

Waldemar ŚWIDZIŃSKI

Instytut Budownictwa Wodnego PAN

## KILKA UWAG ODNOŚNIE DO LOKALNEGO POMIARU PRZEMIESZCZEŃ W SYSTEMACH TRÓJOSIOWYCH

**Streszczenie.** Omówiono różne rodzaje czujników do lokalnego pomiaru reakcji gruntu w aparatach trójosiowego ściskania. Wskazano na potrzebę prowadzenia takich pomiarów przy poszukiwaniu relacji empirycznych i rzetelnej weryfikacji rozważań teoretycznych. Przedyskutowano zalety i wady omawianych rozwiązań.

## SOME NOTES ON LOCAL MEASUREMENT OF DISPLACEMENTS IN TRIAXIAL SYSTEMS

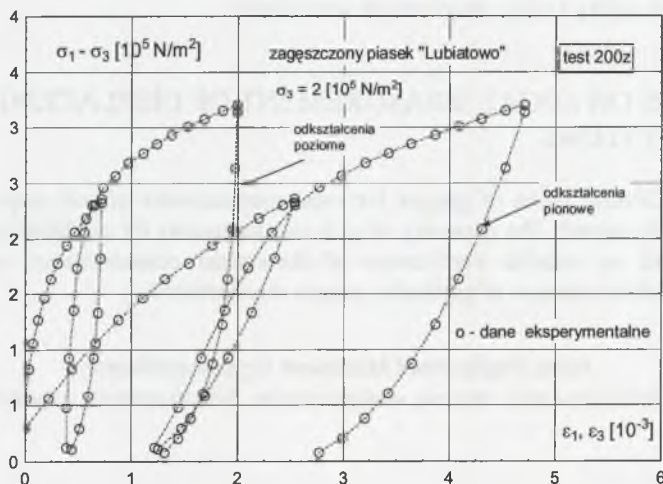
**Summary.** Diverse types of gauges for local measurement of soil response in triaxial apparatuses are discussed. The necessity of such measurements for establishing the empirical relations as well as reliable verification of theoretical considerations is pointed out. Advantages and disadvantages of particular gauges are discussed.

*Panu Profesorowi Maciejowi Gryczmańskiemu,  
dzisiejszemu Jubilatowi oraz mojemu wielokrotnemu Recenzentowi, z wyrazami uznania*

### 1. Wstęp

Dobre zrozumienie mechanizmów rządzących reakcją gruntu na przyłożone obciążenie zewnętrzne, budowa właściwego opisu teoretycznego tych mechanizmów czy też kalibrowanie i weryfikacja istniejących modeli gruntów powinny być oparte na doświadczalnej identyfikacji możliwie największej liczby czynników, mających wpływ na analizowane procesy. Dotyczy to przede wszystkim wiarygodnego pomiaru wszystkich składowych stanu naprężenia i odkształcenia występujących w danych warunkach badawczych. Standardowe aparaty geotechniczne w większości nie pozwalają na rejestrację

wszystkich tych wielkości. Przykładowo, w standardowym edometrze mierzy się jedynie zmiany pionowego przemieszczenia wywołane kolejnymi przyrostami naprężenia pionowego bez znajomości wartości naprężenia bocznego. Z kolei, w przypadku standardowego pomiaru odkształceń w badaniach trójosiowych mierzy się zazwyczaj tylko odkształcenie pionowe, wykorzystując przeważnie zewnętrzne czujniki przemieszczeń. Pomijając dokładność takiego pomiaru, będzie on zawsze obarczony znacznym błędem, wynikającym z niejednorodności ośrodka na końcach próbki. Natomiast pomiar przemieszczeń bocznych za pomocą zewnętrznych czujników przemieszczeń jest praktycznie niemożliwy. Okazuje się bowiem, że odkształcenia boczne, które rozwijają się w próbce gruntu poddanej trójosiowemu ścisnaniu, mogą być tego samego rzędu co odkształcenia pionowe. Widać to wyraźnie na rys. 1, gdzie pokazano wyniki testu trójosiowego ścisnania przeprowadzone na suchym, zagęszczonym piasku „Lubiatowo”, w czasie którego mierzono lokalnie zarówno przemieszczenia pionowe, jak i poziome oznaczone odpowiednio jako  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_3$ .



Rys. 1. Rozwój odkształceń pionowych i bocznych w standardowym badaniu trójosiowego ścisnania zagęszczonego piasku „Lubiatowo”, (dwa pierwsze cykle obciążenia)

Fig. 1. Development of axial and radial strains in standard triaxial compression test of dense „Lubiatowo” sand, (first two loading cycles)

Przy interpretacji wyników doświadczeń przyjęto powszechnie stosowaną w mechanice gruntów notację, w której znak „+” odpowiada ścisnaniu. Niemniej dla lepszego porównania, odkształcenia poziome zostały na rys. 1 wykreślone po dodatniej stronie osi  $x$ . Badania te wykonano w aparacie trójosiowego ścisnania firmy GDS Instruments wyposażonym w lokalne czujniki typu Halla do pomiaru przemieszczeń. Wyniki przedstawione na rys. 1

wyraźnie wskazują, że właściwa interpretacja testów trójosiowego ściskania nie może ograniczać się do uzależniania przyrostu naprężenia tylko od jednej składowej tensora odkształcenia, gdyż jest to przypadek jednowymiarowy, lecz powinna uwzględniać również rozwój odkształceń poziomych. Dotyczy to szczególnie praw konstytutywnych, które mają postać ogólną, zapisaną w funkcji niezmienników odpowiednich tensorów.

Problem wiarygodnego pomiaru odkształceń rozwijających się w próbce gruntu w teście trójosiowego ściskania rozpoznano już dość dawno, por. [1]. Skutkowało to rozwojem różnych technik opartych na lokalnym pomiarze odkształceń wewnątrz komory trójosiowej i wypracowywaniem zunifikowanych metod badawczych w tym zakresie. W przypadku odkształceń pionowych wykorzystuje się w tym celu pomiar względnej deformacji próbki pomiędzy dwoma punktami odniesienia zlokalizowanymi poniżej górnego i powyżej dolnego końca próbki, tak aby wyeliminować z pomiaru strefy potencjalnych niejednorodności ośrodka gruntowego. Dotyczy to szczególnie gruntów sypkich, gdzie wpływ niejednorodności na końcach rekonstruowanej próbki bywa bardzo znaczący.

Z kolei, pomiar odkształceń poziomych jest możliwy bądź to poprzez pomiar za pomocą czujników do lokalnego pomiaru przemieszczeń instalowanych bezpośrednio na próbce, lub pośrednio za pomocą pomiaru zmiany objętości. W przypadku pierwszej metody pomiar dokonywany jest czujnikiem mierzącym bezpośrednio lokalne zmiany średnicy próbki w trakcie badania (zazwyczaj w połowie jej wysokości). Zgodnie z dotychczasową wiedzą, na świecie nie wypracowano jeszcze przekonującej metody bezpośredniego pomiaru zmian, jakich doznaje próbka w kierunku radialnym, wzdłuż całej swojej wysokości. W związku z tym zastępczo pozostaje lokalny pomiar odkształceń. Druga metoda dotyczy wyłącznie próbek całkowicie nawodnionych, ze swobodnym odpływem wody z porów gruntowych. W metodzie pośredniej odkształcenia poziome próbki są obliczane na podstawie zewnętrznie lub lokalnie mierzonych wartości odkształceń pionowych oraz objętości wody wypychanej lub zasysanej przez próbkę. Tak więc mierząc równolegle zmiany objętości oraz odkształcenia pionowe, można wyznaczyć wartości odkształceń bocznych.

Pomijając ograniczonosc pierwszej metody do próbek całkowicie nasyconych, druga metoda jest zdecydowanie bardziej wiarygodna, szczególnie przy zastosowaniu lokalnych czujników, pozwalających na pomiar w zakresie b. małych odkształceń poniżej  $10^{-3}$ , lecz również niepozbawiona wad związanych np. z pomiarem zmiany średnicy próbki jedynie w jednej płaszczyźnie oraz innymi wadami dotyczącymi stosowania czujników lokalnych.

Najbardziej rozpowszechnione są trzy podstawowe typy czujników: czujniki typu LDT (Local Deformation Transducers), czujniki zbliżeniowe typu PT (Proximity Transducers) oraz czujniki bazujące na efekcie Halla. Istnieją również systemy trójosiowe, wykorzystujące lokalne czujniki do pomiaru odkształceń typu LVTD (Linear Variable Differential Transducers – czujniki indukcyjne wysokiej rozdzielczości) stosowane np. we Francji (np. w Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat – por. np. [2]) czy też mikroskalowe inklinometry tak jak w przypadku systemów użytkowanych w Imperial College. Systemy te nie są jednak tak popularne jak wymienione wcześniej.

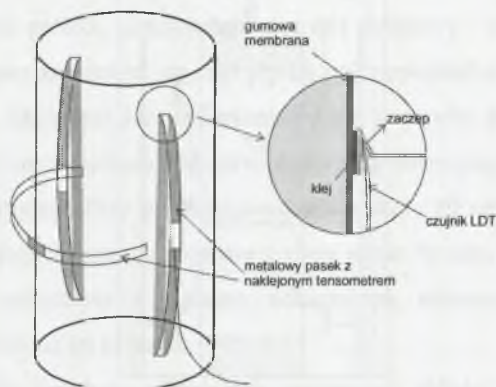
W artykule omówiono trzy podstawowe typy czujników do lokalnego pomiaru odkształceń w aparatach trójosiowego ściskania. Wskazano na wady i zalety każdego z nich. Dwa z tych czujników, tj. czujniki zbliżeniowe oraz Halla, są na wyposażeniu Laboratorium Zakładu Geomechaniki IBW PAN, tak więc podane w artykule informacje zostały zweryfikowane podczas wieloletnich badań laboratoryjnych realizowanych przez Autora [3].

## 2. Czujniki typu LDT

Czujniki typu LDT skonstruowano na Uniwersytecie Tokijskim, gdzie są stosowane już od kilkunastu lat. Są to cienkie paski sprężystego metalu (fosforobrazu), w rodzaju obejm, z naklejonym na nich tensometrem. W celu pomiaru odkształceń pionowych mocuje się je w dolnej i górnej części próbki, w specjalnych zaczepach przyklejanych do membrany wzdłuż jej bocznych powierzchni w taki sposób, aby cały pasek mógł się swobodnie odkształcać wraz ze skracaniem lub wydłużaniem się próbki. W przypadku odkształceń poziomych czujnik „obejmuje” próbkę w jej środkowej części stykając się z nią jedynie w dwóch miejscach zamocowania umiejscowionych po przeciwległych stronach średnicy próbki. Czujniki LDT umieszcza się w specjalnych zaczepach przyklejanych do membrany w miejscach mocowania. Zasadę montażu i działania czujników LDT pokazano poglądowo na rys. 2.

Sercem czujnika jest tensometr naklejony w jego środkowej części, umożliwiający pomiar wielkości odkształcania się czujnika odpowiadającej odkształceniu próbki. Zgodnie z opinią konstruktorów oraz użytkowników, por. [4], podstawowe zalety stosowania czujników LDT to: duża rozdzielczość pomiaru dochodząca do wartości  $10^{-6}$  przy zakresie do kilku procent, uniwersalność rozwiązania konstrukcji czujników, umożliwiająca ich wytwarzanie dla dowolnego wymiaru próbek, łatwość własnej produkcji czujników praktycznie

w dowolnym laboratorium, niewielka ilość zajmowanego miejsca, lekkość konstrukcji, możliwość pomiaru odkształceń zarówno w przypadku obciążeń monotonicznych, jak też cyklicznych, odporność na wodę i wysokie ciśnienia.



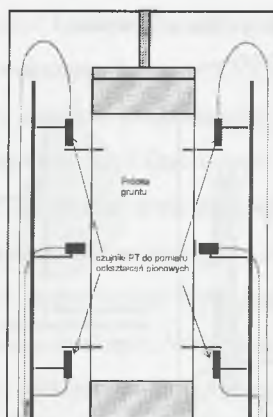
Rys. 2. Konstrukcja i zasada działania lokalnych czujników odkształcenia typu LDT  
Fig. 2. Layout of LDT local deformation gauges

### 3. Czujniki zbliżeniowe typu PT

Czujniki typu PT są bezkontaktowymi czujnikami zbliżeniowymi. Czujniki te umieszcza się na specjalnych prętach, zainstalowanych wewnątrz komory trójosiowej. Pręty te umożliwiają zmianę pozycji czujnika względem próbki. Przemieszczenia pionowe próbki wyznacza się mierząc zmianę odległości pomiędzy dwoma pionowo zorientowanymi czujnikami zlokalizowanymi w górnej i dolnej części próbki na wspólnym przecięciu a odpowiadającymi im punktami referencyjnymi, w postaci zamocowanych do próbki cienkich pasków metalu, najczęściej z aluminium. Przemieszczenia pionowe są średnią z pomiarów dwóch par czujników umiejscowionych po przeciwnych stronach próbki. Z kolei przemieszczenia poziome wyznacza się mierząc zmiany odległości pomiędzy czujnikiem zorientowanym poziomo a próbką. Punkty referencyjne mogą być do próbki przyklejane lub mocowane za pomocą cienkich szpilek, wbijanych w próbkę. Zasadę działania oraz rozmieszczenie czujników PT w komorze aparatu trójosiowego pokazano na rys. 3.

Dokładność pomiaru za pomocą czujników wynosi około  $10^{-5}$ , a maksymalny zakres pomiaru około 2.5 mm. Zalety stosowania zbliżeniowych czujników typu PT to: bezkontaktowy sposób pomiaru eliminujący możliwość lokalnego uszkodzenia próbki podczas montażu czujników, brak wpływu samego czujnika na sztywność badanego ośrodka

gruntowego, możliwość korekcji położenia po zamontowaniu komory trójosiowej, stabilność i powtarzalność pomiarów, możliwość zastosowania do dowolnego wymiaru próbek.



Rys. 3. Lokalny pomiar odkształceń w teście trójosiowego ściskania zbliżeniowymi czujnikami PT  
Fig. 3. Local measurement of strain in triaxial test by proximity transducers (PT)

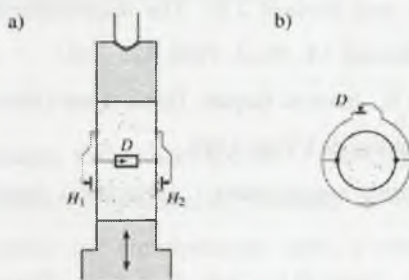
Wadą czujników zbliżeniowych w stosunku do czujników typu LDT jest potrzeba posiadania stelażu w postaci prętów zamontowanych we wnętrzu komory trójosiowej, co jest związane z zupełnie inną konstrukcją komory, w której tłok jest połączony na sztywno z korkiem przykrywającym próbkę od góry (tłoczyskiem), a sama komora jest zakładana po całkowitym zespoleniu próbki z czujnikiem siły i instalacji czujników.

#### 4. Czujniki Halla

Czujniki te, zaprojektowane i skontrolowane przez Clayтона na Uniwersytecie Surrey w Wielkiej Brytanii, wykorzystują tzw. efekt Halla. Efekt ten występuje po umieszczeniu płytki półprzewodnika, przez którą płynie prąd, w polu magnetycznym. Linie strumienia magnetycznego są skierowane prostopadle do płytki i kierunku przepływu prądu, powodując odchylenie nośników ładunków, co z kolei wytwarza w płytce napięcie o kierunku normalnym do kierunku przepływu prądu. Zjawisko to wykorzystano do pomiaru lokalnych zmian deformacji próbki. Konstrukcja czujnika składa się z dwóch części, tj. płytki półprzewodnika oraz magnesu mogącego się po nim swobodnie przesuwać. Wielkość tego przesunięcia jest rejestrowana przez odpowiednie urządzenie. Półprzewodnik i magnes są połączone z niezależnymi uchwytnymi mocowanymi do membrany za pomocą kleju lub wbijanych w próbkę szpilek. Różnica w konstrukcji czujników do pomiaru odkształceń

pionowych i poziomych polega na różnicy w budowie uchwytów. W przypadku czujników do pomiaru odkształceń pionowych są to wąskie płytki z aluminium. Na końcu jednej z nich montuje się półprzewodnik, a na drugiej magnes. Z kolei wolne końce tych płytek mocuje się w dolnej i górnej części próbki, odpowiednio powyżej podstawy i poniżej górnego korka w taki sposób, aby magnes znajdował się nad płytką półprzewodnika i mógł się wzdłuż niej swobodnie przesuwac. Skrócenie lub wydłużenie próbki w wyniku przyłożonego obciążenia powoduje przesunięcie się wzajemne półprzewodnika względem magnesu i jest rejestrowane przez urządzenie rejestrujące. Przy próbce o wysokości około 80 mm, odległość od końców próbki od płytek mocujących czujniki pionowe wynosi około 50 mm, co oznacza, że 15 mm z każdego końca jest wyłączone z pomiaru odkształceń, eliminując błędy związane z niejednorodnością próbek na jej końcach.

Z kolei czujnik do pomiaru odkształceń poziomych składa się z dwóch połówek pierścienia wykonanego również z aluminium, tworzących obejmę okalającą próbkę. Z jednej strony połowki te połączone są za pomocą miękkiego sprężystego drutu umożliwiającego swobodne zwiększanie średnicy obejmy wraz z poszerzaniem się próbki. Na końcach obu połówek zamontowano półprzewodnikowy chip i magnes w taki sposób, że w trakcie poszerzania średnicy czujnika jego koniec przesuwac się po płytce półprzewodnika. Kolejne zmiany położenia w wyniku zmian odkształceń radialnych próbki są przekazywane do urządzenia zbierającego dane w postaci zmian napięcia, a następnie do komputera, gdzie z kolei, wykorzystując krzywą kalibracji półprzewodnika, przelicza się na odpowiadające mu zmiany odkształcenia bocznego.



Rys. 4. Pomiar lokalnych odkształceń za pomocą czujników Halla  
Fig. 4. Local measurement of strains in terms of Hall effect gauges

Schemat czujników zamontowanych na próbce pokazano na rys. 4. Zastosowany chip półprzewodnikowy jest bardzo lekki i stosunkowo mały. Cały czujnik zaprojektowano w taki

sposób, aby istotna część jego ciężaru była zneutralizowana przez siłę wyporu. Dokładność pomiaru czujnika wynosi  $5 \cdot 10^{-5}$  mm, a zakres około 2.5 mm.

## 5. Podsumowanie

W podsumowaniu należy podkreślić, że wiarygodna ocena reakcji gruntu na obciążenie w badaniach trójosiowego ściskania w zakresie małych odkształceń musi być oparta na lokalnym pomiarze odkształceń, choć również i taki pomiar nie jest wolny od wad. Są one głównie związane z faktem, że pomiar lokalny odbywa się co najwyżej w wybranych płaszczyznach. Dotyczy to szczególnie pomiaru odkształceń radialnych, które ze względu na charakter deformowania się walcowej próbki w formę beczki są obarczone błędem. Kolejną wadą jest instalacja czujników, która wymaga dość dużej wprawy i doświadczenia, a w przypadku rekonstruowanych próbek z gruntów sypkich wprowadzenia do próbki niewielkiego podciśnienia rzędu 15 – 20 kPa. Kolejny problem jest związany z mocowaniem czujników na próbce wymagającym bądź to ich przyklejenia, bądź zamocowania za pomocą szpilek przekuwających membranę. Poprzez penetrację w głąb próbki ta druga metoda zapewnia pomiar rzeczywistego odkształcenia badanego ośrodka gruntowego, a nie np. samej membrany. Wymaga to jednak bardzo starannego uszczelnienia miejsca mocowania szpilek i skutkuje całkowitym zniszczeniem membrany w trakcie pojedynczego badania.

## Literatura

1. Jardine R.J., Symes M.J. and Burland J.B.: The measurement of soils stiffness in the triaxial apparatus. *Geotechnique* 34., No.3, 1984, 323-340.
2. Di Benedetto H., Ibrahim E.: Internal Report. Department Genie Civil et Batiment, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 1996.
3. Świdziński W.: Mechanizmy zagęszczania i upłynniania gruntów sypkich. Wyd. IBW PAN, 2006.
4. Tatsuoka F., Modoni G., Jiang G.L., Anh Dan L.Q., Flora A., Matsushita M. and Koseki J.: Stress-strain Behaviour at Small Strains of Unbounded Granular materials and its Laboratory Tests. keynote lecture, Proc. of Workshop on Modelling and Advanced testing for Unbounded Granular Materials (Correia eds.), Balkema, Lisboa 1999, 17-61.