

Mariusz LECH, Kazimierz GARBULEWSKI

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie

Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Określanie porowatości gruntów niespoistych na podstawie pomiarów oporności elektrycznej

Evaluation of cohesionless soil porosity using electrical resistivity measurements

Słowa kluczowe: porowatość, oporność elektryczna, wskaźnik ułożenia ziaren, piaski

Key words: porosity, electrical resistivity, formation factor, sands

Wprowadzenie

Rosnące w ostatnich latach wymagania, dotyczące ochrony środowiska naturalnego, stymulują działania naukowe i inżynierskie w zakresie wpływu istniejących i projektowanych budowli na środowisko gruntowo-wodne. W tym celu wskazane jest w szerokim zakresie stosowanie badań geofizycznych, do których zalet, poza nieinwazyjnym charakterem, zaliczyć należy niski koszt i szybkość uzyskania wyników, jak również możliwość zbudowania przestrzennego modelu podłoża i określenia warunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Jedną z metod, która z powodzeniem wykorzystywana jest od lat w geofizyce, geologii poszukiwawczej i ocenie stanu środowiska gruntowo-wodnego (Keller

i Frischknecht 1966, Zahody i in. 1974, Stopiński 1986) jest metoda elektrooporowa. Wiarygodność tej metody, jak wykazały dotychczasowe badania (Abu-Hassanein i in. 1996, Fukue i in. 2001, Sreedeeep i in. 2004, Lech 2006), zależy od rozpoznania takich czynników, jak: wilgotność i stan nasycenia wodą ośrodków gruntowych, stężenie zanieczyszczeń w gruncie i wodzie gruntowej, temperatura i quasi-dynamiczne obciążenia. Interpretacja wyników badań terenowych jest trudna, wymagająca wiedzy z różnych dziedzin i uwzględnienia wpływu wymienionych czynników na pomierzone wartości oporności elektrycznej ośrodków porowatych. Poznanie wpływu wymienionych czynników na oporność elektryczną ośrodka wymaga często przeprowadzenia badań laboratoryjnych. Wyniki pomiarów oporności właściwej gruntów wykorzystywane są do określenia parametrów ośrodków gruntowo-wodnych, w tym porowatości. W pierwszej części niniejszego artykułu scharakteryzowano czynniki wpływające

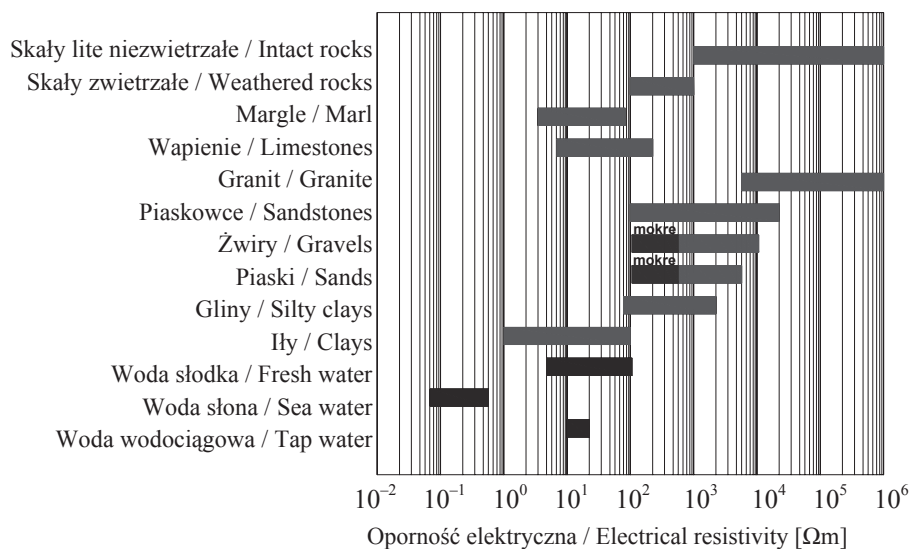
na pole elektryczne w podłożu, natomiast w drugiej przedstawiono wyniki badań porowatości gruntów niespoistych.

Czynniki warunkujące przepływ prądu elektrycznego w ośrodku gruntowym

Ośrodek gruntowy, podobnie jak inne materiały, pod kątem zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego charakteryzuje się dwoma parametrami: opornością właściwą i stałą dielektryczną (Zahody i in. 1974, Usowicz 2002). Wpływ stałej dielektrycznej ujawnia się dopiero przy zastosowaniu w pomiarach prądu przemiennego o bardzo wysokich częstotliwościach – powyżej 100 kHz (McCarter i in. 2005). Opór elektryczny (R) wyrażony w Ω nie jest właściwością badanego ośrodka, ponieważ nie zależy

od drogi (l) i pola przekroju (A), przez który płynie prąd. Ośrodek gruntowy charakteryzuje pozorna oporność właściwa (ρ) wyrażona w $\Omega \cdot m$, którą uzyskujemy w wyniku pomnożenia oporności elektrycznej przez pole powierzchni i podzielenia przez drogę przepływu. Oporność właściwa dotyczy jedynie materiałów izotropowych i jednorodnych, natomiast dla ośrodka złożonego, jakim jest grunt, stanowi tylko wartość pozorną. Typowe zakresy obserwowanych wartości pozornej oporności właściwej wybranych skał i gruntów oraz wody przedstawiono na rysunku 1.

W praktyce pomiary oporności elektrycznej gruntu zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i terenowych przeprowadzane są metodą wykorzystującą układ składający się z czterech elektrod. W metodzie tej prąd elektryczny wprowadzany jest do gruntu za pomocą dwóch elektrod A i B, które wzbudzają



RYSUNEK 1. Pozorne oporności właściwe wybranych ośrodków (na podstawie Keller i Frischknecht 1966, Zahody i in. 1974, Mayne i in., 2001)

FIGURE 1. Representative electrical resistivities of various soil and rock materials (based on Keller and Frischknecht 1966, Zahody et al. 1974, Mayne et al. 2001)

pole elektryczne, natomiast elektrody M i N mierzą różnicę potencjału tego pola. Znając różnicę potencjału pola elektrycznego (ΔV) i natężenie (I) płynącego prądu oraz odległości między elektrodami, można określić wartość oporności właściwej zgodnie z prawem Ohma.

Oporność właściwa gruntów zależy od wielu czynników, w tym przede wszystkim od porowatości, wilgotności, stężenia soli rozpuszczonych w wodzie wypełniającej pory gruntowe, składu mineralnego szkieletu gruntowego, temperatury, wielkości i kształtu ziaren oraz wzajemnego ich ułożenia względem siebie (Archie 1942, Keller i Frischknecht 1966, Abu-Hassanein i in. 1996, Samouelian i in. 2005). Czynnikiem niewątpliwie decydującym o oporności elektrycznej ośrodka jest przewodność elektryczna elektrolitu (wody porowej) obecnego w porach gruntowych. Czynnikiem wywierającym istotny wpływ na oporność właściwą ośrodka gruntowego jest też jego porowatość. Dla większości skał i gruntów istnieje empiryczna zależność sformułowana przez G.E. Archiego w 1942 roku, wyrażona jako stosunek oporności ośrodka gruntowego w pełni nasyconego i cieczy zawartej w porach gruntu, który nazywany jest wskaźnikiem ułożenia ziaren:

$$F = \frac{\rho_{bSAT}}{\rho_f} = a \cdot n^{-m} \quad (1)$$

gdzie:

F – wskaźnik ułożenia ziaren [–],
 ρ_{bSAT} – oporność właściwa gruntu w stanie pełnego nasycenia porów wodą [$\Omega \cdot m$],
 ρ_f – oporność właściwa cieczy obecnej w porach gruntowych [$\Omega \cdot m$],

a – stała empiryczna [–],

n – porowatość [–],

m – stała empiryczna zależna od kształtu ziaren gruntu [–].

Należy zwrócić uwagę na fakt, że wskaźnik ułożenia ziaren odnosi się do ośrodka w pełni nasyconego wodą gruntową. Zgodnie z równaniem (1) na podstawie znajomości oporności elektrycznej ośrodka w stanie pełnego nasycenia oraz oporności elektrycznej wody występującej w porach ośrodka określa się porowatość gruntów, którą można traktować jako porowatość efektywną (n_e), gdyż przepływ wody i prądu elektrycznego w strefie saturacji zachodzi wyłącznie za pośrednictwem porów otwartych (Senehal i in. 2005). W przypadku niepełnego nasycenia porów wodą oporność elektryczna gruntu zwiększa się zgodnie z zależnością (Archie 1942):

$$\frac{\rho_b}{\rho_{bSAT}} = S_r^{-B} \quad (2)$$

gdzie:

ρ_b – oporność właściwa gruntu [$\Omega \cdot m$],

S_r – stopień wilgotności gruntu [–],

B – stała empiryczna [–].

Cel badań własnych

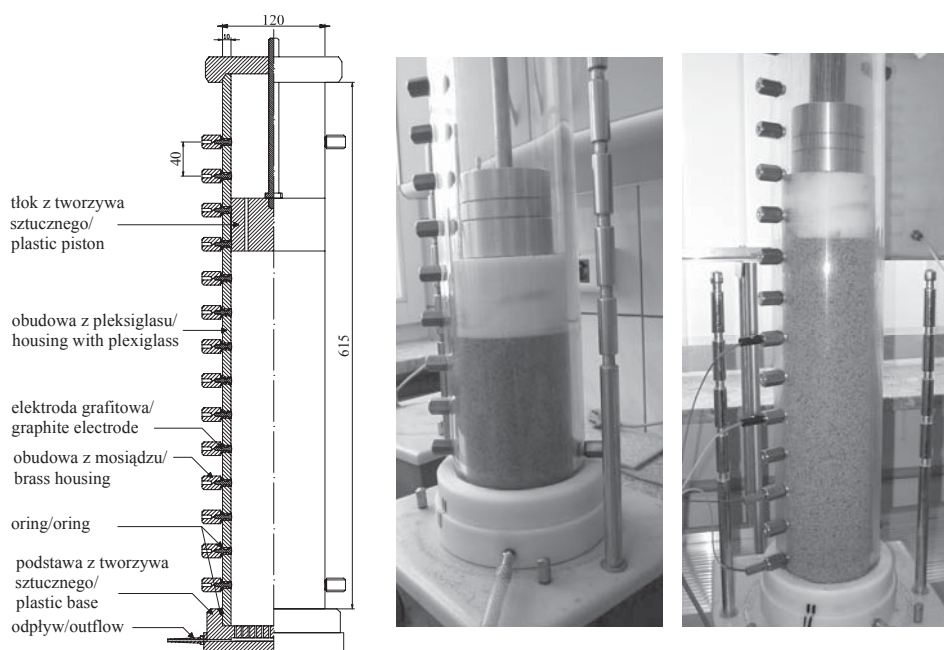
Celem badań laboratoryjnych było określenie porowatości piasków o zróżnicowanym uziarnieniu i stopniu zagęszczenia. Zasadniczą inspiracją podjętych badań laboratoryjnych było udokumentowanie możliwości wykorzystania pomiaru oporności elektrycznej do pomiaru porowatości gruntów i opracowanie metodyki interpretacji wyników badań terenowych za pomocą klasycznych pomia-

rów oporności elektrycznej stosowanych w geofizyce i pomiarów sondą RCPTu (sondą CPTu wyposażoną w moduł do pomiaru oporności elektrycznej).

Metodyka badań

W laboratorium Katedry Geoinżynierii Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW wykonane zostało stanowisko badawcze, które składało się ze specjalnej kolumny wyposażonej w niewrażliwe chemicznie elektrody grafitowe do pomiaru oporności elektrycznej piasków oraz aparatury zasilająco-pomiarowej i komputerowego rejestratora. Zasadniczy element stanowiła kolumna (rys. 2), którą wypełnia

się badanym gruntem. Kolumna została wykonana całkowicie z materiałów, które nie przewodzą prądu elektrycznego, i osadzona w podstawie z tworzywa sztucznego uszczelnionego oringiem. Wysokość kolumny wynosiła 640 mm, średnica wewnętrzna 100 mm, a grubość ścian 10 mm. Jeden z elementów podstawy był porowaty i połączony z układem odpływu płynu z kolumny. W górnej części kolumny znajdowała się pokrywa z centralnie nawierconym otworem, w którym poruszała się prowadnica tłoka wykonanego również z materiału będącego izolatorem prądu. Tłok był dokładnie dopasowany do ścian, jednak mógł swobodnie poruszać się w jej wnętrzu, posiada też dwa otwory, którymi mógł wypływać nadmiar wody z próbki. Zain-



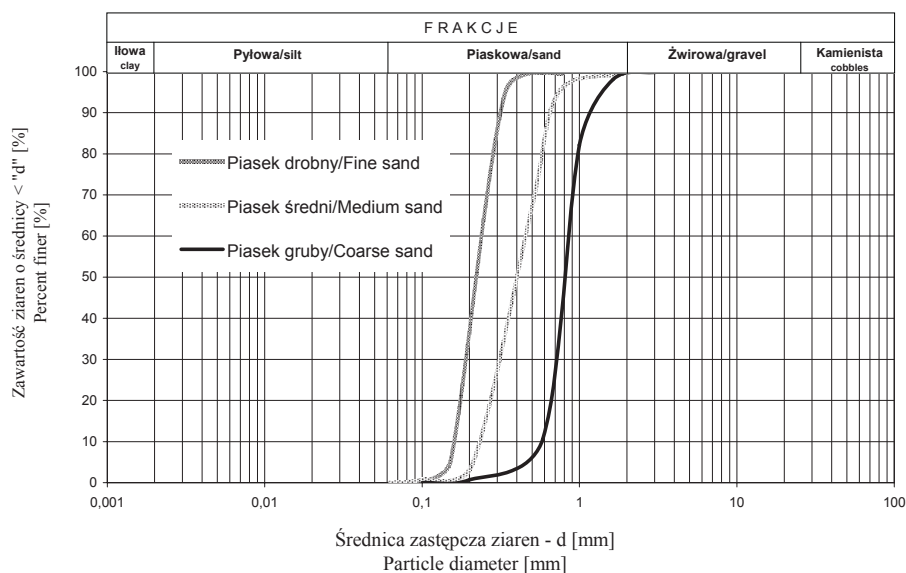
RYSUNEK 2. Kolumna cylindryczna stosowana w pomiarach oporności elektrycznej piasków, schemat kolumny i moment przygotowania próbek
 FIGURE 2. Cylindrical chamber for measuring electrical resistivity of sands, scheme of apparatus and sample preparation

stalowane elektrody pozwalały kontrolować zmienność przewodności elektrycznej na 3 poziomach próbki gruntu. Przed przystąpieniem do badań przeprowadzono kalibrację kolumny, stosując roztwór chlorku potasu o znanej oporności elektrycznej. W badaniach laboratoryjnych piasków stosowany był prąd przemienny o częstotliwości 10 Hz i napięciu elektrycznym 80 V.

Do badań laboratoryjnych pobrano próbki piasków drobnych, średnich i grubych oraz żwirów. Przed przystąpieniem do badań w kolumnie cylindrycznej piaski zostały przepłukane wodą destylowaną, aby zanieczyszczenia badanych materiałów gruboziarnistych nie zmieniły składu chemicznego i oporności elektrycznej stosowanych w badaniach roztworów. Dotychczasowe badania wykazały (np. Rinaldi i Cuestas 2002), że wyniki pomiarów oporności elektrycznej w gruntach „oczyszczonych” i natural-

nych wykazują różnicę tylko ze względu na błędną wartość przyjętej oporności elektrycznej roztworu. Dla badanych gruntów wykonano sitową analizę uziarnienia zgodnie z PN-86/B-02480 (rys. 3) i wyznaczono minimalne oraz maksymalne gęstości objętościowe szkieletu gruntowego w aparacie widelkowym (zgodnie z PN-88/B-04481). Parametry piasków zamieszczono w tabeli 1.

Badania w kolumnach cylindrycznych prowadzone były dla próbek piasku przy pełnym nasyceniu porów wodą. Przemyty i wysuszony w suszarce grunt wbudowywany był w komorze pomiarowej warstwami o miąższości około 5 cm i zagęszczany pod obciążeniem około 1 kN do momentu uzyskania docelowego stopnia zagęszczenia i wysokości około 45 cm. Roztwór chlorku potasu ($\rho_f = 25,28\text{--}35,51 \Omega\text{m}$) doprowadzany był dopływem w dnie cylindra, co umożliwiało odpowietrzenie prób-



RYSUNEK 3. Krzywe uziarnienia badanych piasków
FIGURE 3. Grain size distributions of tested sands

ki. Nasączenie próbki prowadzono do momentu pojawienia się swobodnego zwierciadła wody ponad tłokiem obciążającym kolumnę gruntu. Po podłączeniu elektrod do źródła prądu i miernika wykonywano kilkadziesiąt pomiarów z częstotliwością 12 s dla tej samej próbki zagęszczonego gruntu. Jako wynik końcowy oporności elektrycznej przyjmowano średnią arytmetyczną wyników pomiarów.

Wyniki badań

Przeprowadzone badania wykazały zależność między mierzoną opornością elektryczną próbek a ich porowatością obliczoną na podstawie gęstości objętościowej, wilgotności i gęstości właści-

wej (w obliczeniach przyjęto $\rho_s = 2,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). W przypadku pełnego nasycenia porów wodą oporność elektryczna gruntu, przy zmniejszającej się porowatości, zwiększała się zgodnie z zależnością (1). W przypadku ośrodka nie w pełni nasyconego zmniejszenie porowatości gruntu będzie prowadziło (zgodnie z równaniem Archiego) do zwiększenia stopnia wilgotności ośrodka gruntowego i zmniejszenia jego oporności elektrycznej. Wyniki badań wpływu porowatości piasków na oporność elektryczną oraz cechy wskaźnikowe badanych piasków i stopień zagęszczenia zamieszczone zostały w tabeli 1.

Zależność między opornością elektryczną ośrodka gruntowego w pełni nasyconego roztworem (ρ_{bSAT}) i opornością elektryczną roztworu (ρ_f) wyrażona

TABELA 1. Wyniki pomiarów oporności elektrycznej piasków
TABLE 1. Test results of electrical resistivity measurements of sands

Rodzaj gruntu Soil	Nr badania Test number	Wskaźnik porowatości e [-] Void ratio	Porowatość n [-] Porosity	Oporność elektryczna ośrodka ρ [Ωm] Electrical resistivity	Wskaźnik ułożenia ziaren F [-] Formation factor	Stopień zagęszczenia I_d / D_r [-] Relative density
Piasek drobny Fine sand $d_{50} = 0,22 \text{ mm}$ $e_{\min} = 0,457$ $e_{\max} = 0,763$	1	0,491	0,329	152,47	4,84	0,88
	2	0,529	0,346	141,01	4,47	0,76
	3	0,599	0,375	120,48	3,82	0,53
	4	0,682	0,405	111,01	3,52	0,26
	5	0,728	0,421	104,58	3,32	0,11
Piasek średni Medium sand $d_{50} = 0,40 \text{ mm}$ $e_{\min} = 0,398$ $e_{\max} = 0,721$	6	0,442	0,306	160,02	5,08	0,86
	7	0,519	0,342	139,04	4,41	0,63
	8	0,675	0,403	119,17	3,78	0,14
	9	0,631	0,387	118,20	3,75	0,28
	10	0,549	0,354	102,94	4,07	0,53
	11	0,589	0,371	98,71	3,90	0,41
Piasek gruby Coarse sand $d_{50} = 0,80 \text{ mm}$ $e_{\min} = 0,399$ $e_{\max} = 0,659$	12	0,421	0,296	184,76	5,86	0,92
	13	0,469	0,319	162,48	5,15	0,73
	14	0,499	0,333	154,28	4,89	0,62
	15	0,582	0,368	145,27	4,61	0,30
	16	0,648	0,393	121,91	3,87	0,04

została za pomocą wskaźnika ułożenia ziaren (F). Wartość wskaźnika ułożenia ziaren zależy od wielkości i rozkładu porów gruntowych i opisuje zdolność do przewodzenia prądu przez pory otwarte wypełnione elektrolitem. Wartość wskaźnika ułożenia ziaren dla gruntów o identycznej porowatości i geometrii porów jest taka sama, bez względu na oporność elektryczną roztworu wypełniającego pory gruntowe. Obecność porów otwartych (zależna od stopnia zagęszczenia próbki) determinuje zdolność gruntu do przewodzenia prądu elektrycznego.

Na podstawie wyników badań ustalona została zależność między opornością elektryczną a porowatością, zgodnie z ogólną formułą podaną przez Archiego, i określono dla badanych piasków parametry równania. Do oceny dopasowania wartości porowatości pomierzonej i obliczonej przy użyciu proponowanej zależności zastosowano następujące miary: współczynnik determinacji krzywoliniowej (R^2), średni błąd względny (MRE), maksymalny błąd względny (MRD), średni kwadratowy błąd względny (MSRD). Na tej podstawie sformułowano zależność między porowatością a opornością elektryczną piasków i wody porowej w postaci:

$$n = \left(\frac{\rho_f}{\rho_{bSAT}} \right)^{0,70} \quad (3)$$

dla $R^2 = 91,2\%$, MRE = 3,8%, MRD = 10,5%, MSRD = 4,5%.

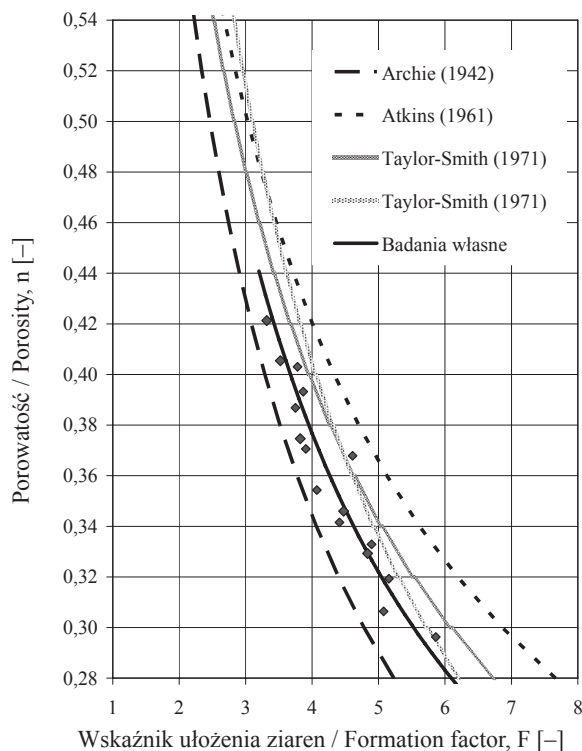
Otrzymana zależność charakteryzuje się współczynnikiem determinacji (R^2) większym od 90% i małą wartością błędu średniego (MRE). Zmiany wskaźnika ułożenia ziaren w funkcji porowatości, obliczone zgodnie z proponowaną zależno-

ścią, przedstawiono na rysunku 4. Proponowana zależność daje wyniki zbliżone do wyników prezentowanych w literaturze.

Wartości wskaźnika ułożenia ziaren piasków (F) uzyskane przy różnych stopniach zagęszczenia wahają się w zakresie od 3,3 do 5,85. Wartości stałych empirycznych wyznaczonych w równaniu dla piasków nie odbiegają od stałych wyznaczonych przez innych badaczy (rys. 4). Określenie porowatości gruntu niespoistego w warunkach terenowych będzie możliwe wtedy, gdy będziemy znali oporność elektryczną tego ośrodka w stanie pełnego nasycenia i oporność wody gruntowej. Zastosowanie proponowanego równania do określenia porowatości na podstawie pomiarów terenowych oporności elektrycznej wymaga opracowania procedur poboru próbek wody (ilości, głębokości, częstotliwości) do analiz laboratoryjnych. W tym celu badania elektrooporowe (np. sondą RCPT) powinny być uzupełnione badaniami systemem BAT, który umożliwia pobór wody z różnych głębokości bez zaburzenia chemizmu wody i łączenia różnych poziomów wodonośnych, jak ma to miejsce w przypadku wierceń.

Wnioski

Tradycyjne metody wykorzystywane dotychczas powszechnie do charakterystyki budowy geologicznej i określania parametrów gruntów mogą być uzupełnione badaniami geofizycznymi. Do wyznaczania parametrów gruntów może być przydatny pomiar oporności elektrycznej przeprowadzany zarówno w warunkach in situ, jak i laboratoryjnych. Równanie zaproponowane w ni-



RYSUNEK 4. Zależność między wskaźnikiem ułożenia ziaren (F) a porowatością (n) piasków
 FIGURE 4. Formation factor (F) vs. porosity (n) for tested sands

niejszej pracy pozwala wyznaczyć porowatość gruntów niespoistych na podstawie pomierzonej oporności elektrycznej gruntu i wody wypełniającej pory gruntowe. Zależność ta może znaleźć zastosowanie praktyczne w pomiarach terenowych, posiada jednak pewne ograniczenia, wynikające z tego, że odnosi się wyłącznie do stanu pełnego nasycenia porów gruntowych wodą.

Literatura

ABU-HASSANEIN Z.S., BENSON C.H., BOLTZ L.R. 1996: Electrical resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering* 122, 5: 397–406.

ARCHIE G.E. 1942: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* 146: 54–61.

EUROKOD 7: Projektowanie geotechniczne. Część I: Zasady ogólne.

FUKUE M., MINATO T., MATSUMOTO M., HORIBE H., TAYA N. 2001: Use of a resistivity cone detecting contaminated soil layers. *Engineering Geology* 60: 361–369.

KELLER G.V., FRISCHKNECHT F.C. 1966: *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, Oxford.

LECH M. 2006: Zastosowanie metody elektryczno-oporowej do rozpoznania warunków przepływu wody w ośrodku gruntowym. Rozprawa doktorska. Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa.

- MAYNE P.W., CHRISTOPHER B.R., DEJONG J. 2001: Manual on subsurface investigations. National Highway Institute. Publ. FHWA NHI-01-031, Washington.
- McCARTER W.J., BLEWETT J., CHRISP T.M., STARRS G. 2005: Electrical property measurements using a modified hydraulic oedometer. *Canadian Geotechnical Journal* 42, 2: 655–662.
- PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- RINALDI V.A., CUESTAS G.A. 2002: Ohmic conductivity of compacted silty clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128, 10: 824–834.
- SENECHAL P., PERROUD H., KEDZIOREK M., BOURG A., GLOAGUEN E. 2005: Non destructive geophysical monitoring of water content and fluid conductivity anomalies in the near surface at the border of an agricultural field. *Subsurface Sensing Technologies and Applications* 6, 2: 167–192.
- SAMOUELIAN A., COUSIN I., TABBAGH A., BRUAND A., RICHARD G. 2005: Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research* 83: 173–193.
- SREEDEEP S., RESHMA S.C., SINGH D.N. 2004: Measuring soil electrical resistivity using a resistivity box and a resistivity probe. *Geotechnical Testing Journal* 27, 4: 411–415.
- STOPIŃSKI W. 1986: Analiza zmian oporności elektrycznej górotworu w warunkach eksploatacji górniczej. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences M-7 (186).
- USOWICZ B. 2002: Statystyczno-fizyczne modele przepływu masy i energii w ośrodku porowatym. *Acta Agrophysica* 29: 1–112.
- ZAHODY A.A.P., EATON G.P., MABEY D.R. 1974: Electrical methods in US Geological Survey. Ch. 2: Application of surface geophysics to ground – water investigations. Technical Water Resources, USGS Publications.

Summary

Evaluation of cohesionless soil porosity using electrical resistivity measurements. Electrical resistivity measurement is being used increasingly to assess physical properties of soils and other porous materials. Recent application of this method to geotechnical and environmental site characterization has generated a wide collection of new apparatus for estimating soil electrical resistivity (Abu-Hassanein et al. 1996, Fukue et al. 2001, Sreedeeep et al. 2004, McCarter et al. 2005). This study demonstrates the efficiency of electrical resistivity measurements in laboratory investigations. Electrical data from laboratory tests permitted to estimate porosity of sandy soils and shown that investigated sand samples obey Archie's law.

Authors' address:

Mariusz Lech, Kazimierz Garbulewski
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
 Katedra Geoinżynierii
 ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
 Poland
 e-mail: mariusz_lech@sggw.pl
 kazimierz_garbulewski@sggw.pl