

Małgorzata JASTRZĘBSKA
Politechnika Śląska

POMIAR MAŁYCH ODKSZTAŁCEŃ W LABORATORIUM GEOTECHNIKI POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ NA TLE OSIĄGNIĘĆ ŚWIATOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono krótki przegląd systemów wewnętrznego pomiaru małych odkształceń próbek gruntu, stosowanych na świecie i w laboratorium geotechniki Politechniki Śląskiej. Zwrócono uwagę na różnice w zewnętrznym i wewnętrznym pomiarze odkształceń, na zmianę sztywności gruntu w zakresie odkształceń $10^{-5} \div 10^{-2}$ oraz na wszechstronność badań w aparacie trójosiowego ściskania.

VERY SMALL STRAINS MEASUREMENT IN THE TECHNICAL UNIVERSITY OF SILESIA AGAINST THE BACKGROUND OF GLOBAL ACHIEVEMENTS

Summary. The paper presents a short review of internal measurement systems of the specimen's small strains employed both in the world and in a geotechnical laboratory in Gliwice. Difference of external and internal strain measurements, the stiffness values for a strain range from 10^{-5} to 10^{-2} and the versatility of the triaxial tests is taken into account.

1. Wstęp

Grunty, jako materiały odznaczające się nie tylko złożoną budową strukturalną, lecz także olbrzymią niejednorodnością, wymagają szczególnego podejścia w celu ustalenia ich właściwości. Na to postępowanie składają się coraz bardziej skomplikowane badania doświadczalne, przeprowadzane na coraz precyzyjniejszej aparaturze pomiarowej oraz wyrafinowane modele konstytutywne materiału, wykorzystujące komputerowe metody obliczeniowe. Oczywiście, im bardziej skomplikowany model konstytutywny gruntu, tym trudniejsze staje się określenie jego parametrów, co pociąga za sobą większą dbałość o warunki przeprowadzania badań oraz ostrzejsze kryteria w ich spełnianiu.

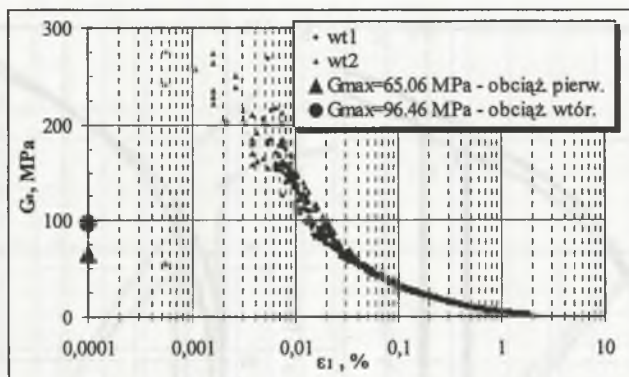
Podstawą dla wielu współcześnie stosowanych modeli konstytutywnych gruntu, uwzględniających m. in. cykliczność obciążeń, jest stwierdzenie, iż dominującą rolę w odkształceniach ośrodka gruntowego pełnią deformacje nieodwracalne, pojawiające się już przy niewielkich odkształceniach całkowitych ($\epsilon_s = 10^{-6} \div 10^{-5}$) i zwiększające systematycznie swój udział wraz z ich wzrostem. Dowodów na to dostarczają między innymi badania Jardine'a [10], z których wynika, że w dowolnym punkcie obszaru prekonsolidacji, po ostrym zwrocie ścieżki naprężenia, pojawiają się duże sztywności ścinania i ściśliwości – $G_{\max}(p,q)$ i $K_{\max}(p,q)$, gwałtownie malejące wraz ze wzrostem odkształceń odpowiednio postaciowych i objętościowych.

Powszechnie stosowanym urządzeniem do badań zależności między stanami naprężenia i odkształcenia gruntu jest konwencjonalny aparat trójosiowego ściskania, którego wszechstronność i popularność w wykorzystaniu w laboratoriach geotechnicznych przyczyniła się do dynamicznego rozwoju jego konstrukcji na przestrzeni ostatnich lat. I tak, jednym z jego podstawowych elementów wyposażenia jest system wewnętrznego pomiaru odkształceń próbek gruntu. Krótki przegląd tych systemów stosowanych na świecie, a także i w laboratorium geotechniki Politechniki Śląskiej, będzie przedstawiony w dalszej części artykułu.

2. Rozwój metod wewnętrznego pomiaru odkształceń próbek

Znaczenie precyzji pomiaru bardzo małych odkształceń ma związek z silną nieliniowością związków „naprężenie-odkształcenie” w tym właśnie zakresie, odkrytą i potwierdzoną wieloma doświadczeniami w ostatnich dwóch dekadach (np. Jardine i inni, [11]; Georgiannou i inni, [7]; Atkinson i Sallfors, 1991; Goto i inni, [8]; Lipiński, [14], Lipiński i Wolski, [14]; Jastrzębska, [12]).

Przykład istnienia tak silnej nieliniowości związków „naprężenie-odkształcenie” w zakresie bardzo małych odkształceń przedstawiła autorka na rysunku 1 na podstawie badań własnych, obejmujących swym zakresem badania ścinania „z drenażem” do stanu krytycznego po izotropowej konsolidacji, z odciążeniem i powtórным ścinaniem [12]. Badania te zostały wykonane na stanowisku do badań trójosiowych, wyposażonym w komorę wraz z czujnikami do pomiaru mikroprzemieszczeń oraz z wbudowanymi elementami typu bender.

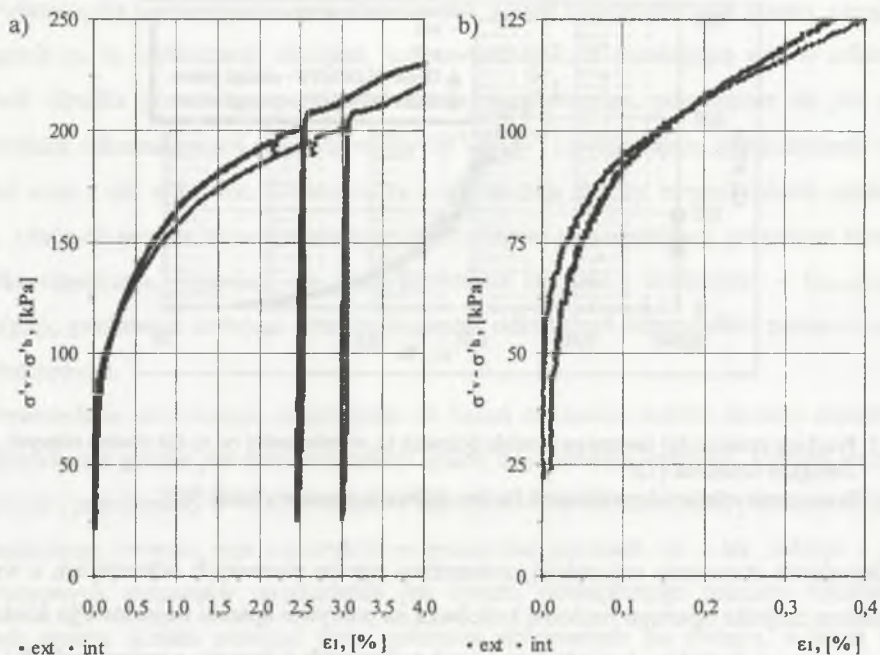


Rys. 1. Przebieg zmienności siecznego modułu ścinania G_s w zależności od ϵ_1 dla dwóch różnych obciążeń wtórnych [12]

Fig. 1. Stress-strain relationship estimated for two different secondary loads [12]

Dotychczas stosowany najczęściej, zewnętrzny pomiar pionowych odkształceń, z wykorzystaniem czujnika opartego ruchomą końcówką na pokrywie aparatu trójosiowego ściskania i zamocowanego do tłoka, nie spełnia wymagań związanych z precyzją pomiaru małych i bardzo małych wartości składowych odkształcenia. Mierzone wartości przemieszczeń obarczone są znacznymi niepewnościami pomiarowymi, na które wpływają: podatność kamienia porowatego i warstw smaru, a także imperfekcje styku próbki z kopułką. Ponadto w skrajnych strefach próbki pojawia się wyraźna niejednorodność stanu odkształcenia (tendencja do beczułkowatego kształtu).

Powyższe niedoskonałości zewnętrznego pomiaru odkształceń skierowały uwagę badaczy na pomiar wewnętrzny, zlokalizowany w środkowej strefie próbki i dokonywany bezpośrednio na jej powierzchni. Był on wolny od niejednorodności występującej na końcówkach i od głównych przyczyn niepewności pomiarowych. Sensowne stało się w związku z tym poszukiwanie czujników o dużej rozdzielczości. Przesunęły one wydatnie dolną granicę dokładnych pomiarów. Przeszkodę na tej drodze stanowiły przede wszystkim trudności w kalibrowaniu czujników.

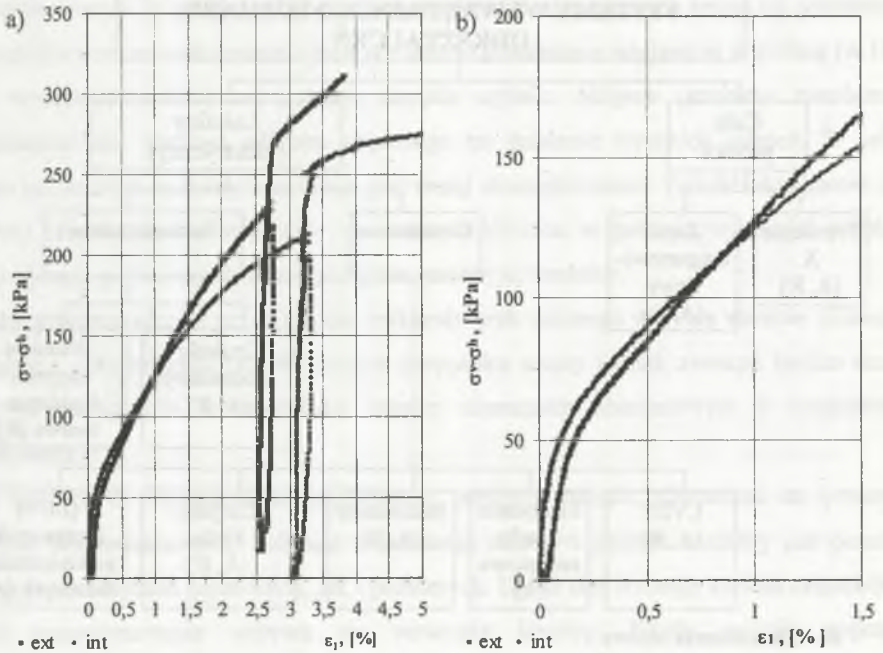


Rys. 2. Porównanie charakterystyk „naprężenie – odkształcenie” z badania w aparacie trójosiowego ściskania w warunkach bez odpływu (TXCIU) dla zewnętrznego (external) i wewnętrznego (internal) pomiaru przemieszczeń, a) w pełnym zakresie przemieszczeń, b) w początkowym zakresie przemieszczeń ($\epsilon_1=0.001 + 0.004$)

Fig. 2. Comparison of internal and external strains for undrained triaxial tests (TXCIU), a) for the entire range of strains, b) for a beginning range of strains ($\epsilon_1=0.001 + 0.004$)

Na rysunkach 2 i 3, na podstawie badań własnych autorki, przedstawiono rozbieżności w charakterystyce „naprężenie-odkształcenie” wynikające z różnicy w sposobie pomiaru przemieszczeń próbki: zewnętrznego bądź wewnętrznego. Badania te dowodzą konieczności stosowania wewnętrznego pomiaru odkształceń próbki.

Na świecie rozwinięto i udoskonalono kilkanaście metod wewnętrznego pomiaru odkształceń próbki, jednak nie wszystkie znalazły szerokie zastosowanie, choćby ze względu na ich koszt, skomplikowanie i specjalne wymagania. Klasyfikację systemów wewnętrznego pomiaru odkształceń próbek gruntu w aparatach trójosiowego ściskania przedstawiono na rysunku 4 [16].

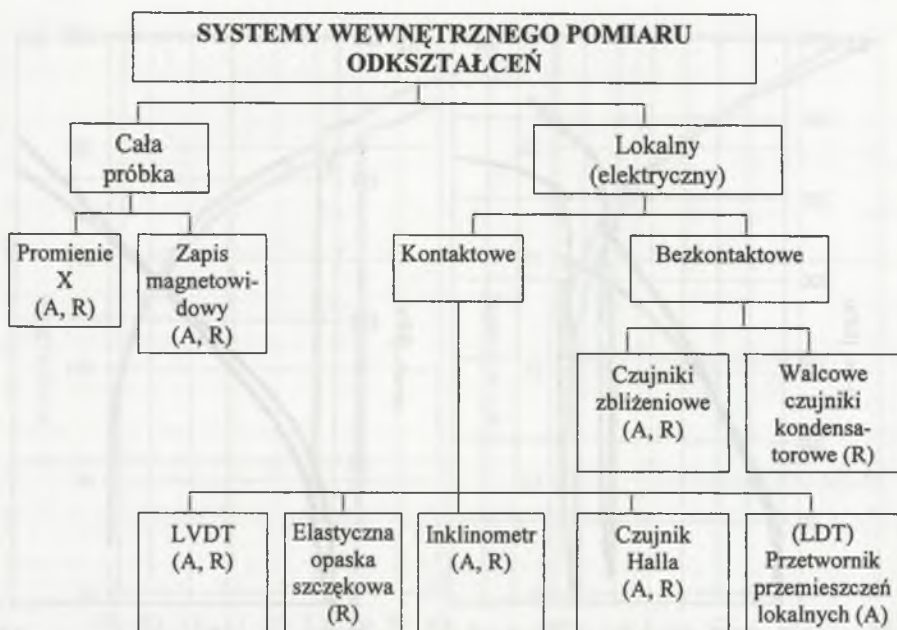


Rys. 3. Porównanie charakterystyk „naprężenie – odkształcenie” z badania w aparacie trójosiowego ściskania w warunkach z odpływem (TXCID) dla zewnętrznego (external) i wewnętrznego (internal) pomiaru przemieszczeń, a) w pełnym zakresie przemieszczeń, b) w początkowym zakresie przemieszczeń ($\epsilon_1=0.001 \div 0.015$)

Fig. 3. Comparison of internal and external strains for drained triaxial test (TXCID), a) for the entire range of strains, b) for a beginning range of strains ($\epsilon_1=0.001 \div 0.015$)

Z kilku najbardziej przystępnych rozwiązań z zastosowaniem lokalnych elektrycznych czujników kontaktowych (rys. 4) najszersze zastosowanie znalazły mierniki Burlanda i Symesa [3] na bazie inklinometru oraz Claytona i innych [4] na bazie czujnika Halla. Z kolei wśród elektrycznych czujników bezkontaktowych dużą popularnością cieszą się tzw. zbliżeniowe przetworniki, stosowane także w badaniach w Katedrze Geotechniki Politechniki Śląskiej.

Poniżej granicy dokładnego pomiaru lokalnego w aparatach trójosiowych pozostają tylko metody dynamiczne realizowane w kolumnach rezonansowych oraz w aparatach trójosiowych z piezoelementami typu bender, które uzupełniają charakterystyki „ $\epsilon_s - G$ ”, „ $\epsilon_v - K$ ” w zakresie bardzo małych deformacji ($<0.005\%$).



A – odkształcenia osiowe

R – odkształcenia radialne

Rys. 4. Klasyfikacja systemów wewnętrznego pomiaru odkształceń próbek gruntu w aparacie trójosiowego ściskania (wg Scholeya i innych [16])

Fig. 4. Classification of triaxial internal-strain measuring techniques ([16])

3. System pomiaru małych odkształceń próbki w Katedrze Geotechniki Politechniki Śląskiej

Początki badań z zastosowaniem bezkontaktowych czujników zbliżeniowych przypadają na lata siedemdziesiąte (np. Cole [5]; Khan i Hoag [13]; Brown i inni, [2]), a kontynuowali je m.in. Dupas i in. [6].

Obecnie w Katedrze Geotechniki Politechniki Śląskiej pomiar małych odkształceń próbki gruntu także realizowany jest przy użyciu bezkontaktowych czujników mikroprzemieszczeń, których rozdzielczość pomiarowa wynosi 1 mikron przy bardzo wysokiej powtarzalności i stabilności odczytów. Schemat takiego czujnika, firmy Kaman Instrumentation z USA, przedstawiono na rysunku 5.

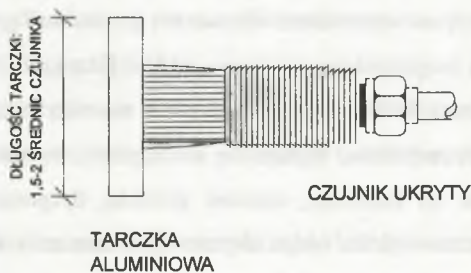
Zasada pomiaru opiera się na zmianie natężenia pola prądów wirowych powodowanego przez przemieszczenie elementu aluminiowego w tym polu. Szytwny element aluminiowy

jest przymocowany do próbki, co pozwala na rejestrację najmniejszych zmian jej położenia. 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. W celu pomiaru odkształceń radialnych sytuacja jest mniej skomplikowana. Tarczki aluminiowe są po prostu przyklejane do membrany na warstwie silikonu w połowie wysokości próbki. Zmiana obwodu próbki rejestrowana jest przez zmianę jej średnicy.

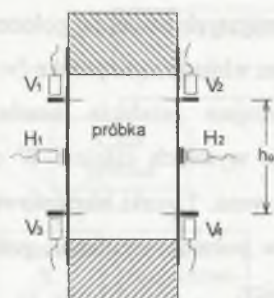
Próby przeprowadzone przez autorkę wykazały brak istotnego wpływu warstwy silikonu na mierzone odkształcenia [9]. W każdym przypadku należy jednak zwracać bardzo dużą uwagę na zachowanie równoległości między elementem aluminiowym a czujnikiem zbliżeniowym [17].

Na rysunku 6 przedstawiono konfigurację pomiaru małych odkształceń za pomocą czujników bezkontaktowych. Schemat przedstawia układ, w którym możliwy jest pomiar zarówno przemieszczeń pionowych, jak i poziomych. Układ taki wymaga sześciu czujników, których pozycjonowanie odbywa się wewnątrz komory. Każdy czujnik poprzez modulator/demodulator połączony jest z komputerem.

Z kolei wygląd ogólny układu sześciu czujników do pomiaru mikroprzemieszczeń w kierunku pionowym i poziomym pokazano na rysunku 7.

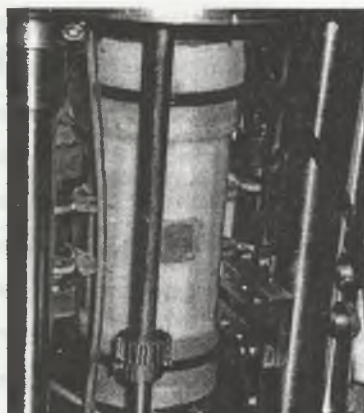


Rys. 5. Schemat czujnika mikroprzemieszczeń
Fig. 5. Scheme of the non-contact proximity transducer



Rys. 6. Konfiguracja podstawowa układu sześciu czujników do pomiaru mikropromienników

Fig. 6. Non-contact proximity transducers basic configuration



Rys. 7. Widok próbki wraz z układem sześciu czujników do wewnętrznego pomiaru przemieszczeń pionowych i poziomych

Fig. 7. Specimen with the 6 non-contact proximity transducers for local measurements of axial and radial deformations

4. Podsumowanie

W sytuacji, kiedy w Polsce nie ma specjalistycznej aparatury, takiej jak kolumny rezonansowe, które pozwalają na wyznaczenie sztywności (modułów) gruntu w zakresie małych odkształceń poprzez ich bezpośrednie zadawanie, wykorzystanie do oceny sztywności gruntu techniki pomiaru prędkości fal akustycznych łącznie z wewnętrznym pomiarem odkształceń próbki za pomocą mikroczytników, wydaje się szczególnie, merytorycznie i ekonomicznie uzasadnione. W świetle tej konkluzji, ośrodek gliwicki, dysponujący obecnie jednym z najnowocześniejszych stanowisk do badań trójosiowych, zamierza w przyszłości wzbogacić aparaturę o układ przetworników piezoelektrycznych.

LITERATURA

1. Atkinson J.H., Salfors G.: Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in situ tests General report, Proc. 10th ECSMFE, Firenze, 1991, Vol. 3, pp. 915-956.

2. Brown S.F., Austin G., Overy R.F.: An Instrumented Triaxial Cell for Cyclic Loading of Clays, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 1980, Vol. 3, No. 4, pp. 145-152.
3. Burland J.B., Symes M.: A simple axial displacement gauge for use in triaxial apparatus, *Géotechnique*, 1982, 32, 1, pp. 62-65.
4. Clayton C.R.I., Khatrush S.A., Bica A.V.D, Siddique A.: The use a Hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation, *Geotech, Testing J.*, 1989, 12, pp. 67-91.
5. Cole D.M.: A Technique for Measuring Radial Deformation during Repeated Load Triaxial Testing, *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, Vol. 15, pp. 426-429.
6. Dupas J.M., Pecker A., Bozetto P., Fry J.J.: A 300 mm Diameter Triaxial Cell with a Double Measuring Device, *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, Eds. Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney and Marshall L. Silver, 1988, pp.132-142.
7. Georgiannou V.N., Rampello S., Silvestri F.: Static and dynamic measurements of undrained stiffness on natural over consolidated clays, *Proc. 10th ECSMFE*, Firenze, 1991, pp. 91-95.
8. Goto S., Tatsuoka F., Shibuya S., Kim Y.S., Sato T.: A simple Gauge for local small strain measurements in the laboratory, *Soils and foundations*, 1991, No. 1.
9. Hird C.C., Yung P.C.Y.: The Use of Proximity Transducers for Local Strain Measurements in Triaxial Tests, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 1989, Vol. 12, No. 4, pp. 292-296.
10. Jardine R.J.: Some observations on the kinematic nature of soil stiffness, *Soils of Foundations*, 1992, 32, 2, pp. 111-124.
11. Jardine R.J., Potts D.M., Fourie A.B., Bourland J.B.: Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil – structure interaction, *Géotechnique*, 1986, 36, 3, pp.377-396.
12. Jastrzębska M.: Kalibrowanie i weryfikacja jednopowierzchniowego sprężysto-plastycznego modelu gruntu o silnie nieliniowym wzmocnieniu anizotropowym, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Śląska, Gliwice 2002.
13. Khan M.H., Hoag D.L.: A Noncontacting Transducer for Measurement of Lateral Strains, *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, Vol. 16, No. 2, pp. 409-411.
14. Lipiński M.J.: Undrained response of cohesionless soils to monotonic loading, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2000.
15. Lipiński M.J., Wolski W.: Onset conditions of liquefaction, *proceedings of the XVth ICSMGE*, Istanbuł, 2001, Vol. 1, 1.1, pp. 187-190.

16. Scholey G.K., Frost J.D., Lo Presti D.C.F., Jamiolkowski M.: A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, 1995, Vol. 18, No. 2, pp. 137-156.
17. Tatsuoka F.: 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 1988, pp. 7-67.

Recenzent: Dr hab. inż. Alojzy SZYMAŃSKI, prof. SGGW

Abstract

Conventional procedures to determine deformations during triaxial tests are based on measurements made externally to the cell. This practice is inadequate, particularly if the small strain stiffness of the soil is being investigated, because errors are introduced, which limit the accuracy and resolution of the measurements. The errors can only be eliminated if axial strains are determined internally, within the cell, and locally over the central one third of the specimen. Likewise, the radial dimensions should be monitored at specimen mid-height. In the light of the above, the intention of this paper has been to make a short review of instrumentation systems available for internal small-strain measurements in both axial and radial directions. Particular attention was devoted to the stiffness at very small strain level (from 10^{-5} to 10^{-2}), which violently decreases in this range. Local measurements of axial and radial deformations in a triaxial test are suggested to obtain more reliable data, to increase the precision in stiffness measurements at very small strains, so it is worth to emphasise that the data can be compared to and combined with other tests from Resonant Column and Bender Element. Laboratory equipment and procedure used in the Department of Geotechnics in PŚI was described.