

# Bezprzewodowy pomiar ciśnienia wody w porach gruntu w aparacie trójosiowego ściskania

Wireless measurement of water pressure in the soil pores in the triaxial compression apparatus

dr Marcin Witowski (ORCID: 0000-0001-6178-3852), asystent,  
Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa

DOI 10.5604/01.3001.0053.8521

**Streszczenie:** Aparat trójosiowego ściskania jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych w laboratoriach geotechnicznych urządzeń badawczych służących do określania parametrów charakteryzujących zachowanie się gruntów pod względem wytrzymałości i sztywności. Urządzenie to ma możliwość pomiaru szeregu kluczowych parametrów, wśród których zasadniczą rolę odgrywa pomiar siły osiowej, odkształcenia osiowego oraz ciśnienia wody porowej w gruncie. Wskazane w normie europejskiej (Eurokod 7) podejście w zakresie projektowania geotechnicznego i sprawdzania stanów granicznych wymaga korzystania z parametrów efektywnych. Tym samym ich oznaczanie w warunkach laboratoryjnych wymaga prawidłowej (w zakresie procedury nasycania) i poprawnej (w zakresie lokalizacji pomiaru) rejestracji ciśnienia wody w przestrzeni porowej gruntu w trakcie badania. Standardowo pomiar tego ostatniego parametru wykonywany jest w dolnej części próbki lub w bardziej zaawansowanej formie, w połowie wysokości próbki. To drugie podejście jest bardziej miarodajne, ale wprowadza jednak wymóg przzerwiania ciągłości membrany otaczającej próbkę gruntu, co może prowadzić do niekontrolowanej penetracji wody z komory do wnętrza próbki. Rozwiązaniem tej niedogodności było opracowanie autorskiego projektu czujnika objętego postępowaniem patentowym. Zapewnienie pomiaru bezpośredniego na próbce przy jednoczesnym uniknięciu potencjalnej nieszczelności było możliwe poprzez zastosowanie nowatorskiego czujnika, który mierzy ciśnienie wody w porach gruntu i w sposób bezprzewodowy przesyła wyniki na zewnątrz komory. W artykule przedstawiono opis tego rozwiązania oraz sposób integracji nowego czujnika z rejestratorem i pozostałymi komponentami zestawu aparatu „trójosiowego” ściskania. Skuteczność zaproponowanego rozwiązania wykazano poprzez przeprowadzenie pełnej kalibracji wyników uzyskiwanych z czujnika. Uzyskane wyniki wykazały skuteczności zastosowanego bezprzewodowego czujnika do bezpośredniego pomiaru ciśnienia wody w gruncie.

**Słowa kluczowe:** pomiar ciśnienia wody w porach gruntu w połowie wysokości próbki, badanie trójosiowego ściskania gruntu, bezprzewodowy czujnik ciśnienia wody w porach gruntu.

**Abstract:** The triaxial compression apparatus is one of the most popular research devices in geotechnical laboratories used to determine the parameters characterizing the behavior of soils in terms of strength and stiffness. This device has the ability to measure a number of key parameters, among which the measurement of axial force, axial deformation and pore water pressure in the ground plays an essential role. The approach to geotechnical design and limit state verification indicated in the European standard (Eurocode 7) requires the use of effective parameters. Thus, their determination in laboratory conditions requires correct (in terms of the saturation procedure) and correct (in terms of measurement location) recording of water pressure in the soil pore space during the test. As a standard, the measurement of the latter parameter is performed in the lower part of the sample, or in a more advanced form, in the middle of the sample's height. The latter approach is more reliable, but it introduces a requirement to break the continuity of the membrane surrounding the soil sample, which may lead to uncontrolled penetration of water from the chamber into the sample. The solution to this inconvenience was the development of a proprietary sensor design covered by patent proceedings. Providing direct measurement on the sample while avoiding potential leakage was possible by using an innovative sensor that measures the water pressure in the soil pores and wirelessly sends the results outside the chamber. The article presents a description of this solution and the method of integrating the new sensor with the recorder and other components of the triaxial compression apparatus set. The effectiveness of the proposed solution was demonstrated by carrying out a full calibration of the results obtained from the sensor. Validation of the results was performed on several series of tests carried out on several types of soils with different filtration properties. The obtained results showed the effectiveness of the wireless sensor used for direct measurement of water pressure in the ground.

**Keywords:** Soil pore pressure measurement at half height of the sample, triaxial soil compression test, wireless pore water pressure sensor.

## 1. Wprowadzenie

Parametry efektywne uzyskiwane z badania gruntu w aparacie trójosiowego ściskania są jednym z podstawowych sposobów rozpoznania charakterystyki „naprężenie – odkształcenie”

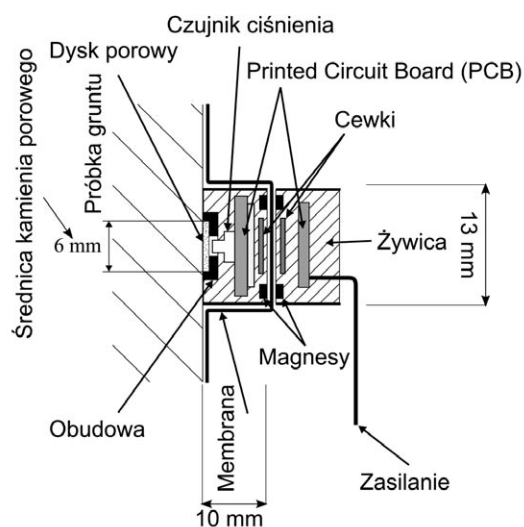
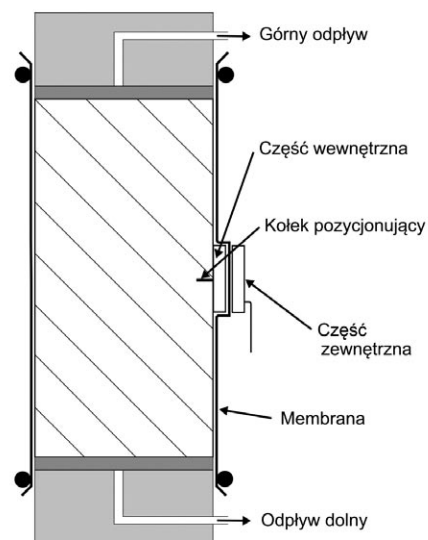
gruntu [4]. Głównym założeniem leżącym u podstawy tych badań jest pomiar siły pionowej, odkształcenia osiowego i radialnego oraz ciśnienia wody porowej w gruncie generowanego w czasie konsolidacji i ścinania. Pomiar ciśnienia wody w porach gruntu z uwagi na konstrukcję komory trójosiowej

jest zwykle prowadzony za pomocą czujnika zamontowanego w określonej odległości od próbki. Metoda ta opierająca się na pomiarze tego parametru w podstawie próbki może wprowadzać niepewność wynikającą między innymi z gradientu ciśnienia w objętości próbki, wpływu odległości urządzenia pomiarowego od próbki, co może w konsekwencji wpływać na wyznaczoną ścieżkę naprężeń efektywnych [5, 8]. Jedną z metod uniknięcia tego problemu jest zastosowanie czujnika mierzącego ciśnienie wody porowej na powierzchni próbki gruntu, a dokładniej umieszczonego w połowie jej wysokości [5]. Takie rozwiązanie techniczne jest znane w geotechnice od kilku dekad [13], jednakże rozwiązanie to nie upowszechniło się w praktyce laboratoryjnej z uwagi na szereg problemów z jego praktyczną implementacją. Czujniki napróbkowe mierzące bezpośrednio zmianę ciśnienia wody w próbce gruntu pozwalają na uniknięcie fluktuacji ciśnienia i eliminację niejednorodności ciśnienia porowego w obrębie próbki gruntu [1, 2, 3]. Warte jest podkreślenia, że ich największą zaletą jest skrócenie czasu badania próbek [9–12]. Podejmowane są również próby mające na celu przystosowanie czujnika do badania gruntów nienasyconych [10]. Pomimo dużej liczby zalet czujniki te nie weszły do powszechnej praktyki laboratoryjnej z uwagi na trudności w ich montażu na próbce gruntu, co sprowadza się w głównej mierze do przerywania ciągłości membrany w celu umieszczenia czujnika na próbce [7]. Perforacja ta może w przypadku nieprawidłowego montażu doprowadzić do sytuacji, w której wymagane jest wykonanie powtórnego badania, co przy małej ilości materiału badawczego może być niemożliwe. W artykule przedstawiono nowe rozwiązanie techniczne pozwalające na zamontowanie czujnika mierzącego bezpośrednie ciśnienie wody w porach gruntu bez przerywania ciągłości membrany otaczającej próbkę gruntu. Rozwiązanie to polega na użyciu bezprzewodowego czujnika ciśnienia wody zamontowanego pod membraną oraz zasilanego bezprzewodowo z zewnątrz.

## 2. Budowa czujnika

Czujnik składa się z dwóch części umieszczonych w komorze aparatu trójosiowego (rys. 1). Jedna część to jednostka z umieszczonym w niej mikrokontrolerem, miniaturowym czujnikiem ciśnienia oraz sekcją zasilającą. Część ta znajduje się w bezpośrednim kontakcie z próbką gruntu. Druga część znajduje się na zewnątrz próbki, w której jest cewka zasilająca. Część ta jest utrzymywana w miejscu przez magnesy wbudowane w oba moduły lub jest przyklejona do membrany. Moduły są oparte na zbudowanym we własnym zakresie zestawie elementów elektronicznych wymaganych do działania urządzenia i komunikacji ze stacją bazową znajdującą się na zewnątrz komory trójosiowej (rys. 2). Dostarczony przez producenta czujnik nie wymaga kalibracji, która jest wstępnie zaprogramowana na etapie produkcji, przy czym należy wspomnieć, że wartość tego ciśnienia jest na bieżąco korygowana względem temperatury. Moduł na próbce

**Rys. 1.** Zasada działania bezprzewodowego czujnika ciśnienia wody w porach gruntu



**Rys. 2.** Szczegóły bezprzewodowego czujnika ciśnienia wody w porach gruntu

komunikuje się drogą radiową ze stacją bazową podłączoną do komputera PC. Urządzenie obsługiwane jest przez autorską aplikację sterującą aparatem trójosiowym [14]. Zasilanie dostarczane jest przez moduł mocy oparty na przekazywaniu energii przez indukcję magnetyczną. Ogólne cechy charakteryzujące przetwornik zestawiono w tabeli 1.

W pierwszej kolejności przeprowadzono test walidacji nowego czujnika ciśnienia. Czujnik został odgazowany poprzez umieszczenie w odgazowanej wodzie w naczyniu próżniowym na około 1 godzinę. Następnie umieszczono go w komorze trójosiowej, która następnie została wypełniona wodą destylowaną. Ciśnienie w komorze ustawiano za pomocą regulatora ciśnienia w krokach co 100 kPa, od 0 do 2000 kPa. Wartości uzyskane z bezprzewodowego czujnika ciśnienia porównywano z wartościami z czujnika ciśnienia służącego do pomiaru ciśnienia wody w porach gruntu zainstalowanego w podstawie komory. Czujnik w podstawie skalibrowano przy ciśnieniu 2000 kPa. Charakteryzuje

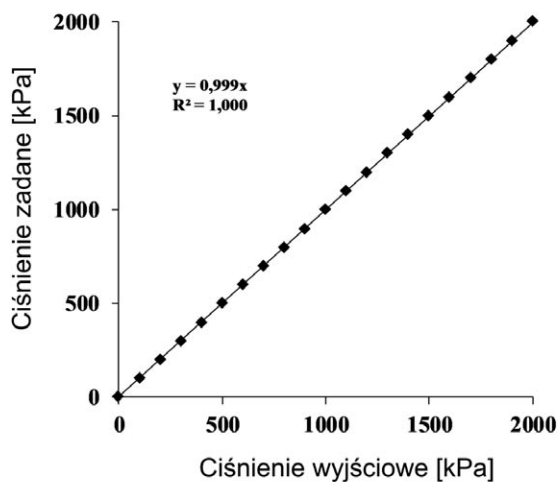
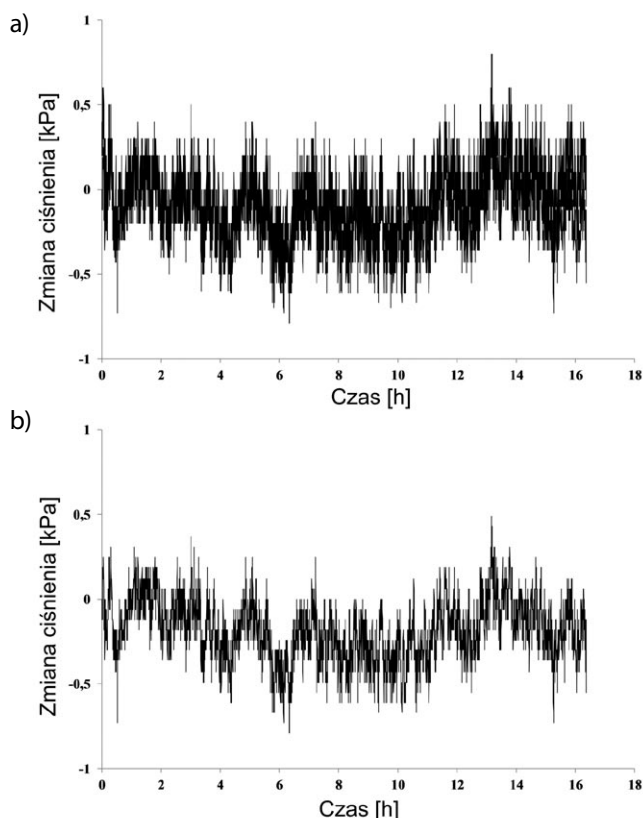
**Tabela 1.** Charakterystyka nowego czujnika

Wymiary części aktywnej (mm) WxDxS	Maksymalne ciśnienie (kPa)	Rozdzielczość pomiaru (kPa)	Dokładność pomiaru (kPa)
10x16x13	3000	0,02	±0,15

się on rozdzielczością 0,1 kPa przy rozszerzonej niepewności pomiarowej  $\pm 2,4$  kPa. Wartości zadane oraz wartości uzyskane przez czujnik bezprzewodowy przedstawiono na rysunku 3. Jak widać, czujnik oferuje niemal doskonały odczyt ciśnienia z wysoką rozdzielczością, aż do maksymalnej wartości ciśnienia 2000 kPa. Ważnym aspektem, który został poddany analizie była stabilność pomiaru ciśnienia w czasie. Walidacja tego parametru została przeprowadzona poprzez umieszczenie czujnika w komorze pod stałym ciśnieniem 500 kPa przy jednoczesnym pomiarze wartości ciśnienia z obu czujników (rys. 4). Należy stwierdzić, że uzyskane wartości ciśnienia wody w komorze dla obu czujników są bardzo zbliżone. Zauważalny jest brak dryftu uzyskanych wartości w trakcie badania.

### 3. Materiał badawczy oraz wyniki

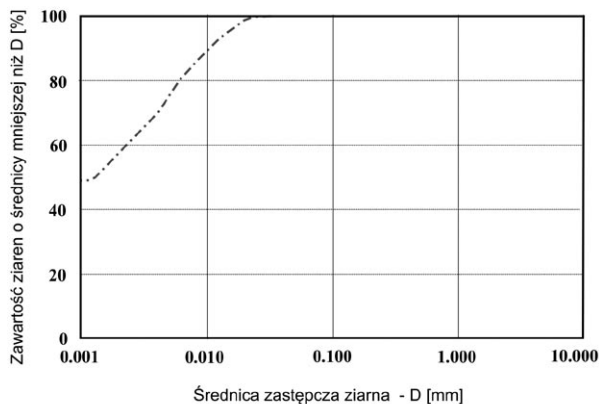
Wstępne wyniki były na tyle obiecujące, że w następnej kolejności przeprowadzono badanie na próbkach gruntów spójnych. Oceniono zachowanie czujnika w przypadku obciążenia monotonicznego, jak również podczas obciążenia cyklicznego. W celu oceny działania czujnika przeprowadzono badania na próbkach kaolinu. Głównym składnikiem mineralnym badanego kaolinu jest kaolinit, który stanowi 60% zawartości, kolejnymi składnikami są kwarc (26%) i mika (12%). Pozostałe minerały stanowią 2% całkowitej zawartości minerałów. Kaolin charakteryzuje się granicą plastyczności wynoszącą  $w_p = 27\%$ , granicą płynności  $w_L = 50\%$ , oraz ciężarem właściwym  $\rho_s = 2,59$  Mg/m<sup>3</sup>. Rozkład uziarnienia badanego kaolinu wyznaczonego na podstawie badania aerometrycznego

**Rys. 3.** Walidacja czujnika**Rys. 4.** Stabilność czujnika w czasie: a) bezprzewodowy czujnik ciśnienia, b) czujnik ciśnienia zamontowany w podstawie komory

przedstawiono na rysunku 5. Materiał do badań przygotowano poprzez wymieszanie suchego gruntu z wodą destylowaną do zawartości wody wynoszącej około 1,2 granicy płynności. Zawiesinę konsolidowano w komorze edometrycznej (średnica 70 mm) do wartości naprężenia pionowego 200 kPa. Obciążenie było przykładane etapowo. Konsolidację kontynuowano do momentu ustania odpływu wody z próbki. Po początkowej konsolidacji, a następnie wyjęciu próbki z formy, próbkę przycięto do wysokości 140 mm. Zgodnie z powyższą procedurą przygotowano trzy próbki (tj. ST-1, ST-2, ST-3), które posłużyły do sprawdzenia działania nowego typu czujnika w badaniach trójosiowych.

Badanie rozpoczęło się w momencie umieszczenia próbki na podstawie komory trójosiowej i zamontowaniu bezprzewodowego czujnika ciśnienia (rys. 1). Kolejnym etapem było założenie gumowej membrany, która była uszczelniona za pomocą o-ringów. Komora w następnym etapie została wypełniona wodą, co pozwalało na przejście do etapu nasycenia prowadzonego metodą ciśnienia wyrównawczego. Nasycenie prowadzono do momentu uzyskania wartości współczynnika Skemptona B powyżej 0,95 [6]. Kolejnym etapem była konsolidacja izotropowa prowadzona do momentu uzyskania wartości naprężenia efektywnego równej 100 kPa. W przypadku próbki ST-1 konsolidację przeprowadzono odprowadzając wodę tylko przez górną linię odpływu, natomiast w przypadku próbek ST-2 i ST-3 odpływ wody umożliwiano jednocześnie przez górną i dolną część próbki. Zgodnie





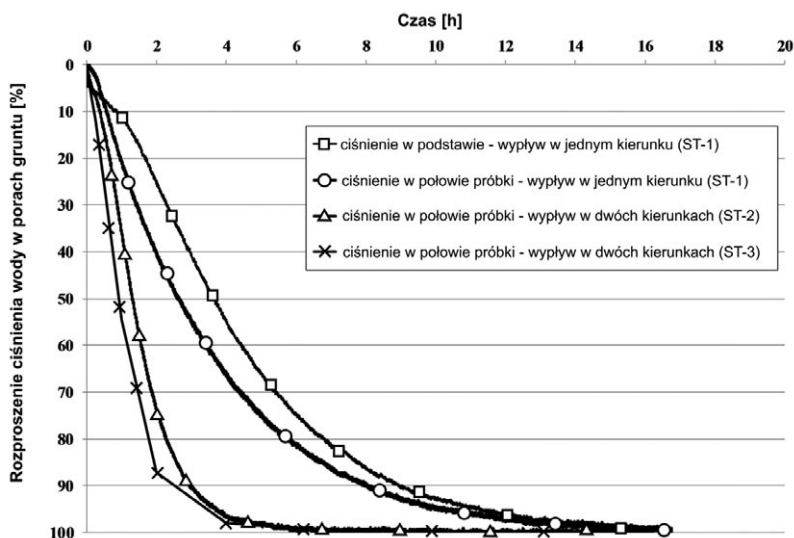
Rys. 5. Wykres uziarnienia kaolinu

z oczekiwaniami w drugim przypadku (próbki ST-2 i ST-3) całkowite rozproszenie ciśnienia wody w porach gruntu nastąpiło około 10 godzin wcześniej niż w przypadku próbki ST-1 (rys. 6). Świadczy to o niezaprzeczalnej przewodze czujnika umieszczonego w połowie wysokości próbki w monitorowaniu procesu konsolidacji próbek gruntów spoistych podczas dwukierunkowego odpływu wody. Próbka ST-1 posłużyła do sprawdzenia czasu reakcji bezprzewodowego czujnika ciśnienia na zadane ciśnienie w komorze. W tym celu szybko zwiększano i zmniejszano ciśnienie w komorze o 20 kPa, a czas reakcji czujników obserwowano, gdy nie było możliwości przepływu wody przez górną i dolną część próbki (rys. 7). Jak można zauważyć, czas reakcji czujnika bezprzewodowego jest krótszy niż jedna sekunda, natomiast czujnik ciśnienia wody w podstawie potrzebuje ponad trzydziestu sekund na osiągnięcie równowagi. Po procesie konsolidacji i badaniach wstępnych przeprowadzono badanie ścinania zgodnie z założonym programem. Próbka ST-2 została poddana klasycznej próbie monotonicznego ścinania bez odprowadzania wody z próbki (badanie typu CU), przy stosunkowo dużej prędkości 0,35 mm/min. Próbka ST-3 została poddana, w pierwszym etapie, obciążeniu cyklicznemu bez możliwości odprowadzenia wody z próbki, przy amplitudzie dewiatora równej 15 kPa i 12 cyklach obciążenia oraz okresie 30 minut. Po zakończeniu pierwszego etapu próbkę ST-3 poddano ponownie obciążeniu cyklicznemu, ale tym razem o amplitudzie dewiatora podwyższonej do wartości 20 kPa i 10 cyklach z okresem 1 minuty.

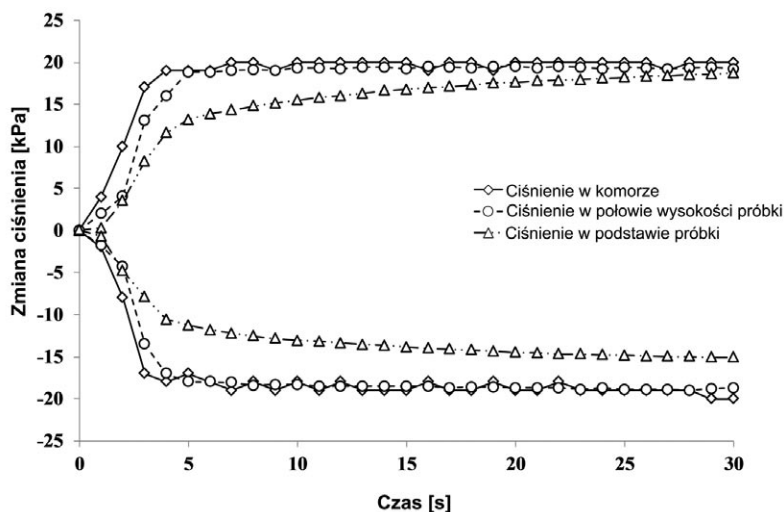
Wyniki uzyskane podczas monotonicznego ścinania próbki pokazują, że czujnik umieszczony w podstawie i w środku wysokości

próbki rejestrował różne wartości ciśnienia wody w porach gruntu, a co za tym idzie skutkowało innym kształtem ścieżki naprężenia efektywnego (rys. 8a i 8b). Wynika to z faktu, że czujnik umieszczony w połowie wysokości, ze względu na swoją konstrukcję, wymaga znacznie mniejszej objętości wody do aktywacji elementu pomiarowego w porównaniu z czujnikiem ciśnienia wody w porach gruntu umieszczonym w podstawie, który jest stosunkowo daleko od próbki. Obwiednię zniszczenia wyznaczoną dla tego materiału na podstawie badań własnych autora tego opracowania [14] przedstawiono również na rysunku 8a. Jak widać, ścieżka naprężeń uzyskana z pomiaru ciśnienia wody w połowie wysokości próbki jest bardzo bliska obwiedni zniszczenia. Natomiast ścieżka wyznaczona na podstawie pomiaru ciśnienia wody w podstawie próbki jest znacznie zaniżona.

Ciśnienie wody w porach gruntu mierzone bezprzewodowym czujnikiem podczas cyklicznej próby ściskania i rozciągania, bez możliwości odpływu wody na izotropowo skonsolidowanej próbce (rys. 9a i rys. 9b), wykazuje dobrą

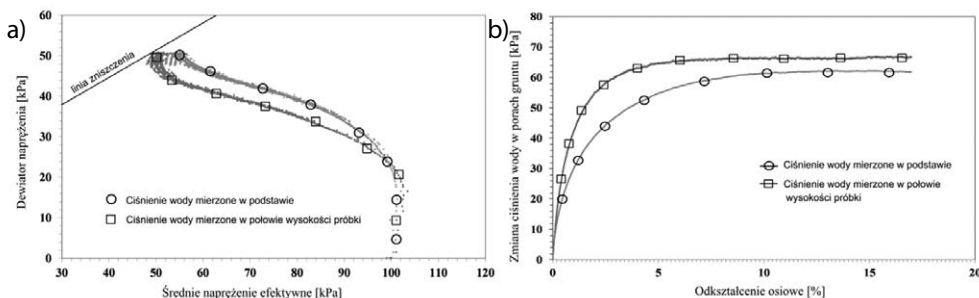


Rys. 6. Rozproszenie ciśnienia wody w porach gruntu



Rys. 7. Odpowiedź czujnika na zmianę ciśnienia w komorze

**Rys. 8.** Wyniki ścinania monotonicznego w warunkach bez odpływu w aparacie trójosiowego ściskania: a) ścieżki naprężenia efektywnego, b) zmiana ciśnienia wody w porach gruntu w czasie badania

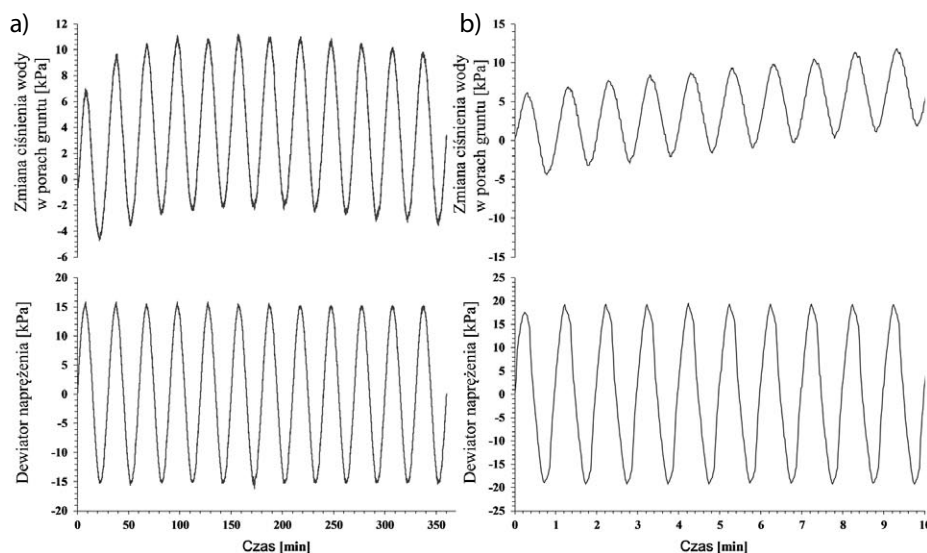


korelację zmian ciśnienia z zadaniem naprężeniem dewiatorowym. Wartości uzyskane przez czujnik napróbkowy nie są przesunięte w fazie, co oznacza, że zarejestrowana zmiana ciśnienia jest związana z zadaniem naprężeniem, a szybkie wyrównanie ciśnienia wody następuje w porach gruntu w bezpośrednim kontakcie z czujnikiem.

#### 4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono nowy rodzaj urządzenia pomiarowego służącego do bezprzewodowego pomiaru ciśnienia wody porowej, które może być stosowane w aparacie trójosiowego ściskania. Przedstawiono budowę czujnika oraz zasadę jego działania. W ramach pracy walidacyjnej przeprowadzono testy nowego czujnika oraz badania jego stabilności w czasie. Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że czujnik spełnia stawiane przed nim wymagania dotyczące pomiaru ciśnienia wody w porach gruntu. Badania praktyczne, przeprowadzone przy statycznym i cyklicznym obciążeniu próbki gruntu, potwierdzają skuteczność czujnika bezprzewodowego w badaniach prowadzonych w aparacie trójosiowym. Należy nadmienić, że podczas powyższych badań, jak również rutynowych badań prowadzonych na próbkach gruntów spoistych w okresie kilku miesięcy testowania urządzenia, nie zaobserwowano przesiąkania wody z komory ciśnieniowej do próbki. Dzięki użyciu urządzenia można znacznie zmniejszyć czas potrzebny na wykonanie badań. Obecnie trwają prace nad miniaturyzacją urządzenia i próbą zastosowania kilku urządzeń na jednej próbce gruntu. Rozważane jest również użycie czujnika w innych aparatach, takich jak na przykład: dynamiczny aparat prostego ścinania oraz aparat bezpośredniego ścinania.

**Rys. 9.** Charakterystyka ścinania cyklicznego w warunkach bez odpływu w aparacie trójosiowego ściskania: a) okres – 30 minut, b) okres – 1 minuta



#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Barden L, McDermott R.J.W., Use of Free Ends in Triaxial Testing of Clays, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 91(6)1965, str. 1–23
- [2] Bishop A., Blight W. G. E., Donald I. B., Discussion and Closure to Session 2, Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, New York: American Society of Civil Engineers, 1960
- [3] Blight G. E., Shear Stress and Pore Pressure in Triaxial Testing, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 91(6)1965, str. 25–39
- [4] European Union, 2004. EN 1997-1 2004: Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules. Brussels: The European Union
- [5] Fourie A. B, Xiaobi D., Advantages of Midheight Pore Pressure Measurements in Undrained Triaxial Testing, *Geotechnical Testing Journal* 14(2)1991, str. 138–45, <https://doi.org/10.1520/GTJ10555>
- [6] Head K. H., Epps R. J., *Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. III Effective Stress Tests*, 3rd Edition. London: Whittles Publishing, 2014
- [7] Hight D. W., A Simple Piezometer Probe for the Routine Measurement of Pore Pressure in Triaxial Tests on Saturated Soils, *Géotechnique* 32(4)1982, str. 396–401, <https://doi.org/10.1680/geot.1982.32.4.396>
- [8] Kutter B. L., Sathialingam N. Herrmann L. R., Effects of Arching on Response Time of Miniature Pore Pressure Transducer in Clay, *Geotechnical Testing Journal* 13(3)1990, str. 164–7, <https://doi.org/10.1520/GTJ10155J>
- [9] Maguire W. M., *The Undrained Strength and Stress Strain Behaviour of Brecciated Upper Lias Clay*, University of London, 1975
- [10] Meilani I., Rahardjo H., Leong E., Fredlund D., Mini Suction Probe for Matric Suction Measurements, *Canadian Geotechnical Journal* 39(6)2002, str. 1427–1432, <https://doi.org/10.1139/t02-101>
- [11] Richardson A. M., *The Relationship of the Effective Stress-Strain Behavior of a Saturated Clay to the Rate of Strain*, Massachusetts Institute of Technology, 1963
- [12] Sandroni S. S., *The Strength of London Clay in Total and Effective Stress Terms*, University of London, 1977
- [13] Taylor D. W., *Soil Mechanics Research Program on Cylindrical Compression Testing in Cooperation with U.S. Engineering Department*, In 3rd Report. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1940
- [14] Witowski M., *Small Strains Stiffness Assessment of Selected Soils*, PhD thesis, Building Research Institute, Warsaw, 2020