LVDT są również mniej podatne na zakłócenia elektroniczne. Niewątpliwą zaletą jest również ich liniowa charakterystyka, co pozwala na łatwą i jednoznaczną kalibrację.

Czujnik składa się z przesuwnego rdzenia ferromagnetycznego poruszającego się wewnątrz korpusu o przekroju pierścieniowym, mieszczącego w sobie trzy cewki: pierwotną w środku i dwie wtórne. Pomiar, polegający na zmianie natężenia pola magnetycznego zależnie od pozycji rdzenia następuje bezstykowo, ponieważ pomiędzy korpusem i rdzeniem nie ma mechanicznego połączenia. Tym samym czujnik jest bardzo odporny na zużycie i może szybko reagować na zmiany wysokości próbki. Sensor LVDT może mierzyć praktycznie nieskończenie małe zmiany położenia rdzenia. Rozdzielczość czujnika ograniczana jest jednak przez rozdzielczość urządzeń wyjścia oraz zakłócenia elektryczne generowane przez przetwornik sygnału. Według Scholeya i in. (1995) wynosi ona od  $\pm 0,0001\%$  do  $\pm 0,001\%$ . Zakres pomiarowy czujników LVDT zależy przede wszystkim od ich wielkości. Zazwyczaj w badaniach trójosiowych stosowane są czujniki o zakresie pomiarowym do 10 mm, w których długość korpusu wynosi zwykle około 50 mm, a średnica około 9 mm.

Kompletny system pomiarowy składa się z trzech czujników (dwóch do pomiaru odkształceń pionowych i jednego do pomiaru zmian średnicy próbki) oraz elementów montażowych, służących do przytwierdzenia czujników bezpośrednio do próbki. Uchwyty te najczęściej są przyklejane do membrany oraz czasem mocowane dodatkowo za pomocą szpilek. Istnieją dwie opcje połączenia kabla z korpusem czujnika: prostopadle – wówczas otwór w korpusie może być przelotowy, lub równolegle, kiedy to kabel wychodzi z końca korpusu po stronie przeciwnej do rdzenia. W przypadku pierwszej opcji, stosowanej na przykład w City University w Londynie (Cuccovillo i Coop, 1997), czy na Uniwersytecie Bristolskim (Sukolrat, 2007; Kowalska, 2009) i przedstawionej na rysunku 1 czujnik pionowy montowany jest do próbki w jej górnej części a rdzeń opiera się swobodnie na zamocowanej niżej podstawie, dzięki czemu odkształcenia próbki nie są w żaden sposób

ograniczone (na przykład poprzez beczkowaty kształt czy wytworzenie wyraźnej powierzchni zniszczenia). W wypadku drugiego sposobu mocowania kabla, występującego na przykład w systemie posiadanym przez Politechnikę Śląską, czujnik jest mocowany w części dolnej a rdzeń przyczepiany do próbki za pomocą specjalnego uchwyty montażowego (rys. 2). W tym przypadku znaczne odkształcenie pionowe próbki oraz zmiana jej kształtu mogą spowodować zablokowanie rdzenia i wpłynąć na dalsze odkształcenia gruntu. Podobnie może dziać się w przypadku sposobu montażu proponowanego przez Costa-Filho (1985), w którym korpus czujnika zamontowany jest na odrębnej, niezależnej od próbki ramie, a jedynie rdzeń przymocowany jest do próbki. W dodatku pomiar odkształceń pionowych po obu stronach próbki wymaga wówczas zastosowania czterech zamiast dwóch czujników LVDT.

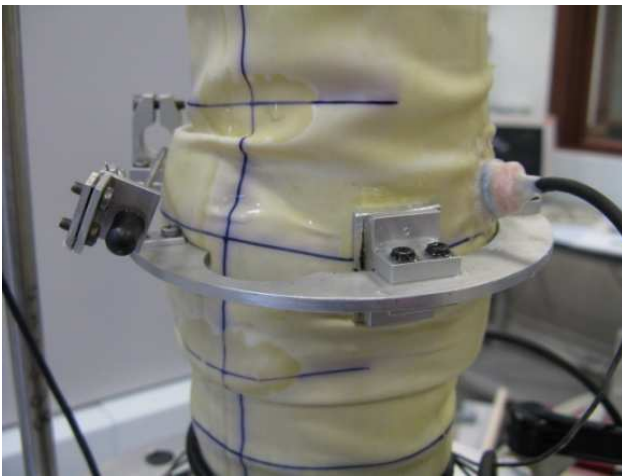


Rys. 1. Przykład montażu czujników LVDT (Uniwersytet Bristolski)



Rys. 2. Uchwyty montażowe (Politechnika Śląska)

Czujnik służący do pomiaru zmian średnicy mocowany jest na lekkiej dwudzielnej obręczy, która jest przyczepiana do próbki w połowie jej wysokości po dwóch przeciwległych stronach. W tym rozwiązaniu koniec rdzenia jest zawsze przyczepiany do obejmy. Znaczne zwiększenie się średnicy próbki, jakie może wystąpić w przypadku słabych gruntów spoistych przy obciążeniu niszczącym, w przypadku niedostatecznego odstępu między powierzchnią próbki a wewnętrzną krawędzią obejmy, może skutkować wciśnięciem się obręczy w grunt (rys. 3). Czasami zamiast przytwierdzenia obejmy z czujnikiem za pomocą kleju i ewentualnie szpilek stosuje się dwudzielne obręcze ze sprężyną (jak na rysunku 2), która utrzymuje całość w miejscu. Niestety sztywność sprężyny w przypadku słabych gruntów spoistych, szczególnie przy początkowo niskich wartościach naprężeń, może ograniczać odkształcenia boczne próbki.



Rys. 3. Wciśnięcie się obręczy montażowej czujnika odkształcenia poziomego LVDT w próbkę kaolinu Speswhite (Uniwersytet Bristolski)

Montaż czujników LVDT na sztywnych i mało odkształcalnych próbkach nie sprawia większych problemów, jak na przykład w testach prowadzonych przez Cuccovillo i Coopa (1997) na kaolinie o  $OCR = 4$  oraz miękkiej skale z Lower Greensand. Inaczej jest w przypadku badania próbek gruntów w stanie plastycznym lub miękkoplastycznym. Największą trudność stanowią sztywne kable, stosowane w wersjach zanurzalnych w wodzie, łączące czujniki z demodulatorem. Szczególnie w przypadku prostopadłego połączenia z korpusem, każdy kabel musi być tak wygięty, aby nie dotykał ścianki komory, co mogłoby spowodować fałszywe odczyty czujnika przy przesuwie tłoka. Problem ten może być ograniczony poprzez zapewnienie dostatecznie długiego odcinka kabla między czujnikiem a otworem przelotowym w podstawie komory. Jest to możliwe wówczas, gdy otwór ten znajduje się po przeciwnej stronie próbki a kabel oplata przynajmniej połowę obwodu próbki jednocześnie nie dotykając ściany komory. Kolejnym rozwiązaniem jest zastosowana na przykład przez Sukolrata (2007) przy okazji badań plastycznego itu Bothkennar wymiana kabla

na bardziej elastyczny zgodnie z techniką zaproponowaną przez Rolo (2003). Oba te rozwiązania nie eliminują jednak problemu całkowicie. W przypadku zamocowania czujnika (w opcji równoległego połączenia kabla z korpusem) w dolnej części próbki sztywność kabli sprawia mniejsze kłopoty. Jednakże w obu przypadkach już sama dość znaczna masa korpusu czujnika (około 24 g) oraz elementów montażowych bardzo często skutkuje przekrzywianiem się mierników na słabej próbce gruntu spoistego na etapie formowania próbki, kiedy nie działa jeszcze wypór wody (lub innego medium) w komorze.

Ciężar elementów systemu sprawia również, że mocowanie uchwytu czujnika do próbki praktycznie wymusza zastosowanie szpilek, co zwiększa znacznie ryzyko wystąpienia nieszczelności membrany w trakcie badania. Przymocowanie natomiast uchwytów montażowych za pomocą wyłącznie taśm gumowych, może skutkować przekrzywianiem się czujników, a przy ich znacznej masie i sztywnych kablach, nawet zdeformowaniem próbki. Przykład takiej nieudanej próby montażu mierników LVDT na próbce gliny pylastej w stanie plastycznym przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Próba montażu czujników LVDT na próbce gliny pylastej w stanie plastycznym za pomocą taśm gumowych zgodnie z instrukcją producenta (Politechnika Śląska)

Ciekawe rozwiązanie systemu pomiarowego przeznaczonego do odkształceń pionowych z użyciem miniaturowych czujników LVDT stosowane w Massachusetts Institute of Technology, zaprezentowali Da Re i in. (2001). Mierniki zamontowano na dwóch przegubowych lekkich obejmach ze sprężyną, które

opierały się na próbce w trzech punktach na jej obwodzie, eliminując konieczność ich przyklejania i mocowania szpilkami. Problem beczkowatego kształtu zdeformowanej próbki został wyeliminowany poprzez specjalny sposób montażu czujników. Do dolnej obejmmy przytwierdzony był korpus czujnika, do górnej – za pomocą kevlarowej nici zawieszony był rdzeń (dodatkowo przedłużony). Wymuszenie pionowej pozycji korpusu czujnika osiągnano poprzez przywiązanie do jego dolnego końca, znowu za pomocą nici kevlarowej, obciążnika o masie 6-10 g. Stosowane sensory miały długość 22,4 mm, średnicę 4,7 mm i ważyły tylko 4 g. System ten bardzo dobrze sprawdził się w testach ścinania przeprowadzonych zarówno na glinie Boston Blue Clay skonsolidowanej anizotropowo przy naprężeniu osiowym 170 kPa, jak również na zamrożonym piasku drobnym (*Manchester Fine Sand*) skonsolidowanym wcześniej izotropowo, pozwalając na oszacowanie początkowo liniowej charakterystyki sztywności. Zakres pomiarowy czujników był jednak bardzo mały ( $\pm 0,254$  cm), co sprawiało, że początkowe ustawienie rdzenia musiało być bardzo dokładnie określone z uwzględnieniem odkształceń, jakie zgodnie z przewidywaniami, miały nastąpić na etapie konsolidacji, poprzedzającej ścięcie próbki.

Przekroczenie zakresu pomiarowego czujników LVDT (niezależnie od typu) przy braku możliwości ich przestawienia w trakcie badania sprawia, że ich stosowanie, szczególnie w silnie odkształcalnych gruntach spoistych, ogranicza się do obciążeń monotonicznych.

## 2.2. Czujniki wykorzystujące efekt Halla

Efekt Halla to zjawisko odkryte w 1897 roku przez amerykańskiego fizyka Edwina H. Halla. Na metalowej lub wykonanej z półprzewodnika płytce z prądem, umieszczonej w polu magnetycznym powstaje napięcie elektryczne poprzeczne do kierunku przepływu prądu i pola magnetycznego. Dzieje się tak na skutek odchylenia się elektronów w polu magnetycznym powodującego różnicę potencjałów na przeciwległych ściankach płytki. Czujniki wykorzystujące to zjawisko zostały zaprojektowane przez zespół Claytona na Uniwersytecie Surrey w Wielkiej Brytanii (Clayton i Khatrush, 1986). Wykazują nieliniową charakterystykę, którą w środkowym najbardziej zbliżonym do prostoliniowego zakresie można aproksymować na przykład wielomianem. Czujniki te są podatne na zakłócenia elektryczne. Według Scholeya i in. (1995) czujniki te mierzą odkształcenia z rozdzielczością około  $\pm 0,002\%$ .

Urządzenie do pomiaru odkształceń pionowych składa się z dwóch elementów (rys. 5). Pierwszym jest właściwy czujnik (płytkę półprzewodnika) umieszczony w specjalnym uchwycie z ogranicznikami w dolnej części próbki; a drugim – poruszający się wzdłuż niego (wewnątrz ograniczników) magnes przyczepiony do podłużnego aluminiowego elementu zamocowanego wahadłowo w górnej części próbki. Czujnik do pomiaru zmiany średnicy próbki umieszczony jest natomiast poziomo wewnątrz ograniczników na jednym końcu

dwudzielnej obejmmy zamocowanej do próbki w połowie jej wysokości, podobnie jak w przypadku czujników LVDT. Magnes znajduje się na drugim końcu obręczy. Wszystkie uchwyty mocuje się do próbki za pomocą kleju i ewentualnie szpilek. Elementy montażowe wykonuje się z aluminium, dzięki czemu są bardzo lekkie. Magnes oraz czujnik (wyposażony w bardzo cienkie i elastyczne okablowanie) są również małych rozmiarów. Dzięki temu montaż czujników tego typu, nawet na bardzo słabych próbkach, nie nastęrcza większych problemów. Jedyne komplikacje mogą wynikać z ewentualnych nieszczelności wynikających z używania szpilek, ewentualnie sztywności sprężyny na obejmie do pomiaru odkształceń poziomych oraz wrzynania się tej obejmmy w próbkę na etapie znacznych deformacji, tak jak w przypadku czujników LVDT. Podobnie również jak w przypadku omawianego poprzednio systemu pomiarowego, czujniki wykorzystujące efekt Halla nie mogą być przestawiane w trakcie badania, a zatem ich pozycjonowanie przed właściwym badaniem słabych gruntów spoistych musi uwzględnić fakt wystąpienia znacznych odkształceń już na etapie nasączenia i konsolidacji. Wykorzystanie tych czujników jest również ograniczone na przykład w przypadku planowanych obciążeń cyklicznych mających się rozpocząć na etapie odkształceń większych niż odpowiadające zakresowi pomiarowemu, który jest niewielki i zwykle wynosi od 2,5-8 mm.

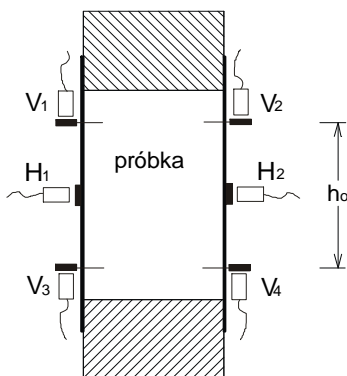


Rys. 5. Przykład montażu czujników wykorzystujących efekt Halla na próbce kaolinu Speswhite (Uniwersytet Bristolski)

### 2.3. Czujniki zbliżeniowe PT

Czujniki zbliżeniowe PT (*Proximity Transducers*) po raz pierwszy wykorzystano w geotechnice w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku (Cole, 1978; Hird i Yung, 1989). Do pomiaru przemieszczenia wykorzystują one zasadę prądów wirowych. Ich działanie polega na rejestracji zmian impedancji cewki umieszczonej w czujniku, która wywołuje na umieszczonym na próbce przewodniku prąd wirowy o natężeniu zależnym od jego odległości od czujnika. Czujniki mają płaską powierzchnię czołową, która musi być usytuowana równoległe do powierzchni elementu, którego odległość jest mierzona. Zakres pomiaru wynosi zwykle do 2,5 mm przy rozdzielczości 0,25 mm.

Ogromną zaletą czujników PT jest fakt, iż pomiar przemieszczeń odbywa się bezkontaktowo. Oznacza to, że same czujniki umieszczane są nie na próbce, lecz na specjalnych prętach zamontowanych wewnątrz komory. Na próbce montuje się tylko, za pomocą kleju (ewentualnie silikonu) i szpilek, cienkie płytki o szerokości 1,5 lub 2-krotnie większej od czoła czujnika, wykonane zwykle z lekkiego aluminium, co do minimum zmniejsza ryzyko uszkodzenia próbki w trakcie montażu systemu i nie powoduje jej dodatkowego obciążenia. Pomiar średnich odkształceń pionowych i poziomych wymaga wykorzystania 6 czujników w układzie przedstawionym na rysunku 6. W przypadku pomiaru odkształceń osiowych tarczki aluminiowe wbijane są w próbkę (w 1/3 i 2/3 wysokości próbki) za pomocą ostrych szpilek. Miejsce przebicia membrany zabezpieczane jest warstwą silikonu odpornego na działanie wysokich ciśnień. Pomiar odkształceń radialnych sytuacja jest mniej skomplikowy. Tarczki aluminiowe są po prostu przyklejane do membrany na warstwie silikonu w połowie wysokości próbki. Zmiana obwodu próbki rejestrowana jest przez zmianę jej średnicy. Próby przeprowadzone przez Jastrzębską (2002) wykazały brak istotnego wpływu warstwy silikonu na mierzone odkształcenia (Hird i Yung, 1989). W każdym przypadku należy jednak zwracać bardzo dużą uwagę na zachowanie równoległości między elementem aluminiowym, a czujnikiem zbliżeniowym (Tatsuoka, 1988), co narzuca niezwykle staranność i zręczność podczas montażu układu „tarczka – czujnik”.



Rys. 6. Konfiguracja podstawowa układu sześciu czujników zbliżeniowych do pomiaru mikroprzemieszczeń

Na rysunku 7 przedstawiono widok ogólny próbki przygotowanej do badań trójosiowych z zamontowanym układem sześciu czujników do wewnętrznego pomiaru przemieszczeń pionowych i poziomych.



Rys. 7. Przykład montażu czujników zbliżeniowych (Politechnika Śląska)

Standardowy zakres pomiaru czujników jest mały, jednak dzięki wykorzystaniu do ich montażu specjalnego stelażu, umożliwiającego dostęp do poszczególnych prętów z zewnątrz komory, istnieje możliwość zmiany położenia czujnika w trakcie badania. Dzięki temu rejestracja odkształceń próbki z rozdzielczością odpowiadającą pomiarom lokalnym może być prowadzona również dla znacznych wartości przemieszczeń względnych płytek aluminiowych. Zastosowanie wspomnianej ramy umożliwia pomiar mikroprzemieszczeń nawet w przypadku słabych gruntów spoistych obciążonych cyklicznie (Jastrzębska, 2010). To rozwiązanie wymaga jednak modyfikacji konstrukcji komory polegającej nie tylko na umieszczeniu w niej stelażu, ale również, jeżeli regulacja położenia czujników odbywa się od górnej strony komory – oddzielenia ściany komory od płyty górnej, co wiąże się z zastosowaniem sztywnego połączenia górnej nasadki na próbce z tłoczyskiem.

### 2.4. Tomografia RX

Tomografia RX (CT: *Computed Tomography*) jest metodą niedestrukcyjną, polegającą na odtworzeniu składu i wewnętrznej struktury badanego obiektu w trzech wymiarach poprzez wykonanie szeregu obrazów radiograficznych promieniami X. Pomiar prowadzony jest w płaszczyznach poziomych, tak zwanych przekrojach (plastrach) i obejmuje swym zasięgiem całą próbkę. Obraz tworzony jest na podstawie pomiaru osłabienia promieni X (przenikających badany obiekt), który jest

proporcjonalny do gęstości właściwej obiektu. Dzięki temu można lokalizować odkształcenia pojawiające się w próbce i ich rozwój, prowadzący ostatecznie do zniszczenia materiału bez konieczności montażu żadnych elementów bezpośrednio na próbce. Z tego względu metoda ta wydaje się być w przyszłości bardzo dobrą alternatywą do wcześniej omówionych systemów pomiaru odkształceń w przypadku badań słabych gruntów spoistych, choć do tej pory wykorzystywana była wyłącznie do badań gruntów niespoistych i skał.

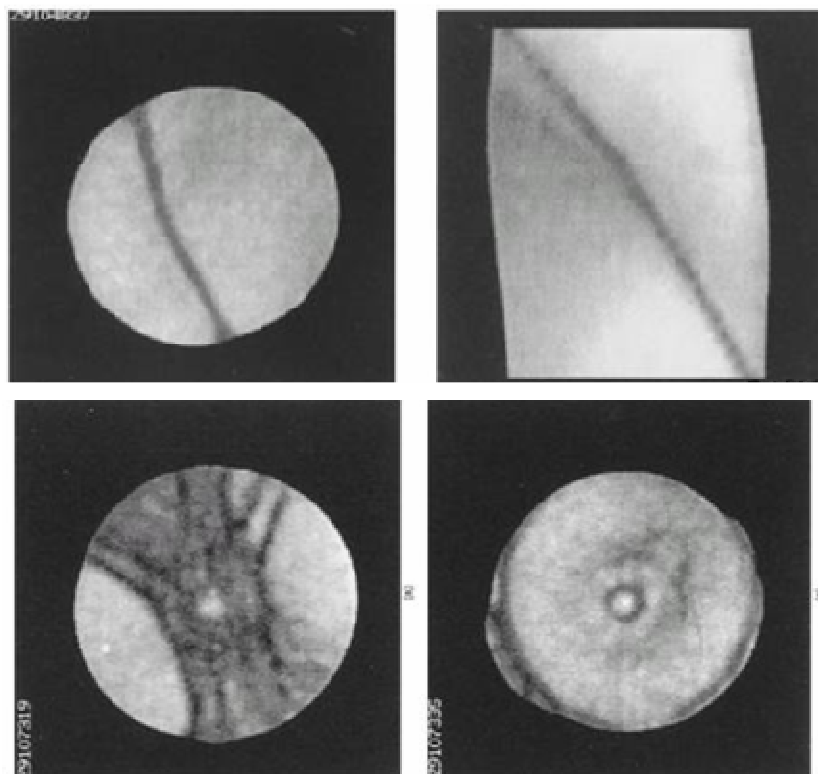
Pierwsze zastosowanie tomografii RX w mechanice gruntów miało miejsce na początku lat sześćdziesiątych XX wieku (Roscoe i in., 1963) i od tego czasu stanowiska badawcze ewoluowały, oferując współcześnie nowoczesne aparaty trójosiowe przystosowane do skanowania próbek promieniami Roentgena czy

to w laboratorium (na przykład TOMOTRIAX), czy też w synchrotronie (na przykład ESRF w Grenoble).

TOMOTRIAX jest stanowiskiem badawczym (rys. 8) powstałym we współpracy Laboratorium 3S-R w Grenoble z Uniwersytetem LMA w Marsylii. Umożliwia przeprowadzenie badań trójosiowych na gruntach skalistych i niespoistych z równoczesnym skanowaniem promieniami X w trakcie chwilowych przerw w obciążaniu dewiatorowym próbki. Generacja promieni X następuje na skutek przyspieszania elektronów w odpowiednim kanale, następnie ich wyhamowywaniu i skręcaniu w polu elektrycznym środka metalowej tarczy stojącej na ich drodze, co powoduje powstanie strumienia fotonów. Przykład otrzymanych obrazów z badania piasku Hostun RF w skanerze tograficznym przedstawiono na rysunku 9.

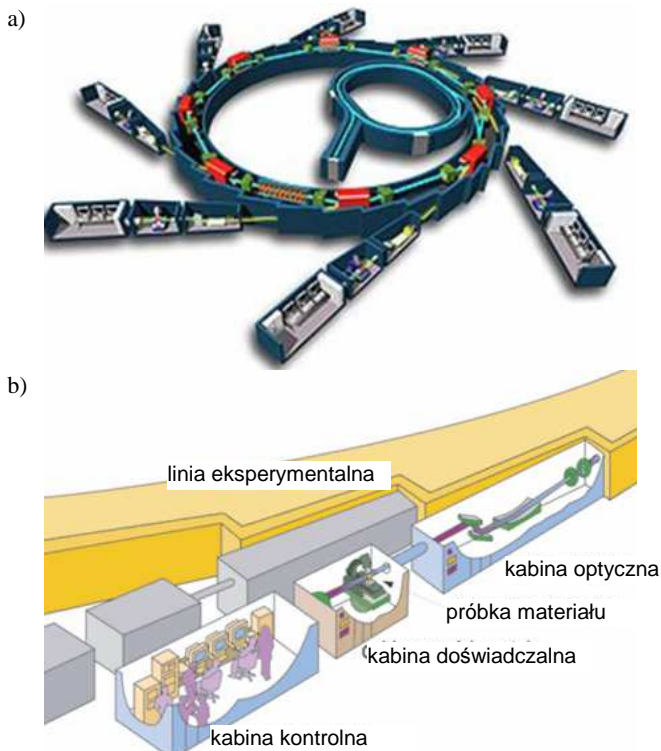


Rys. 8. Tomotriax: a) komora aparatu trójosiowego z zaznaczoną próbką, b) komora trójosiowa przygotowana do badania w skanerze RX z zaznaczoną próbką i kierunkiem skanowania, c) schemat Tomotriaxu



Rys. 9. Badanie na piasku Hostun RF (Desrues i in., 1996): przekrój badanych próbek w skanerze tomograficznym – stan deformacji po osiągnięciu wartości pikowych

SYNCHROTRON jest szczególnym typem akceleratora cyklicznego, w którym cząstki przyspieszane są w trzech fazach (rys. 10). Wstępnie elektrony przyspieszane są w akceleratorze liniowym, kolejno w pośrednim akceleratorze okrągłym do uzyskania energii docelowej (bliskiej prędkości światła) i ostatecznie – w głównym akceleratorze okrągłym utrzymującym stałą energię. Tam też są zakrzywane w polu magnetycznym, co tworzy emisję wiązki fotonów stycznych do krzywej, po której podążają elektrony. Wiązka ta (promieniowanie elektromagnetyczne) kierowana jest do linii eksperymentalnych, zbudowanych z trzech kabin: optycznej, w której za pomocą układu luster i monochromatorów dochodzi do ukierunkowania wiązki; doświadczalnej, w której znajduje się próbka materiału do badań poddana wiązce promieniowania oraz kontrolnej, w której znajduje się zespół ludzi nadzorujący przebieg badania.

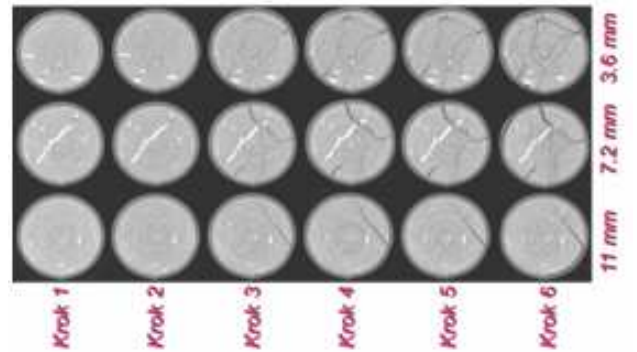


Rys. 10. Schemat działania synchrotronu: a) widok ogólny układu generującego promieniowanie elektromagnetyczne, b) układ linii eksperymentalnej

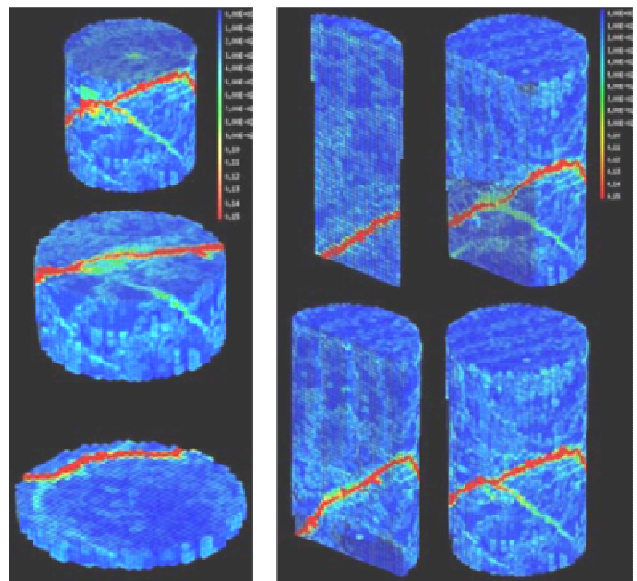
Praca w synchrotronie odbywa się w trybie ciągłym, za wyjątkiem planowanych przestoju na konserwację sprzętu (raz na rok lub rzadziej).

Na terenie Europy największym działającym synchrotronem (poza Wielkim Zderzaczem Hadronów LHC w Szwajcarii) jest ESRF w Grenoble (*European Synchrotron Radiation Facility*). Jedną z linii eksperymentalnych w synchrotronie w Grenoble (ID15A), przystosowaną do badań trójosiowych gruntów skalistych i niespoistych, obejmuje 3 stanowiska badawcze zwane MICROTOMOTRIAXAMI, które pozwalają na przeprowadzenie ściśle określonych typów badań, na próbkach o narzuconych wymiarach: 1 – UU, 1 MPa,

f 20, H = 40 mm, 2 – CD, CU, 1 MPa, f 20, H = 40 mm oraz 3 – UU, 10 MPa, f 10, H = 10 mm. Tomografia promieniami X prowadzona jest w tym samym czasie co obciążanie (nie ma przerw w obciążaniu dewiatorowym próbki). Przykłady wyników badań zrealizowanych w ESRF w Grenoble, przedstawione na rysunkach 11 i 12, zaczerpnięto z prac Lenoira i in. (2007) oraz Halla i in. (2010).



Rys. 11. Poziome przekroje tomograficzne próbki w kolejnych krokach pomiarowych na 3 różnych wysokościach (Lenoir i in., 2007)



Rys. 12. Trójwymiarowe pole przyrostu odkształceń ścinających w kroku "po pik" reprezentowane w przekrojach poziomych na różnych wysokościach – po lewej oraz przekrojach pionowych – po prawej (Lenoir i in., 2007)

Przedstawiana tutaj tomografia RX w zastosowaniach w mechanice gruntów rozwija się bardzo intensywnie w ostatnich latach. Łącząc nieinwazyjny i precyzyjny sposób pomiaru z coraz doskonalszymi metodami opracowywania otrzymanych obrazów: ciągłą bądź dyskretną przestrzenną korelacją obrazów cyfrowych (*Continuum or Discrete Volume Digital Image Correlation*), powoduje, że przewidywanie lokalizacji pojawiających się płaszczyzn ścinania w gruntach niespoistych i skałach oraz próba ich modelowania stają się coraz bliższe i wiarygodniejsze. Problemem jednak okazuje się zbudowanie takiego stanowiska badawczego,

które pozwalałoby na przeprowadzenie eksperymentów na gruntach spoistych. Trudności sprawia tutaj stosunek wielkości ziaren do niedostatecznej rozdzielczości uzyskanych obrazów oraz długi czas konsolidacji w odniesieniu do czasu skanowania próbki. Według wiedzy autorek nie przeprowadzono do tej pory tego typu badań na gruntach spoistych, choć wydaje się, że ta metoda bardzo dobrze nadawałaby się właśnie dla słabych gruntów spoistych – nie obciąża próbki i traktuje ją całościowo.

### 3. Podsumowanie

Mimo istniejącego współcześnie szerokiego wyboru metod służących do pomiaru małych odkształceń w badaniach trójosiowych, ich zastosowanie w przypadku słabych gruntów spoistych wiąże się zwykle z trudnościami technicznymi wynikającymi ze specyfiki tych materiałów. Według autorek najlepszym wyborem okazują się tu metody bezkontaktowe (PT) pod warunkiem umożliwienia przestawiania czujników w trakcie badania, co wiąże się z koniecznością radykalnej modyfikacji konstrukcji komory. Obiecująco rysuje się również perspektywa wykorzystania metod tomograficznych do badania słabych gruntów spoistych, dzięki którym możliwa jest kontrola nie tylko zewnętrznego obrysu próbki gruntu, ale przede wszystkim zmian zachodzących w jej wnętrzu

### Literatura

- Brown S. F., Snaith M. S. (1974). The measurement of recoverable and irrecoverable deformations in the repeated load triaxial test. *Geotechnique*, Vol. 24, No. 2, 225-259.
- Clayton C. R. I., Khatrush S. A. (1986). A new device for measuring local axial strains on triaxial apparatus. *Geotechnique*, Vol. 36, No. 4, 593-597.
- Cole D. M. (1978). A technique for measuring radial deformation during repeated load triaxial testing. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, 426-429.
- Costa – Filho L. de M. (1985). Measurement of axial strains in triaxial tests on london clay. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 8, No. 1, 3-13.
- Cuccovillo T., Coop M. R. (1997). The measurement of local axial strains in triaxial tests using LVDTs. *Geotechnique*, Vol. 47, No. 1, 167-171.
- Desrues J., Chambon R., Mokni M., Mazerolle F. (1996). Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Géotechnique*, Vol. 46, No. 3, 529-546.
- Da Re G., Santagata M. C., Germaine J. T. (2001). LVDT Based System for the Measurement of the Prefailure of Geomaterial. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, No. 3, 288-298.
- Hall S. A., Bornert M., Desrues J., Pannier Y., Lenoir N., Viggiani G., Besuelle P. (2010). Discrete and continuum analysis of localised deformation in sand using X-ray mCT and volumetric digital image correlation. *Geotechnique*, Vol. 60, No. 5, 315-322.
- Hird C. C., Yung P. C. Y. (1989). The use of proximity transducers for local strain measurements in triaxial tests. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 12, No. 4, 292-296.
- Kowalska M. (2009). Identyfikacja parametryczna modeli gruntów w zagadnieniach geotechniki. Rozprawa doktorska. *Politechnika Śląska*, Gliwice.
- Jastrzębska M. (2002). Kalibrowanie i weryfikacja jednopowierzchniowego sprężysto-plastycznego modelu gruntu o silnie nieliniowym wzmocnieniu anizotropowym. Rozprawa doktorska. *Politechnika Śląska*, Gliwice.
- Jastrzębska M. (2010). Badania zachowania się gruntów spoistych poddanych obciążeniom cyklicznym w zakresie małych odkształceń. Rozprawy nr 251, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.
- Lenoir N., Bornert M., Desrues J., Besuelle P., Viggiani G. (2007). Volumetric digital image correlation applied to X-ray micro tomography images from triaxial compression tests on argillaceous rocks. *Strain*, Vol. 43, No. 3, 193-205.
- Rolo R. (2003). The anisotropic stress-strain-strength behaviour of brittle sediments. Rozprawa doktorska. *University of London*.
- Roscoe K. H., Arthur J. R. F., James R. G. (1963). The determination of strains in soils by an X-ray method. *Civ. Engineering Public Works*, Rev. 58, No. 7, 873-876 i No. 8, 1009-1012.
- Scholey G. K., Frost J. D., Lo Presti D. C. F., Jamiolkowski M. (1995). A Review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No. 2, 137-156.
- Sukolrat J. (2006). Structure and destructuration of Bothkennar clay. Rozprawa doktorska. *University of Bristol*.
- Świdziński W. (2007). Kilka uwag odnośnie do lokalnego pomiaru przemieszczeń w systemach trójosiowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Budownictwo z. 111, nr 1756, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 411-418
- Tatsuoka F. (1988). Some recent developments in triaxial testing systems for cohesionless soils. *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, Eds. Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney and Marshall L. Silver, Philadelphia, 7-67.

### APPLICABILITY OF SELECTED INTERNAL STRAIN MEASURING SYSTEMS FOR TRIAXIAL TESTING OF SOFT SOILS

**Abstract:** The paper presents chosen small strain measuring systems that are the most commonly used in triaxial testing: LVDT, the Hall effect gauges and proximity transducers. Their applicability for soft cohesive soils, particularly in terms of assembly issues, is discussed. Computer tomography is also described as an alternative method for the local gauges.

Badania trójosiowe w laboratorium geotechnicznym Uniwersytetu Bristolskiego wykonano w ramach grantu promotorskiego N N506 368834 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w roku 2008.