



Jacek STANISZ*

Czujniki do pomiaru ciśnienia porowego dla potrzeb rozpoznania położenia powierzchni poślizgu osuwiska

Streszczenie: Profilowanie głębokościowe zmian ciśnienia porowego może być pomocne w określaniu położenia powierzchni poślizgu osuwiska. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu specjalnych sond złożonych z czujników pomiarowych ciśnienia porowego. Wykorzystanie takich czujników pozwala na wskazanie położenia stref, gdzie następuje wzrost lub spadek ciśnienia porowego, spadek naprężeń efektywnych i często uplastycznienie ośrodka. Taki stan prowadzi do rozwoju powierzchni poślizgu. Jest to szczególnie widoczne po okresach intensywnej opadów. W artykule przedstawiono różne rodzaje czujników do pomiaru ciśnienia porowego. Opisano ogólne zasady pomiarów z ich użyciem. Przedstawiono zasadę działania czujników typu BAT, strunowych, piezorezystywnych, pojemnościowych, hydraulicznych, pneumatycznych oraz optoelektronicznych. Wskazano wady i zalety ich stosowania. Uznano czujniki z przetwornikiem strunowym za najbardziej odpowiednie do prowadzenia długookresowych pomiarów ciśnienia porowego w celu rozpoznania położenia powierzchni poślizgu osuwiska.

Słowa kluczowe: osuwisko, ciśnienie porowe, czujniki pomiarowe

Sensors for the measurement of pore pressure for the determination of the location of slip surface of landslides

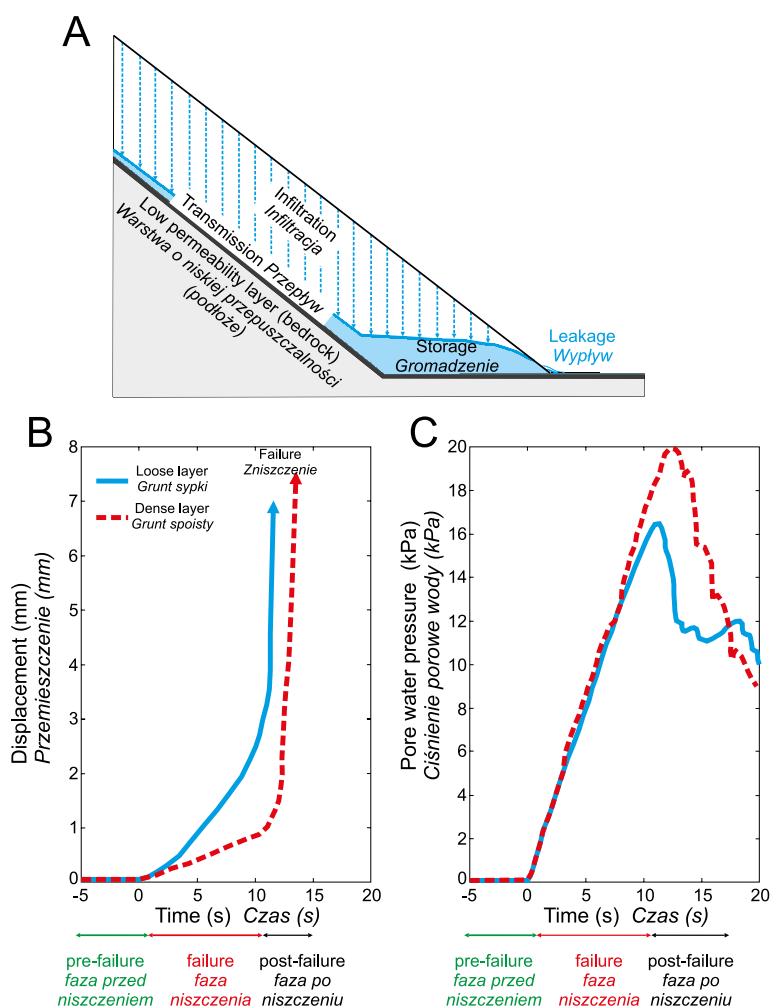
Abstract: Depth profiling of pore pressure changes can be helpful in determining the location of slip surfaces of landslides. This is possible due to using special probes made up of pore pressure sensors. The use of such sensors enables the indication of the location of the zones where there is an increase or decrease in pore pressure, or a decrease of effective stresses and frequent zone plasticization. Such a situation leads to the development of the slip surface. This is especially true after periods of heavy rainfall. The article presents various types of sensors used for the measurement of pore pressure. It describes the general rules for the measurements. It illustrates the principle for the operation of BAT sensors, vibrating-wire, piezoresistive, capacitive, hydraulic, pneumatic and optoelectronic sensors. The advantages and disadvantages of their use were pointed out. Vibrating-wire sensors were determined to be the most suitable to carry out long-term measurements of pore pressure in order to identify the location of landslide slip surfaces.

Keywords: landslide, pore water pressure, measurement sensors

* Mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; e-mail: jstanisz@agh.edu.pl.

Wprowadzenie

Właściwości mechaniczne ośrodka geologicznego są związane ze zmianami ciśnienia porowego wody. Ma to szczególne znaczenie w trakcie intensywnych opadów deszczu. Filtracja wody, a tym samym zmiany ciśnienia porowego powodują zmiany wartości naprężeń efektywnych i w rezultacie rozwój procesu niszczenia. Proces ten nasila się w ośrodku spękanym lub naruszonym (Bednarczyk 2014). W warunkach gradientu hydraulicznego pojawia się ciśnienie sphywowe, jako rezultat przepływu wody (rys. 1).



Rys. 1. Schemat przepływu wody w obrębie koluwium (A) oraz fazy rozwoju osuwiska w funkcji przemieszczenia (B) i ciśnienia porowego (C) dla gruntu sypkiego i spoistego (Take i in. 2004; Cascini i in. 2014)

Fig. 1. Schematic flow within the colluvium (A) and the development phase as a function of displacement of the landslide (B) and pore water pressure (C) for loose and cohesive geotechnical layer (Take i in. 2004; Cascini i in. 2014)

W okresie występowania gradientów hydraulicznych siły w ośrodku dążą do osiągnięcia stanu równowagi. Zmianie ulega aksjator naprężenia, a dewiator oddziałuje na szkielet gruntowy (Kisiel i Łysik 1966; Take i in. 2004). Powoduje to obciążenie szkieletu gruntowego, rozwój odkształceń objętościowych i w efekcie rozwój odkształceń postaciowych. W konsekwencji rozwija się proces narastania deformacji w ośrodku.

W warunkach zawodnienia i ograniczonej możliwości szybkiego odpływu wód, ciśnienie wody w porach gruntu wzrasta proporcjonalnie do przyrostu naprężenia całkowitego (Wiłun 2010; Dyba i Pilecki 2012). Przekroczona zostaje wytrzymałość na ścinanie, co powoduje rozwój stref osłabień. Koalescencja stref osłabień prowadzi do rozwoju powierzchni poślizgu. Proces ten narusza stateczność skarp i zboczy prowadząc do powstania i rozwoju ruchów masowych (Wang i Sassa 2003; Schnellmann i in. 2010).

Pomocną metodą do rozpoznania położenia stref osłabień jest profilowanie głębokościowe ciśnienia porowego. Jego zmiany mogą posłużyć do wnioskowania o możliwości rozwoju powierzchni poślizgu. Profilowanie jest możliwe za pomocą specjalnej sondy otworowej, składającej się z czujników ciśnienia porowego.

W doborze czujników dla potrzeb rozpoznania położenia powierzchni poślizgu należy uwzględnić:

- warunki pracy zestawu pomiarowego – związane jest to z zastosowaniem czujnika o właściwych wymiarach, materiału, z jakiego został wykonany, i porowatości filtra,
- właściwości fizyczne ośrodka – przepuszczalność, porowatość oraz gęstość objętościowa warstw ośrodka,
- zakres pomiarowy – powinien być dostosowany do maksymalnych ciśnień statycznych i dynamicznych,
- dokładność i rozdzielczość pomiaru.

1. Zasady pomiaru ciśnienia porowego wody w ośrodku geologicznym

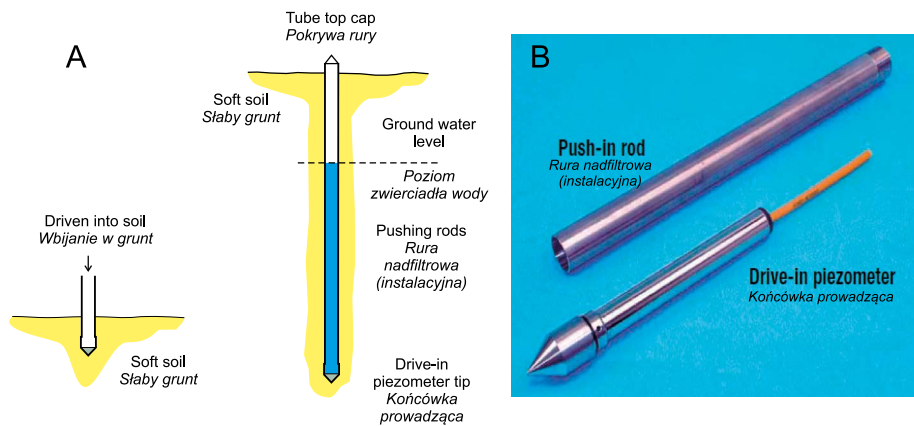
W najprostszy sposób pomiar ciśnienia porowego możliwy jest w piezometrach otwartych lub zamkniętych. Jest on dość niedokładny. Związane jest to ze:

- zróżnicowaną przepuszczalnością gruntów, w których wykonano piezometr,
- bezwładnością piezometru powodującą opóźnienie reakcji na zmiany ciśnienia porowego.

Zaletami zastosowania takiego rozwiązania są niskie koszty instalacji oraz możliwość przeprowadzenia prostego, wielokrotnego pomiaru ciśnienia porowego i przepuszczalności. Współczesne rozwiązania techniczne umożliwiają przeprowadzenie pomiaru automatycznego ze zdalnym przesyłaniem danych.

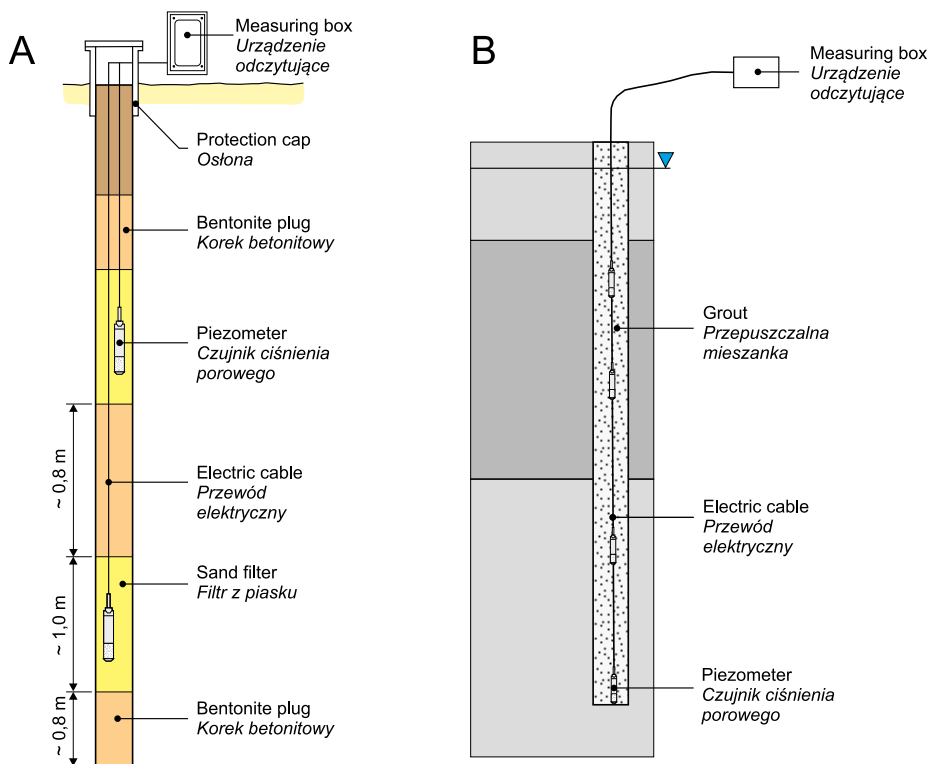
Precyzyjny pomiar ciśnienia porowego jest możliwy z użyciem czujników. Można je instalować na dwa sposoby:

- penetrując grunty o słabych parametrach za pomocą wiertnicy lub wciskarki hydraulicznej (rys. 2),
- umieszczając w otwartych piezometrach. Częstym rozwiązaniem jest zabudowa czujników w otworach wiertniczych (rys. 3). Instalacja w tym przypadku związana jest z:



Rys. 2. Schemat metody wciskania piezometru w grunt o słabych właściwościach (A) wraz z przykładowym zestawem montażowym (B) (Materiały informacyjne...)

Fig. 2. Schematic of the piezometer pushing into the soft ground (A) with a sample installation kit (B) (Information materials...)



Rys. 3. Schemat instalacji czujników osadzonych w warstwach piasku (A) oraz przepuszczalnej mieszanki (B) (Materiały informacyjne...)

Fig. 3. The installation scheme sensors embedded in the sand layers (A) and the grout mixture (B) (Information materials...)

- zastosowaniem mieszanek uszczelniających na całej długości otworu (Mikkelsen, Green 2003),
- zastosowaniem czystego piasku o odpowiedniej granulacji. Zalecana miąższość warstwy wynosi minimum 15 cm. Przestrzeń powyżej warstwy zostaje zwykle uszczelniona bentonitem.

Producenci zalecają stosowanie mieszanek bentonitu i cementu (Materiały informacyjne...) lub cementu portlandzkiego, bentonitu i wody w proporcjach 1:0,33:2,5 (dla gruntów o dobrych właściwościach wytrzymałościowych) oraz 1:0,4:6,5 (dla gruntów słabych) (Materiały informacyjne...). Uważa się, że ta metoda jest wskazana zwłaszcza dla gruntów zawodnionych (Materiały informacyjne...). W trakcie instalacji czujnika w gruntach o małej przepuszczalności może nastąpić chwilowy wzrost ciśnienia porowego spowodowany konsolidacją otaczającego gruntu. W przypadku otwartych piezometrów należy w ich pobliżu instalować barometr dla uwzględnienia poprawki na ciśnienie atmosferyczne.

2. Przegląd rodzajów czujników dla potrzeb pomiaru ciśnienia porowego

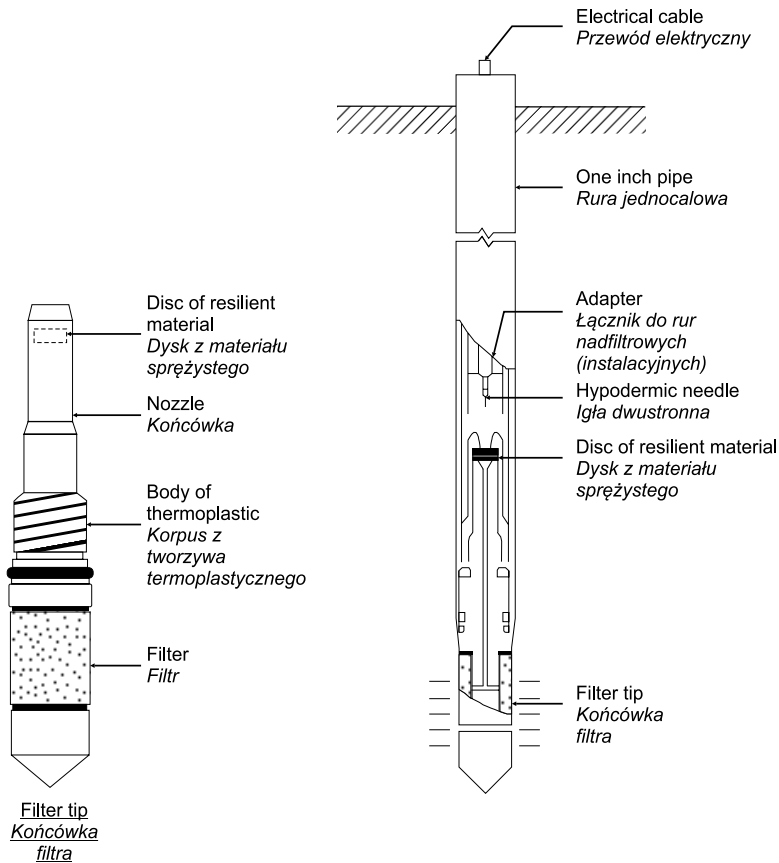
Każdy czujnik ciśnienia porowego składa się z dwóch podstawowych elementów:

- filtra – wykonanego z materiałów o odpowiedniej wytrzymałości i przepuszczalności (filtry ceramiczne i kamienne oraz ze spiekanej stali nierdzewnej). Obecnie stosowane są ich dwa rodzaje:
 - HAE (ang. *high-air entry*) – napięcie powierzchniowe wody uniemożliwia wnikanie powietrza do środka filtra dzięki zastosowaniu materiału o bardzo małej porowatości (1 μm). Często wykorzystywane są do pomiarów w rdzeniach zapór oraz zawodnionych gruntach o niewielkiej przepuszczalności. Filtry te muszą być wcześniej nasączone,
 - LAE (ang. *low-air entry*) – najczęściej stosowane. Nie jest wymagane wcześniejsze ich nasączenie, ze względu na znaczną porowatość filtra (50 lub 60 μm), która umożliwia swobodne wnikanie wody.
- elementu pomiarowego – czujnika mierzącego różnicowe wartości wybranych wielkości fizycznych. Stosowane są czujniki typu BAT (nazwa pochodzi od konstruktora – Bengta Arne Torstenssona) (1), z wibrującą struną VW (ang. *vibrating wire*) (2), piezorezystancyjne (ang. *piezoresistive*) (3), pojemnościowe (ang. *capacity*) (4), hydrauliczne (ang. *hydraulic*) (5), pneumatyczne (ang. *pneumatic*) (6), a coraz częściej również z elementami optoelektronicznymi (ang. *optical fiber*) (7) (Torstensson i in. 1999; Stanisław 2013).

2.1. Czujnik typu BAT

To jedna z najprostszych i najtańszych metod pomiaru ciśnienia porowego (rys. 4). Głównymi elementami czujnika są filtr i sensor typu BAT (znajdujący się za filtrem). Filtr jest wypełniony odpowietrzoną wodą i uszczelniony elastyczną przegrodą z gumy neopropenowej. Kontakt hydrauliczny z czujnikiem następuje w trakcie zagłębiania czujnika w grunt. Podczas tego procesu igła znajdująca się w czujniku przebija przegrodę filtra. Następuje

połączenie i uszczelnienie obu elementów. Woda z filtra jest podciągana do czujnika, co umożliwia pomiar ciśnienia całkowitego. Po wprowadzeniu poprawki na wartość ciśnienia atmosferycznego otrzymywany jest pomiar ciśnienia porowego (Torstensson i in. 1999; Bo i in. 2014).



Rys. 4. Schematy filtra pomiarowego (A) oraz układu do pomiaru ciśnienia porowego wody (B) czujnika typu BAT (Bo i in. 2014)

Fig. 4. Schemes of the measuring filter (A) and a system for measuring the pore pressure of water (B) type sensor BAT (Bo et al. 2014)

Dla czujnika typu BAT producenci oferują obudowę filtra z termoplastycznego tworzywa sztucznego POM (ang. *polyoxymethylene*), teflonu PTFE (ang. *polytetrafluoroethylene*) lub stali chromowo-niklowej, w których umieszczony jest filtr ceramiczny lub z polietylenu o wysokiej gęstości HDPE (ang. *high-density polyethylene*). Rozmiar porów filtra ceramicznego wynosi 2 μm , filtra HDPE 20 lub 60 μm .

Metoda pomiaru wykorzystywana jest w gruntach słabo i średnioprzepuszczalnych o współczynniku filtracji zbliżonym do ok. 5×10^{-5} m/s. Czujnik typu BAT umożliwia również wykonanie pomiaru przepuszczalności i temperatury oraz pobór próbek powietrza glebowego lub wody (Materiały informacyjne...).

Główne zalety:

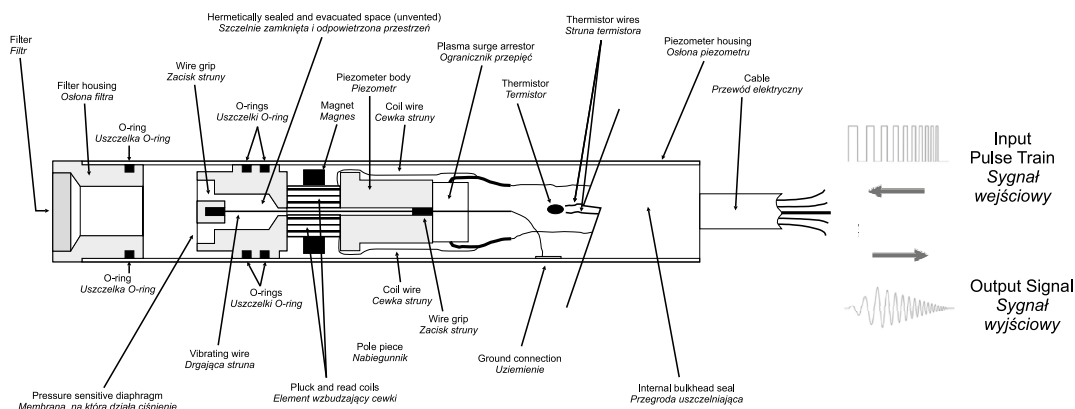
- niewielkie koszty instalacji i eksploatacji,
- szybki demontaż instalacji lub wymiany filtra,
- krótki czas reakcji w gruntach o słabych parametrach (Torstensson, Schellingerhout 1999).

Główne wady:

- konieczność stosowania poprawek na ciśnienie atmosferyczne.

2.2. Czujniki strunowe

Czujnik strunowy składa się z filtra zakończonego odkształcalną, stalową membraną, wibrującej struny i dwóch cewek (rys. 5). Wpływająca do filtra woda wywołuje zmiany ciśnienia porowego, co z kolei powoduje odkształcenie membrany, która wprawia w drgania wcześniej wzbudzoną strunę. Wzbudzenie drgań struny do częstotliwości rezonansowej jest możliwe po wysłaniu sygnału wejściowego o zmiennej, skokowej częstotliwości. Wibracje struny wywołują zmiany pola magnetycznego w pobliżu cewki. W trakcie charakterystycznych drgań, z cewki wysyłany jest sinusoidalny sygnał elektryczny o konkretnej częstotliwości do urządzenia odczytującego, w którym następuje jego zamiana na wartość liczbowa. Dokładniejszy opis pracy czujnika przedstawiono w kilku opracowaniach technicznych (Materiały informacyjne...) oraz pracy Stanisza (2013).



Rys. 5. Schemat czujnika strunowego VW (Materiały informacyjne...)

Fig. 5. Scheme of vibrating wire sensors (Information materials...)

Najbardziej popularne filtry dla tego rozwiązania są dostępne w dwóch wersjach: 50 lub 60 μm (filtr ze stali nierdzewnej, polietylenowy lub ceramiczny). Rzadziej w wersjach 0,25 μm (filtr ceramiczny HAE) lub 40 μm (filtr ze stali nierdzewnej) (Materiały informacyjne...). W czujnikach firmy ITMSoil oraz Interfels, struna wykonana jest z karbonu.

Jako czujnik temperatury stosowany jest termistor np. NTC (ang. *Negative Temperature Coefficient*) o ujemnym współczynniku temperaturowym lub termometr rezystancyjny

RTD (ang. *Resistance Temperature Detector*). Termistory temperatury powinny jak najlepiej redukować wpływ pola temperatury zewnętrznej na wynik pomiaru. Wymaga się, aby zmiany temperatury były mniejsze niż 10 stopni. W tym celu przed instalacją należy czujnik zanurzyć płytko w przegotowanej wodzie, w zacienionym miejscu, tak aby ustabilizowała się temperatura przetwornika (Materiały informacyjne...). Nasycenie filtra nie jest zalecane w niskich temperaturach, gdyż prowadzi to do jego uszkodzenia.

Struna umieszczona w czujniku jest wzbudzana jedynie w trakcie pomiaru, co ogranicza dryft elementów elektronicznych. Stosowanie takiego rozwiązania zwiększa dokładność prowadzonych pomiarów. Szereg modeli tych czujników może być instalowanych w każdym środowisku pracy. Czujniki te podatne są na zmiany napięcia, w związku z tym konieczne jest stosowanie układów przeciwprzepięciowych. Obecnie ich cena jest wyższa niż czujników piezoelektrycznych. Mogą jednak z powodzeniem konkurować z pozostałymi rodzajami czujników.

Główne zalety:

- stabilność pomiarów,
- natychmiastowy odczyt wartości ciśnienia porowego,
- możliwość transmisji sygnału na znaczne odległości,
- łatwa automatyzacja pomiarów,
- odporność na wyładowania atmosferyczne po zastosowaniu systemu przeciwprzepięciowego,
- szybka i trwała instalacja (Materiały informacyjne...).

Główne wady:

- wymagana kompensacja temperaturowa pomiaru,
- wyższy koszt niż czujników typu BAT i piezorezystywnych (Materiały informacyjne...).

2.3. Czujniki piezorezystywne

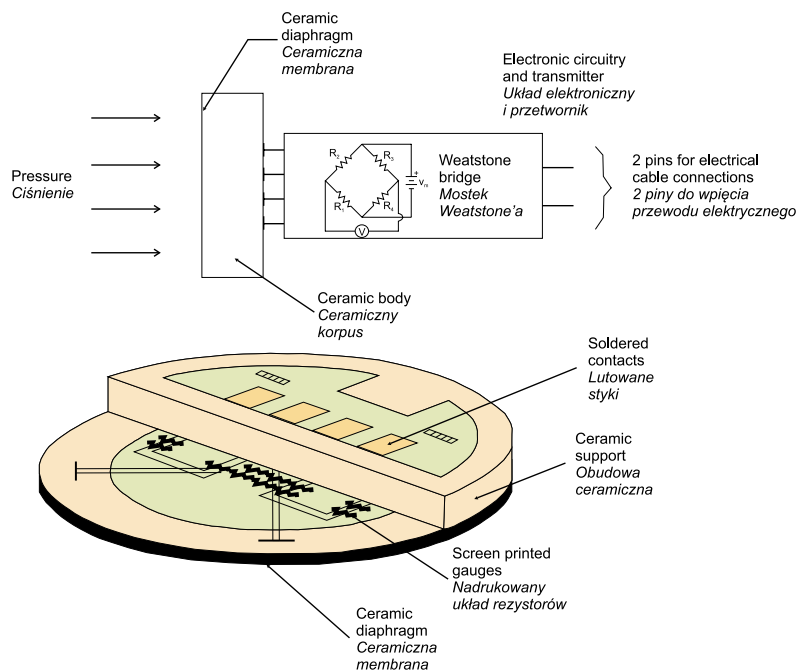
W czujniku piezorezystywnym rezystory są nakładane na odkształcającą się ceramiczną membranę. Rezystory połączone są ze sobą równolegle tworząc czteroramienny układ pomiarowy – mostek Wheatstone’a (rys. 6). Zewnętrzne obciążenie powoduje odkształcenie się membrany i powstanie na jej powierzchni naprężeń rozciągająco-ściskających, co powoduje zmianę rezystancji układu. Stałe napięcie wzbudza jeden z boków układu. Stan ten powoduje wysłanie z pozostałych rezystorów sygnału wprost proporcjonalnego do ciśnienia wywołwanego na membranie. Układ konwertuje sygnał na wartości z zakresu 4–20 mA umożliwiając jego transmisję na większe odległości. Czujniki nie wymagają kompensacji ciśnienia (Materiały informacyjne...).

Główne zalety:

- duża dokładność i krótki czas reakcji czujnika,
- łatwość odczytu i możliwość jego automatyzacji (Materiały informacyjne...).

Główne wady:

- niezalecane przy długim okresie monitorowania, gdyż z czasem podlegają dryftowi,
- po instalacji utrudniona możliwość kalibracji czujnika (Materiały informacyjne...).



Rys. 6. Schemat czujnika piezorezystywnego (Materiały informacyjne...)

Fig. 6. Scheme of piezoresistive sensor (Information materials...)

2.4. Czujniki pojemnościowe

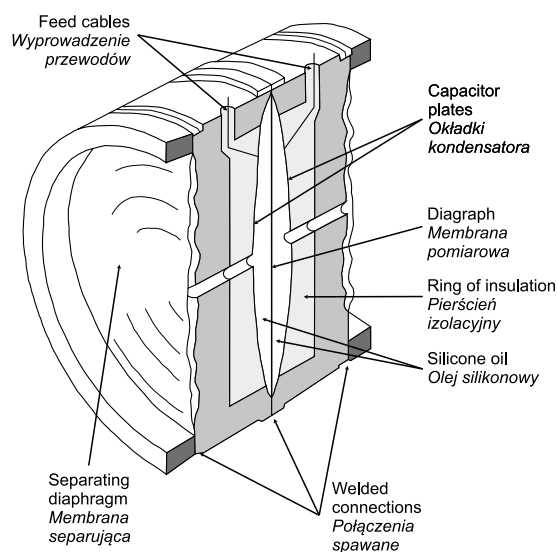
W czujniku pojemnościowym umieszczony jest kondensator składający się z dwóch okładek. Górna okładka to elastyczna membrana, dolna to sztywna, metalowa elektroda (rys. 7). W wyniku przyłożonego ciśnienia następuje odkształcenie górnej okładki i zmiana odległości pomiędzy membraną a elektrodą. Proces ten powoduje zmianę pojemności kondensatora. Mierzoną wielkością jest przemieszczenie liniowe lub kątowe oraz zmiana grubości dielektryka. Czujniki pojemnościowe mają dużą rozdzielczość (do 0,002% zakresu przy błędzie 0,05% zakresu). Są również mało podatne na dryft elementów elektronicznych (Berkson i Field 2007).

Główne zalety:

- duża dokładność,
- duża wytrzymałość na przeciążenia,
- dają dobre rezultaty w pomiarach niskich ciśnień,
- odporność na zakłócenia elektromagnetyczne,
- w stosunku do czujników piezorezystywnych są mniej podatne na dryft (Materiały informacyjne...).

Główne wady:

- wysoki koszt (Materiały informacyjne...).



Rys. 7. Przykładowy schemat czujnika pojemnościowego (Strzelczyk 1993)

Fig. 7. An exemplary scheme of the capacitive sensor (Strzelczyk 1993)

2.5. Czujniki hydrauliczne

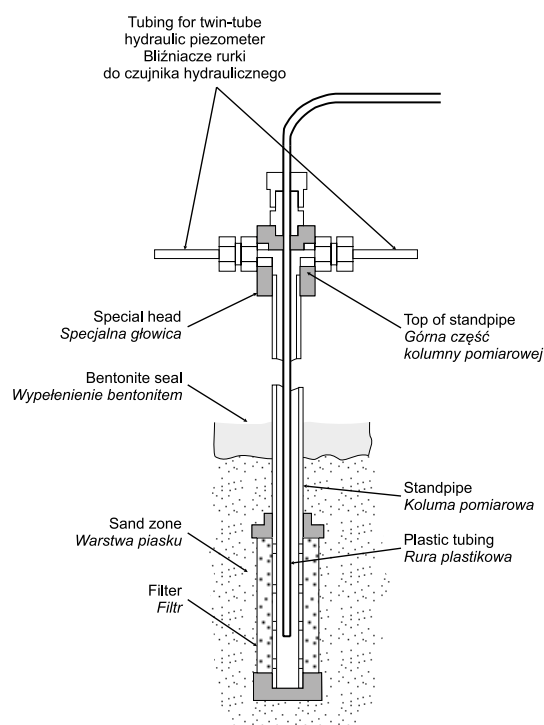
Czujnik hydrauliczny złożony jest z dwóch bliźniaczych, sprężystych rurek wypełnionych odpowietrzoną wodą. Obie rurki połączone są do końcówki z ceramicznym filtrem. Pomiar wykonywany jest za pomocą sprężystej rurki manometrycznej Bourdona lub elektrycznego przetwornika ciśnienia (Materiały informacyjne...) (rys. 8). Pomiar różnicowy ciśnienia w rurkach pozwala uzyskać wartość ciśnienia hydraulicznego. Wartość ciśnienia porowego wody uzyskuje się po przeliczeniu ciśnienia hydraulicznego według stosownych wzorów. Możliwy jest pomiar ujemnego i dodatniego ciśnienia porowego.

Główne zalety:

- niezawodne dla pomiarów w długim okresie,
- łatwo wymienne końcówki filtra,
- ograniczona liczba elektronicznych elementów,
- możliwość instalacji na dużych głębokościach (nawet 1 km),
- stosunkowo niewielki koszt w porównaniu do czujników VW i pojemnościowych (Materiały informacyjne...).

Główne wady:

- wrażliwy na niskie temperatury,
- niedokładność spowodowana uwięzionym powietrzem w końcówce filtra może wpływać na dokładność pomiaru,
- wymagany odczyt manualny, brak możliwości zdalnych odczytów (Materiały informacyjne...).



Rys. 8. Przykładowy schemat czujnika hydraulicznego (Dunnicliff 1993)

Fig. 8. Proposal scheme of the hydraulic sensor (Dunnicliff 1993)

2.6. Czujnik pneumatyczny

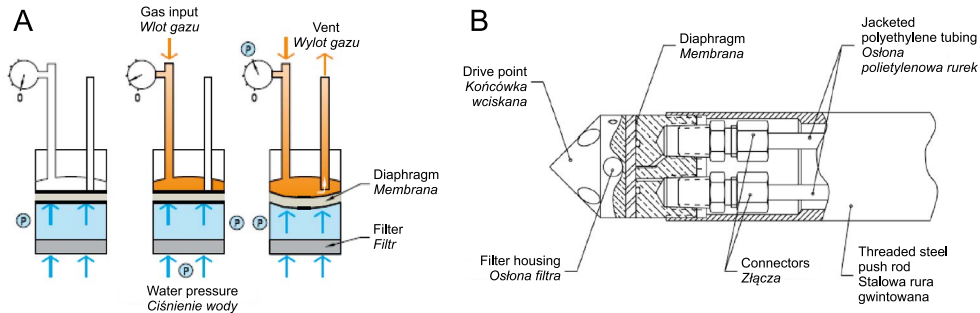
Czujnik pneumatyczny składa się z filtra i sprężystej, silikonowej membrany (rys. 9). Na końcu czujnika przyłączane są dwie nylonowe lub polietylenowe rurki (wejściowa i odpowietrzająca). Doprowadzają one do czujnika gaz, którym jest azot. W trakcie pomiaru ciśnienie gazu wzrasta w przetworniku. Gdy ciśnienie gazu przekroczy ciśnienie wody membrana odchyła się na zewnątrz. Nadmiar gazu wypływa przez rurkę odpowietrzającą w kierunku powierzchni. Wówczas następuje zamknięcie przepływu gazu w przetworniku. Gaz przepływa jedynie przez rurę odpowietrzającą, aż do momentu wyrównania się ciśnienia gazu i wody. Następuje odczyt ciśnienia. W większości piezometrów stosuje się filtry 50–60 μm (Materiały informacyjne...).

Główne zalety:

- krótki czas reakcji nawet w gruntach o słabej przepuszczalności,
- stabilność pomiaru,
- prosty w obsłudze,
- ograniczona liczba elementów elektronicznych,
- długi czas użytkowania,
- tańszy niż czujniki piezoelektryczne,
- odporny na wyładowania atmosferyczne (Materiały informacyjne...).

Główne wady:

- brak odporności na mróz,
- zastosowanie na większych głębokościach spowoduje opóźnienie reakcji czujnika i zmniejszenie jego dokładności,
- utrudniona automatyzacja pomiarów – wymagana kontrola w trakcie pomiarów (Materiały informacyjne...).



Rys. 9. Schemat procesu pomiarowego (A) oraz czujnika (B) (Materiały informacyjne...)

Fig. 9. Scheme of the measurement process (A) and the sensor (B) (Information materials...)

2.7. Czujniki optoelektroniczne

Czujnik optoelektroniczny oparty jest na bezstykowym pomiarze niewielkiego czujnika ciśnienia MOMS (ang. *Micro Optical Mechanical System*), wykorzystującego efekt nakładających się na siebie prążków interferencyjnych, będących wynikiem wielokrotnego odbicia fali spójnej (Materiały informacyjne...). Czujnik ciśnienia składa się z odkształcalnej, cienkiej membrany ze stali nierdzewnej umieszczonej przed zamkniętym zagłębieniem, w którym jest próżnia. Pomiar ciśnienia odbywa się w interferometrze Fabry’ego-Perota (rys. 10). Ciśnienie powoduje z jednej strony czujnika odkształcenie membrany, natomiast z przeciwnej następuje referencja powierzchni optycznej zamocowanego światłowodu (Rodrigues i in. 2010). W trakcie trwania tego procesu możliwe jest odczytanie dokładnej wartości ciśnienia porowego (Materiały informacyjne...). Stosowane są filtry ze stali nierdzewnej 40 lub 50 μm , albo ceramiczne 1 μm .

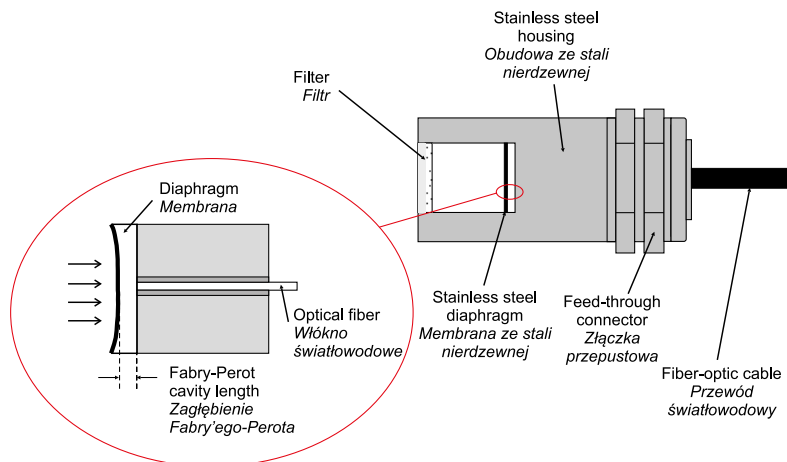
Główne zalety:

- odporny na wyładowania atmosferyczne i zakłócenia radiowe,
- wysoka rozdzielczość,
- niewielki rozmiar,
- duże zakresy pracy.
- sprawdza się w trakcie długich pomiarów (Materiały informacyjne...).

Główne wady:

- znaczny koszt (Materiały informacyjne...).

Przykładowe modele omawianych czujników wraz z podaniem ich parametrów technicznych zestawiono w tabeli 1.



Rys. 10. Schemat czujnika optoelektronicznego (Materiały informacyjne...)

Fig. 10. Scheme of optical fiber (Information materials...)

Podsumowanie

Precyzyjny pomiar zmian ciśnienia porowego wymaga właściwego doboru czujników pomiarowych. Jest to szczególnie istotne na terenach osuwiskowych, gdzie pomiar ciśnienia porowego może być wykorzystany do określenia położenia powierzchni poślizgu.

Na pomiar zmian ciśnienia porowego mają wpływ błędy systematyczne wynikające z doboru czujnika pomiarowego o konkretnej konstrukcji. Czujniki typu BAT są bardzo tanie i łatwe w eksploatacji jednak nie jest możliwy pomiar wielopunktowy w jednym otworze wiertniczym. Ponadto czujniki te zbyt wolno reagują na zmiany ciśnienia porowego w ośrodku gruntowym. Czujniki piezorezystywne są stosunkowo tanie, ale ich wadą jest znacząca podatność na zmiany temperatury. Z kolei czujniki strunowe są bardzo dokładne, szybko reagują na zmiany ciśnienia, nie podlegają histerezie i mogą być użytkowane przez dłuższy okres. Są jednak droższe od czujników BAT i piezorezystywnych. Czujniki pojemnościowe nadają się bardzo dobrze do pomiarów ciśnienia porowego (bardzo duża dokładność pomiaru i niewielki błąd). Wadą jest ich jednak bardzo wysoki koszt. Czujniki pneumatyczne i hydrauliczne są coraz rzadziej stosowane ze względu na konieczność kontroli zawartości gazu pomiarowego wprowadzanego do czujnika. W przeciwieństwie do innych rodzajów czujników, w tym przypadku istnieje ograniczona możliwość pomiaru automatycznego. Ostatni rodzaj – czujniki optoelektroniczne – są obecne na rynku od niedawna. Ze względu na ograniczony zakres informacji na ich temat trudno ocenić ich wady i zalety. Przegląd ważniejszych cech czujników zestawiono w tabeli 2.

Na podstawie przeprowadzonego studium należy przyjąć, że najbardziej korzystnym rozwiązaniem do pomiaru ciśnienia porowego wody dla potrzeb rozpoznania położenia powierzchni poślizgu jest wykorzystanie czujników strunowych. Należy jednak mieć na uwadze ograniczenia związane z warunkami pomiarowymi.

TABELA 1. Zestawienie przykładowych modeli czujników do pomiaru ciśnienia porowego wody wraz z ich parametrami technicznymi. Legenda: VW – wibrująca struna, P – piezorezystancyjne, C – pojemnościowe, H – hydrauliczne, Pn – pneumatyczne, FOP – optoelektroniczne

TABLE 1. Illustrative models of sensors for measuring the pore water pressure along with their technical parameters. Legends: VW – a vibrating wire, P – piezoresistive, C – capacitive, H – hydraulic, Pn – pneumatic, FOP – optoelectronics

Producent	Model czujnika	Rodzaj czujnika	Zakres pomiarowy [kPa]	Dokładność [% zakresu]	Rozdzielczość [% zakresu]	Wymiary (średnica x długość) [mm]
1	2	3	4	5	6	7
Profound IS	BAT MkIII	BAT	0-500 0-1600	<0,15		22 x 170 31 x 209
ITMSoil/ Interfels	W4	VW	-50-350	±0,1%	±0,025	28 x 200-270
	W9	VW	-50-300	±0,1%	±0,025	19 x 200-270
KYOWA	BPA-F-S	P	0-200	±0,1		10 x 52
	BPR-A-S		0-50			20 x 35
Geosense	VW/P-3200 VW/P-3300	VW	0-70	±0,1	±0,025	25 x 151
Slope Indicator	Standard	VW	0-350	±0,1	±0,025	19 x 195
Sensata	60CP	C	0-100	±0,8		15 x 66
Novasensor	NPI-19	P	0-100	±0,5	±0,1	18 x 13
	4500AL	VW	0-70	±0,1	±0,025	25,4 x 133
Geokon	4500DP	VW	-100-70	±0,1	±0,025	33,3 x 187
	4500H	VW	-100-70	±0,1	±0,025	25,4 x 140
Soil Instruments	W4	VW	0-150	±0,1	±0,025	
	W2	H	-50-2000	±1	±0,25	18 x 6,35
	W3	Pn	-50-1000	±2		
	W9	VW	0-300	±0,1	±0,025	
	PK45C	VW	0-350	±0,25	±0,25	28/30 x 230
Sisgeo	OP211020000	Pn	0-2000	±0,1	±0,01	24 x 145
	P252R	P	0-100	<0,2	0,01	25 x 215
Roctest	PWL	VW	0-70	±0,1	±0,025	38 x 200
	PWS	VW	0-200	±0,1	±0,025	19 x 200
	FOP-MicroPZ	FOP	0-100	±0,1	±0,025	4,8 x 54
	FOP	FOP	0-200	±0,1	±0,025	19 x 100

TABELA 1 cd.

TABLE 1 cont.

1	2	3	4	5	6	7
Roctest	FPC-2	Pn	0-1000	±0,25		32 × 28
Glätzl	PW4	P	0-100	<0,1		40 × 230
	EPVW3	VW	-50-70	±0,5	±0,02	28 × 193
RST Instruments	P-100	Pn	0-2000	±0,25	0,1	15,9 × 63
	FO2100	FOP	0-700	±0,1	<0,02	8 × 57
	Vw2100-L	VW	0-70	0,1	0,025	25 × 133

TABELA 2. Przegląd wybranych cech kilku rodzajów czujników

TABLE 2. Overview of selected features of several types of sensors

Rodzaj czujnika	Zakres niskich ciśnień	Dokładność	Rozdzielczość	Stabilność pomiaru	Cena
BAT	nie	dobra	bardzo dobra	dobra	bardzo słaba
Wibrująca struna (VW)	tak	bardzo dobra	bardzo dobra	bardzo dobra	średnia/bardzo dobra
Piezorezystywne	tak	dobra	bardzo dobra	dobra	niska
Pojemnościowe	tak	dobra	bardzo dobra	bardzo dobra	wysoka
Hydrauliczne	nie	słaba	słaba	dobra	średnia
Pneumatyczne	nie	zróżnicowana	zróżnicowana	dobra	średnia
Optoelektroniczne (FOP)	tak	dobra	bardzo dobra	bardzo dobra	bardzo dobra

Literatura

- Bednarczyk, Z. 2014. Study on influence of rainfalls on landslide activation based on nearly real-time monitoring data from the Carpathian mountains. *Proceedings of World Landslide Forum 3*, Beijing, s. 1–7.
- Berkson, M. i Field, D. 2007. Understanding and specifying Sensata technologies' capacitive pressure transducers. Sensata, USA, s. 1–4.
- Bo i in. 2014 – Bo, M.W., Arulrajah, A., Leong, M., Horpibulsuk, S. i Disfani, M.M. 2014. Evaluating the in-situ hydraulic conductivity of soft soil under land reclamation fills with the BAT permameter. *Engineering Geology* 168, s. 98–103.
- Cascini i in. 2013 – Cascini, L., Cuomo, S., Pastor, M. i Sacco, C. 2013. Modelling the post-failure stage of rainfall-induced landslides of the flow type. *Canadian Geotechnical Journal* 50, s. 924–934.
- Dunnicliff, J. 1993. Geotechnical Instrumentation for monitoring field performance. New York, USA, s. 124.
- Dyba, M. i Pilecki, Z. 2012. Wpływ sposobu zawodnienia na ciśnienie porowe i naprężenie efektywne w obliczeniach numerycznych programem FLAC 2D. *Przegląd Górniczy* t. 68, nr 7, s. 25–31.
- Kisiel, I. i Łysik, B. 1966. *Zarys reologii gruntów. Działanie obciążenia statycznego na grunt*. s. 93–94.
- Materiały informacyjne firm Geokon, ITMSoil/Iterfels, GeoN, SlopeIndicator, Sensata, Novasensor, Profound IS, KYOWA, Glöttzl, RST Instrument.
- Mikkelsen, P.E. i Green, G.E. 2003. Piezometers in fully grouted boreholes. *Field Measurements in Geomechanics*, Myrvoll (ed.), Lisse, s. 545–553.
- Rodrigues i in. 2010 – Rodrigues, C., Inaudi, D., Juneau, F. i Pinet, E. 2010. Miniature Fiber-Optic MOMS Piezometer. *Geotechnical Instrumentation News*, s. 10–13.
- Schnellmann i in. 2010 – Schnellmann, R., Busslinger, M., Schneider, H.R. i Rahardjo, H. 2010. Effect of rising water table in an unsaturated slope. *Engineering Geology* 114, s. 71–83.
- Stanisz, J. 2013. Możliwości rozpoznania zagrożenia osuwiskowego na podstawie obserwacji zmian ciśnienia porowego w ośrodku geologicznym. *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP*, oddział w Krakowie. Nr 3, s. 1–7.
- Strzelczyk, F. 1993. *Metody i przyrządy w pomiarach ciepłno-energetycznych*. Wyd. PŁ., Łódź, s. 16.
- Take i in. 2004 – Take, W.A., Bolton, M.D., Wong, P.C.P. i Yeung, F.J. 2004. Evaluation of landslide triggering mechanisms in model fill slopes. *Landslides* 1, s. 173–184.
- Torstensson, B.A. i Schellingerhout, A.J.G. 1999. Ground water monitoring with the BAT-system. *Geotechniek*, s. 1–5.
- Wang, G. i Sassa, K. 2003. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. *Engineering Geology* 69, s. 109–125.