



Mariusz LECH*, Marek BAJDA*, Katarzyna MARKOWSKA-LECH*, Zdzisław SKUTNIK*

Przykłady zastosowania pomiarów oporności elektrycznej w geotechnice środowiskowej

Streszczenie: Do rozpoznania warunków geotechnicznych podłoża budowli i do oceny oddziaływania na środowisko projektowanych budowli rutynowe metody badań mogą być niewystarczające lub wręcz nieodpowiednie. Bardzo pomocne mogą być metody geofizyczne, które zweryfikowane innymi metodami badawczymi znajdują w ostatnich latach szerokie zastosowanie w praktyce inżynierskiej, zarówno w geotechnice, jak i w badaniach środowiskowych. Do zalet metod geofizycznych zaliczyć można nieniszczący i nieinwazyjny charakter, niskie koszty i szybkie uzyskanie wyników, możliwość ich stosowania w różnorodnych materiałach, w tym w gruntach, skałach litych, materiałach odpadowych i utworach antropogenicznych.

W artykule przedstawione zostaną wyniki badań przeprowadzonych metodą tomografii elektrooporowej ERT oraz badania sondą RCPT, która stanowi połączenie w jednym urządzeniu pomiarowym sondy statycznej CPTU powszechnie stosowanej w badaniach geotechnicznych z modulem do pomiaru oporności elektrycznej ośrodka gruntowego. Zaprezentowane w artykule wyniki pomiarów elektrooporowych wykorzystano do oceny stanu technicznego obiektów hydrotechnicznych, rozpoznania przebiegu stropu ilów w podłożu budowli, rozpoznania głębokości i budowy podłoża oraz oceny zanieczyszczenia gruntów w sąsiedztwie składowisk odpadów. Ponadto, w artykule przedstawiono wyniki badań RCPT w celu szczegółowego rozpoznania budowy geologicznej podłoża oraz do oszacowania porowatości ilów plicieńskich z terenu Warszawy.

Z zaprezentowanych w pracy wyników można wywnioskować, że badania te mogą być użyteczne do oceny jakościowej budowli inżynierskich i rozpoznania budowy ich podłoża. Ocena ilościowa np. porowatości gruntów wymaga natomiast znajomości oporności elektrycznej wody gruntowej a zależność przedstawiona w artykule ma zastosowanie lokalne ze względu na różnorodność czynników wpływających na otrzymywane wyniki.

Słowa kluczowe: tomografia elektrooporowa, obwałowania, składowiska odpadów, porowatość, ily plicieńskie

Applications of the electrical resistivity survey to geotechnical and environmental problems

Abstract: Standard test methods may not be suitable or sufficient to determine the geotechnical conditions of the structure's subbase and the effects of the designed structures on the environment. Geophysical test methods,

* Dr inż., Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa; e-mail: mariusz_lech@sggw.pl

validated with other methods, may prove useful and have, in the recent years, found many new applications in engineering practice, both in geotechnical engineering and environmental surveys. The advantages of the geophysical methods include a non-destructive and non-invasive nature of the test, low costs and quick results, as well as compatibility with different materials, including soils, solid rocks, wastes and anthropogenic formations. The article presents the results of electrical resistivity tomography (ERT) and resistivity cone penetration test (RCPT), which is a combination of a static CPTU probe, commonly used in geotechnical surveys with a module for soil resistivity tests. The results of electric resistivity tests were used to rate the condition of hydro-engineering structures, determine the profile of the upper surface of clay deposits in the subbase, investigate the subbase and ground contamination near a landfill. The article also presents the RCPT results for a detailed determination of the geological structure of the subbase and the porosity of the Pliocene clay deposits in the Warsaw area. The results show that the tests can be used in a qualitative analysis of contamination of the ground and water subbase, condition rating of the hydro-engineering structures and investigation of the structure's subbase. The electrical resistivity tests can also be used in a quantitative analysis, e.g. to determine the soil porosity, however they require a known value for the electrical resistivity of water and the relationships are limited to local use due to the variety of factors affecting the results.

Keywords: electrical resistivity, levee, waste disposal, porosity, Pliocene clays

Wprowadzenie

Metody geofizyczne od dziesięcioleci są stosowane w poszukiwaniach złóż surowców mineralnych i energetycznych, badaniach geologiczno-inżynierskich a obecnie również w badaniach geotechnicznych (Heiland 1943; Keller i Frischknecht 1966; Reynolds 2011; Lowrie 2014). Wśród wielu metod stosowanych w rozwiązywaniu zadań naukowych i badaniach polowych można wyróżnić między innymi metody: elektrooporową, elektromagnetyczną i sejsmiczną, które w równym stopniu stosowane są do geologiczno-inżynierskiego rozpoznania warunków gruntowych podłoża (Abu-Hassanein i in. 1996; Lima i Oliveira 2004; Samuelian i in. 2005), oceny stanu środowiska gruntowo-wodnego (Campanella i Weemes 1990; Allred i in. 2008), oceny stanu technicznego budowli hydrotechnicznych i innych obiektów inżynierskich (Stopiński 2003; Stopiński i Chelidze 2003; Inazaki 2007; Nagy i Turi 2008; Niederleithinger i in. 2008), w monitoringu składowisk odpadów (Fukue i in. 2001; Elis i in. 2004; Mondelli 2008; Koda i in. 2015), do oceny porowatości i wilgotności (Archie 1942) a także odkształceniowych parametrów podłoża (Stokoe i Santamarina 2000).

Badania geofizyczne polegają na mierzeniu właściwości fizycznych skał i gruntów, zazwyczaj z powierzchni ziemi bez naruszania struktury gruntu, kompleksowym przetwarzaniu i interpretowaniu zarejestrowanych danych w celu uzyskania informacji o rodzaju i strukturze badanego ośrodka. Jedną z metod, która wykorzystywana jest od lat w rozpoznaniu podłoża jest metoda elektrooporowa. Metoda ta bazuje na założeniu, że grunty i skały, podobnie jak inne materiały, charakteryzują się zdolnością do przewodzenia prądu elektrycznego i jak wykazały dotychczasowe badania (Archie 1942; Abu-Hassanein i in. 1996; Samuelian i in. 2005), jest wrażliwa na wilgotność i stan nasycenia wodą ośrodka gruntowego oraz zanieczyszczenie wody w porach gruntowych, szczególnie związkami soli.

Intensywny rozwój metod badawczych w ostatnich latach zarówno w geofizyce, jak i w geotechnice doprowadził również do zmodyfikowania istniejących urządzeń pomiarowych – sondy RCPTU (stożkowa sonda statyczna z pomiarem oporności elektrycznej, rys. 1), SCPTU (stożkowa sonda statyczna z modułem sejsmicznym), SDMT (dylatometr Marchettiego z modułem sejsmicznym) – pozwalających na pomiar obok standardowych

parametrów sondowania np. oporności elektrycznej bądź prędkości fali sejsmicznej (Campanella i Weemees 1990; Campanella 2008; Marchetti i in. 2008). Badania te wykorzystywane są przede wszystkim w problematyce geotechnicznej dotyczącej oceny warunków posadowienia budowli (badania sejsmiczne) lub gdy zachodzi potrzeba równoczesnej oceny stanu środowiska gruntowo-wodnego (badania z pomiarem oporności elektrycznej).

1. Metodyka badań

W praktyce pomiary oporności elektrycznej gruntu przeprowadzane są przeważnie metodą wykorzystującą układ składający się z czterech elektrod. W metodzie tej prąd elektryczny doprowadzany jest do gruntu za pomocą dwóch elektrod A i B , które wzbudzają pole elektryczne, natomiast elektrody M i N mierzą różnicę potencjału tego pola (np. Lówrie 2014). Znając różnicę potencjału pola elektrycznego (ΔV) i natężenie (I) płynącego prądu oraz odległości pomiędzy elektrodami można określić wartość oporności pozornej gruntu ze wzoru:

$$\rho_b = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

gdzie:

- ρ_b – oporność pozorna gruntu [Wm],
- K – stała geometryczna (w układzie Wennera $K = 2 \text{ pa [m]}$),
- ΔV – różnica potencjału pola elektrycznego pomiędzy elektrodami M i N [V],
- I – natężenie prądu wzbudzonego w gruncie [A].

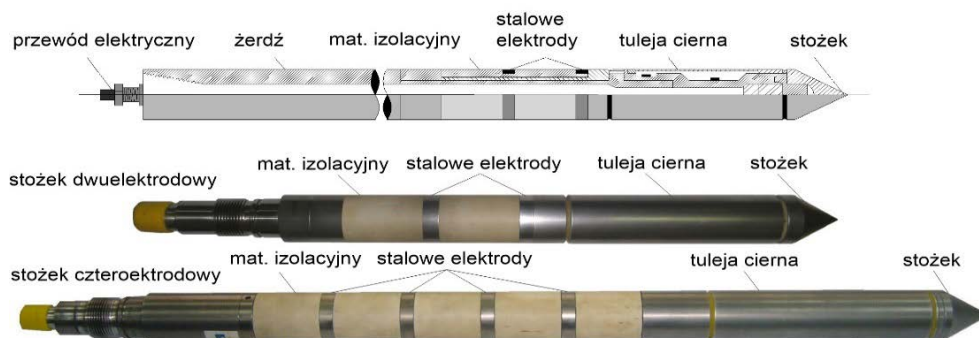
Badania powierzchniowe, które przedstawione zostały w niniejszej pracy prowadzone były metodą tomografii elektrooporowej przy zastosowaniu układu elektrod zgodnym ze schematem Wennera. Metodyka prowadzenia badań została niejednokrotnie opisana w wielu pracach i podręcznikach z zakresu geofizyki (Loke 2000; Reynolds 2011).

Mniej znanym i rzadko spotykanym w praktyce urządzeniem jest stożek RCPTU (rys. 1) stanowiący połączenie w jednym urządzeniu pomiarowym zalet sondowania statycznego CPTU z pomiarem oporności elektrycznej gruntu. Sonda ta składa się z dwóch zasadniczych części: pierwsza z nich służy do pomiarów parametrów określanych w standardowym badaniu CPTU, druga część sondy to moduł mierzący oporność elektryczną badanego ośrodka.

Badanie sondą CPTU polega na wciskaniu ze stałą prędkością 2 cm/s stożkowej końcówki z ciągłym pomiarem oporów gruntu i wzbudzanych ciśnień wody w porach. Stożek zainstalowany na końcu zestawu żerdzi ma kąt 60° i powierzchnię przekroju 10 lub 15 cm². W czasie badania sygnały elektryczne z sensorów zainstalowanych na powierzchni stożka i cylindrycznej obudowie przesyłane są kablami lub systemem bezprzewodowym do rejestratora; zwykle rejestrowane są z częstotliwością 1 Hz następujące dane: głębokość, czas, opór stożka (q_c), tarcie gruntu na tulei (f_s), wzbudzone ciśnienie wody w porach (u_2) i kąt odchylenia zestawu żerdzi od pionu. Dla każdej pomiarowej głębokości obliczany jest współczynnik tarcia R_f i współczynnik ciśnienia wody w porach B_q . Wyniki badań przedsta-

wiane są w formie ciągłych wykresów pokazujących zmienność pomierzonych parametrów w podłożu lub budowli ziemnej (Lunne i in. 1997).

Badanie sondą RCPTU odbywa się podobnie jak sondą CPTU, przy czym dodatkowo rejestruje się oporność elektryczną gruntu. System pomiarowy sondy RCPTU stanowią dwie bądź cztery elektrody w kształcie odizolowanych od siebie pierścieni, pomiędzy którymi przepływa prąd przemienny o częstotliwości 2000 Hz. Schemat i widok sond stosowanych w badaniach przedstawiony został na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat i widok stożków RCPTU

Fig. 1. Schematic diagram of RCPTU cones

Porowatość jest jednym z czynników wywierających wpływ na oporność elektryczną ośrodka gruntowego. Dla większości skał i gruntów istnieje empiryczna zależność sformułowana przez Archiego (1942), wyrażona jako stosunek oporności ośrodka gruntowego w pełni nasyconego wodą i samej wody zawartej w porach gruntu, nazywana wskaźnikiem uformowania F :

$$F = \frac{\rho_{bSAT}}{\rho_f} = \frac{1}{an^m} \quad (2)$$

gdzie:

- F – wskaźnik uformowania [-],
- ρ_{bSAT} – oporność właściwa gruntu w stanie pełnego nasycenia porów wodą [$\Omega \cdot m$],
- ρ_f – oporność właściwa wody obecnej w porach gruntowych [$\Omega \cdot m$],
- n – porowatość [-],
- a, m – stałe empiryczne zależne od scementowania i kształtu ziaren gruntu.

Zgodnie z równaniem (2) możemy, na podstawie znajomości oporności elektrycznej ośrodka oraz oporności elektrycznej wody wypełniającej pory gruntowe, określić porowatość ośrodka. Z uwagi na dokładność i rozdzielczość pomiaru sondą RCPTU badania te zostały wykorzystane do określenia porowatości ilów plioceńskich występujących na terenie Warszawy i zostały opisane w rozdziale 5.

2. Wybrane przykłady zastosowania pomiarów oporności elektrycznej

2.1. Ocena działania uszczelnień poziomych i pionowych na składowiskach odpadów

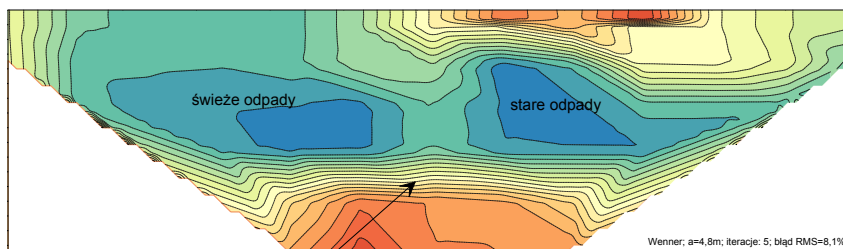
Czynnikami wywierającym wpływ na oporność elektryczną ośrodka gruntowego są zawartość wody w gruncie oraz stężenie soli w niej rozpuszczonych. Wpływ zasolenia wody gruntowej ma zatem istotny wpływ na parametr oporności elektrycznej gruntu i wody gruntowej i należy spodziewać się różnic w oporności gruntów, które mogą być zanieczyszczone odciekami wydostającymi się ze składowisk odpadów. Zastosowanie w takich przypadkach metody elektrooporowej do monitorowania stanu technicznego uszczelnień składowisk odpadów, okonturowania zasięgu ewentualnych zanieczyszczeń w gruncie oraz wskazania dróg migracji tych zanieczyszczeń jest w pełni uzasadnione. Ponadto, badania te umożliwiają wytypowanie miejsc badań szczegółowych: wierceń, miejsc instalacji piezometrów i punktów poboru próbek do laboratoryjnych analiz chemicznych.

Pierwszy z obiektów to czynne składowisko odpadów komunalnych, które zostało zlokalizowane w wyeksploatowanym wyrobisku kruszywa. Jest to składowisko podziemne o głębokości niecki dochodzącej do 12 m p.p.t. Podstawa składowiska oraz jego skarpy uszczelnione są geomembraną HDPE o grubości 1,5 mm, pod którą została ułożona warstwa gliny o miąższości 0,5 m.

Na podstawie wierceń w podłożu stwierdzono występowanie morenowych glin i glin piaszczystych o miąższości około 4 m podścielonych piaskami i żwirami o nieustalonej głębokości zalegania spągu. Badania elektrooporowe wykonane zostały metodą Wennera przy rozstawie elektrod wynoszącej 4,8 m i długości profilu wynoszącym 72 m (rys. 2).

W centralnej i prawej części przekroju od powierzchni terenu oporność elektryczna wyinterpretowana została na 150–200 Ωm i wynika ze zlokalizowanej w tym miejscu gruntowej drogi dojazdowej do kwatery składowiska. Poniżej, znajdują się odpady stare (przykryte), których oporność elektryczną oszacowano na około 30–40 Wm . Z lewej strony przekroju zlokalizowana jest kwatery, w której deponowane są zmieszane odpady komunalne o oporności poniżej 50 Wm .

Istotnym elementem przekroju jest jego centralna część i granica pomiędzy bryłą składowiska, a gruntami położonymi poniżej uszczelnienia podstawy. W przekroju na głębokości pomiędzy 12 a 16 m p.p.t. występują grunty o oporności powyżej 160 Ωm , co nie wskazuje



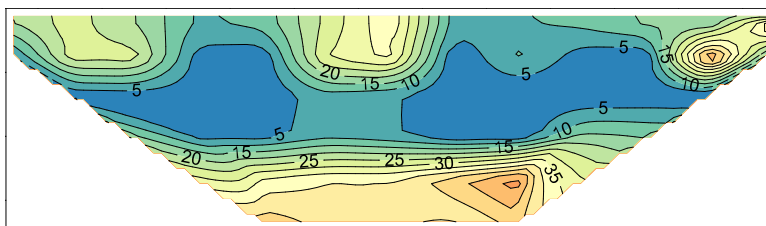
Rys. 2. Przekrój geoelektryczny

Fig. 2. The electrical resistivity cross-section

na występowanie nieszczelności w dnie i skarpacek składowiska. Prowadzony monitoring wód podziemnych i badania próbek wody z piezometrów również potwierdzają, że odcieki nie przedostają się poza uszczelnienie składowiska.

Kolejny przykład to wyniki badań elektrooporowych wykorzystane w celu oceny szczelności przesłony przeciwfiltracyjnej wokół funkcjonującego składowiska zlokalizowanego w rejonie dużej aglomeracji miejskiej. Wokół tego obiektu pod koniec lat dziewięćdziesiątych XX wieku wykonana została pionowa przesłona przeciwfiltracyjna w technologii ściany szczelinowej. Badania miały na celu wskazanie potencjalnych nieszczelności przesłony oraz wytypowanie miejsc do badań kontrolnych przepuszczalności materiału, z którego wykonano przesłonę.

Pomiary elektrooporowe metodą Wennera przy rozstawie elektrod wynoszącej 5 m prowadzone były wzdłuż trasy uszczelnienia w odległości około 1,5 m od przesłony po jej zewnętrznej stronie a także od wewnątrz odizolowanego obszaru. Analizując zmiany oporności elektrycznej w przykładowych przekrojach na rysunku 3 można stwierdzić występowanie stref o obniżonej oporności elektrycznej (poniżej 1 Wm) w przekroju po wewnętrznej stronie przesłony. Potwierdza to występowanie w tej strefie gruntów zanieczyszczonych odciekami ze składowiska. Poza przesłoną (przekrój drugi rys. 3) wyinterpretowane wartości oporności elektrycznej zawierają się w przedziale od 20 do 70 Wm w całym profilu objętym badaniem. Wynik nie wskazuje na występowanie w tym obszarze zanieczyszczeń pochodzących ze składowiska i dowodzi, że materiał, z którego wykonano przesłonę zachował swoje właściwości i mimo upływu czasu uszczelnienie nadal spełnia swoją rolę.



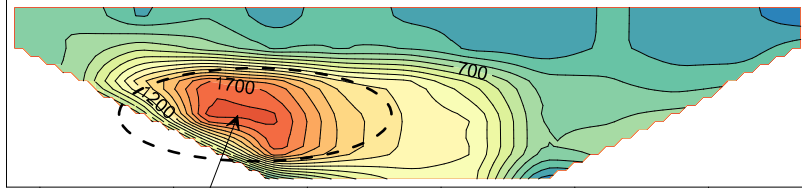
Rys. 3. Przekrój geoelektryczny od wewnątrz (A) i na zewnątrz (B) przesłony przeciwfiltracyjnej

Fig. 3. The electrical resistivity cross-section inside (A) and outside (B) the hydraulic barrier

2.2. Ocena stanu technicznego obiektów hydrotechnicznych

Badania mające na celu rozpoznanie budowy i stanu technicznego wybranego fragmentu wałów przeciwpowodziowych prowadzone były na fragmencie prawobrzeżnego wału Wisły w miejscu, w którym wielokrotnie podczas powodzi dochodziło do licznych przesiąków przez korpus i podstawę obwałowania. Korpus wału w rejonie badań uformowany został z piasków drobnych, natomiast podłoże tworzą aluwialne piaski lokalnie nadbudowane warstwą madowych osadów powodziowych.

Na 500-metrowym odcinku wału, który poddano badaniom, wykonanych zostało 15 przekrojów geoelektrycznych. Na 14 z nich wyinterpretowane wartości oporności elektrycznej wynosiły pomiędzy 600 a 800 Ωm (rys 4 przekrój na górze). W badaniach udokumentowany



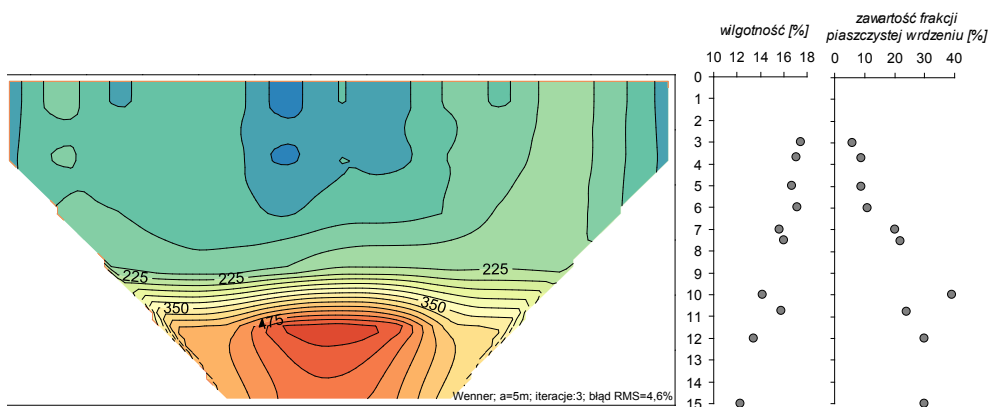
Rys. 4. Przekrój geoelektryczny obwałowania ziemnego

Fig. 4. The electrical resistivity cross-section of the earthen levee

został jeden odcinek, w którym wartości oporności elektrycznych znacznie odbiegały od tej normy. Na dolnym przekroju (rys. 4) stwierdzono strefę o znacznie wyższych wartościach oporności elektrycznej dochodzących do około 2000 Wm, które w pomiarach prowadzonych w miesiącach letnich i przy niskim stanie wody w rzece mogą oznaczać rozluźnienie materiału w tym obszarze. W celu weryfikacji wyników wykonane zostały badania sondą dynamiczną lekką, która jest powszechnie stosowana w praktyce inżynierskiej do kontroli zagęszczenia gruntów niespoistych. Sondowania potwierdziły rozluźnienie materiału w korpusie wału i wykazały występowanie w rejonie o wysokiej oporności elektrycznej – gruntów w stanie luźnym.

Drugim przykładem dokumentującym możliwość zastosowania metody elektrooporowej do kontroli stanu technicznego obiektów hydrotechnicznych są badania rdzenia zapory ziemnej zlokalizowanej w dorzeczu górnej Wisły. Na rysunku 5 przedstawione zostały wyniki badań elektrooporowych obejmujące swoim zasięgiem fragment rdzenia zbudowanego z gliny oraz wyniki badań wilgotności i zawartości frakcji piaszczystej materiału, z którego zbudowano uszczelnienie.

Różnice oporności elektrycznej rdzenia najbardziej różnią się od siebie na głębokości około 9 m i korespondują z wilgotnością i zawartością frakcji piaszczystej w materiale rdzenia zapory. Badania te potwierdzają możliwość monitorowania (za pomocą pomiarów elektrooporowych) zmian stanu nasycenia wodą rdzenia i całego korpusu zapory i będą kontynuowane podczas napełniania zbiornika.



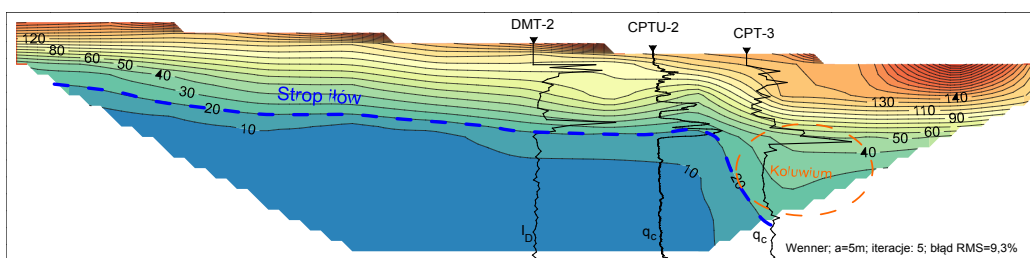
Rys. 5. Przekrój geoelektryczny rdzenia zapory ziemnej i wyniki pomiarów wilgotności materiału

Fig. 5. The electrical resistivity cross-section of the core and moisture content of the core material

2.3. Rozpoznanie położenia stropu iłów

Budowa geologiczna w rejonie Warszawy zaliczana jest do złożonych i trudnych do rozpoznania szczególnie w zakresie głębokości zalegania stropu silnie zaburzonych osadów plioceńskich, których właściwości są niejednokrotnie decydujące w projektowaniu geotechnicznym budowli zarówno naziemnych, jak i podziemnych.

W celu określenia stropu iłów w rejonie Skarpy Warszawskiej wykonany został przekrój elektrooporowy (rys. 6), na którym dodatkowo wrysowane zostały opory stożka (q_c) z badań CPTU oraz wartości wskaźnika dylatometrycznego (I_D) z sondowań DMT (Marchetti i in. 2008). Sondowania CPTU i DMT pozwoliły na dokładne rozpoznanie zróżnicowanej budowy osadów koluwalno-deluwialnych w strefie przyskarpowej. Zmiana oporu stożka i wskaźnika dylatometrycznego pozwoliły stwierdzić obecność stropu iłów na głębokości 6–6,5 m p.p.t. (DMT-2, CPTU-2) w zachodniej i centralnej części przekroju. Analizując opór stożka sondowania CPT-3 można stwierdzić występowanie dwóch stref: od 7,5 do 11 m – strefę o oporze stożka w zakresie 1–2 MPa (iły w strefie koluwiów) i drugą strefę poniżej 11 m o oporach stożka około 3 MPa stanowiącą strop nienaruszonych iłów.

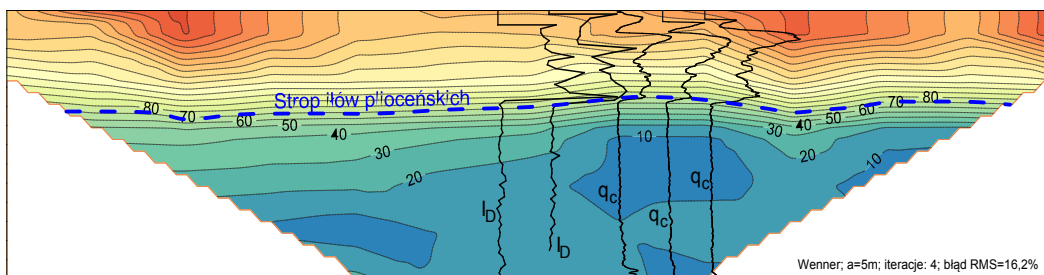


Rys. 6. Przekrój geoelektryczny obrazujący przebieg stropu iłów – Skarpa Warszawska (Lech i in. 2015)

Fig. 6. The electrical resistivity cross-section showing the top of clay layer – Skarpa Warszawska toe (Lech i in. 2015)

Na przekroju elektrooporowym do głębokości 2 m p.p.t. wyinterpretowano wartości oporności elektrycznej dochodzące do 200 Ωm . Przesuwając się w prawą stronę przekroju, można zaobserwować upad izolinii oporności, które odzwierciedlają położenie stropu nienaruszonych iłów. Strop ten układa się równoległe do nachylenia powierzchni terenu, a następnie gwałtownie upada (pomiędzy 40 a 50 m przekroju) w kierunku Wisły. Potwierdziły to badania inwazyjne – sondowania oraz wiercenia na trasie przekroju elektrooporowego.

Przekrój elektrooporowy podłoża na obiekcie Stegny otrzymany z badań geofizycznych przedstawiono na rysunku 7. Analiza przekroju pozwala stwierdzić, że grunty niespoiste o oporności elektrycznej dochodzącej do 200 Ωm zalegają do głębokości około 5 m. Wykreślone na przekroju opory stożka (q_c) z badań RCPTU oraz wskaźnika materiałowego (zmiana wartości I_D poniżej 0,6 świadcząca o przejściu w grunt ilasty) z sondowań DMT. wskazują na zmianę rodzaju gruntu w strefie badań na głębokości 4,0–4,2 m p.p.t.

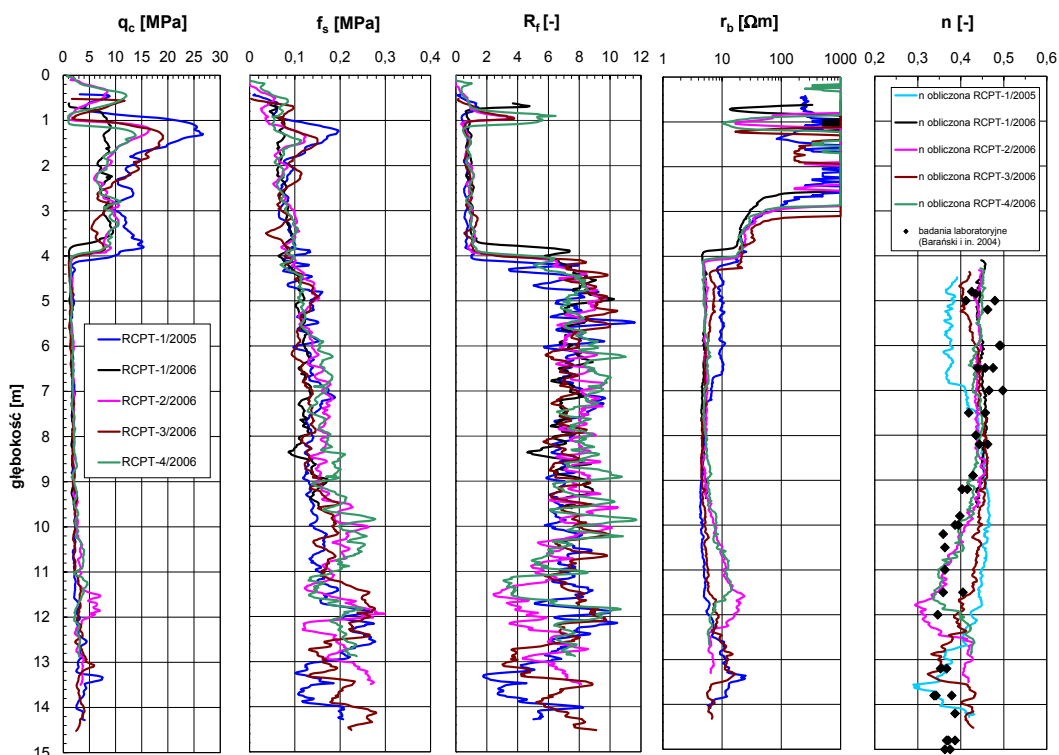


Rys. 7. Przekrój geoelektryczny obrazujący przebieg stropu ilów – Stegny (Lech i in. 2015)

Fig. 7. The electrical resistivity cross-section showing the top of clay layer – Stegny site (Lech et al. 2015)

2.4. Porowatość

Wyniki badań terenowych sondą RCPT zamieszczono na rysunku 8. Wykresy przedstawiają zmianę oporu wciskania stożka q_c , tarcia na pobocznicy f_s , współczynnika tarcia R_f oraz rozkład w profilu oporności elektrycznej r_b wyrażonej w Wm.



Rys. 8. Wyniki RCPT i obliczone wartości porowatości w ilach – Stegny

Fig. 8. RCPT penetration test results and predicted porosity of clays – Stegny site

Zakładając, że stopień wilgotności badanych ilów trzeciorzędowych jest bliski jedności (Kaczyński 2007) do określenia porowatości ilów zaproponowana została następująca zależność (Lech i Garbulewski 2009):

$$n = 0,39 \cdot \left(\frac{\rho_{bSAT}}{\rho_f} \right)^{-0,27} \quad (3)$$

gdzie:

- n – porowatość [–],
- ρ_{bSAT} – oporność właściwa gruntu w stanie pełnego nasycenia porów wodą [$\Omega \cdot m$],
- ρ_f – oporność właściwa cieczy w porach gruntowych z badań lab.
($\rho_f = 8,3 \text{ Wm}$).

Powyższą zależność wykorzystano do określenia rozkładu porowatości ilów, która wynosi pomiędzy $n = 0,34$ (dla I_π) a $n = 0,50$ (dla I) i została przedstawiona na rysunku 8.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono przykłady praktycznego wykorzystania badań elektrooporowych w geotechnice środowiskowej. Badania te mogą być wykonywane w fazie badań wstępnych rozpoznania warunków gruntowych, a także jako badania uzupełniające na potrzeby monitorowania zmian warunków gruntowo-wodnych w podłożu obiektów inżynierskich np. składowisk odpadów. Umożliwiają wstępne rozpoznanie i wskazanie obszarów do badań szczegółowych np. sondowaniami geotechnicznymi CPTU, RCPTU bądź DMT.

W szczególnych przypadkach, np. awariach systemów izolacyjnych wokół składowisk odpadów, często wymagane jest zastosowanie nietypowych metod rozpoznania podłoża. Badania geofizyczne metodą elektrooporową mogą być przydatne do oceny szczelności w wykonanych systemach izolacyjnych oraz oceny zanieczyszczenia wód i gruntów w rejonie składowiska i pod jego podstawą. Przeprowadzenie badań terenowych metodą nieinwazyjną jest istotne nie tylko z punktu uzyskania szerokiego zakresu informacji potrzebnych np. do opracowanie projektu rekultywacji, ale również z punktu widzenia stosunkowo krótkiego czasu trwania badania i ograniczenia użycia ciężkiego sprzętu budowlanego.

Z zaprezentowanych w pracy wyników można wywnioskować, że badania te mogą być użyteczne do oceny jakościowej zanieczyszczenia podłoża gruntowo-wodnego, do oceny stanu technicznego obiektów hydrotechnicznych i rozpoznania budowy podłoża tych obiektów. Metoda elektrooporowa może też być stosowana do oceny ilościowej, np. w ocenie porowatości gruntów, ale należy podkreślić, że wymaga ona znajomości oporności elektrycznej wody wypełniającej pory gruntowe, co związane jest z wykonywaniem wierceń. Ponadto zależności te mają jedynie zastosowanie lokalne ze względu na różnorodność czynników mających wpływ na otrzymane wyniki.

Literatura

- Abu-Hassanein i in. 1996 – Abu-Hassanein, Z.S., Benson, C.H. i Boltz, L.R. 1996. Electrical resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering* 122 (5), s. 397–406.
- Allred i in. 2008 – Allred, B.J., Daniels, J.J., Ehsani, M.R. 2008. *Handbook of Agricultural Geophysics*. New York: Taylor and Francis Group.
- 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, s. 54–61.
- Barański M. 2004. *Projekt badawczy KBN nr 5T15B04122: Ocena zachowania się ilów płoceńskich ze Stegien w warunkach naprężeń efektywnych*. Warszawa: Uniwersytet Warszawski.
- Campanella, R.G. 2008. Geo-environmental site characterization. [W:] Huang A. i Mayne P. W. red. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Taipei, 1–4 April 2008. London: Taylor and Francis Group, s. 3–15.
- Campanella, R.G. i Weemeees, I. 1990. Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies. *Canadian Geotechnical Journal* 27 (5), s. 557–567.
- Elis i in. 2004 – Elis, V.R., Mondelli, G., Giachetti H.L., Peixoto A.S.P. i Hamada J. 2004. The use of electrical resistivity for detection of leachate plumes in waste disposal sites. [W:] Mayne, P. W. i Quental Coutinho, R. red. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Porto 19–22 September 2004. London: Taylor and Francis Group, s. 467–474.
- Fukue i in. 2001 – Fukue, M., Minato, T., Matsumoto, M., Horibe, H. i Taya, N. 2001. Use of a resistivity cone detecting contaminated soil layers. *Engineering Geology* 60, s. 361–369.
- Heiland, C.A. 1943. *Geophysical exploration*. New Jersey: Prentice – Hall Inc.
- Inazaki T. 2007. Integrated geophysical investigation for the vulnerability assessment of earthen levee. *Proc. of the 20-th Annual Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. April 1–5, Denver, Colorado. Denver: EEGS, s. 101–108.
- Kaczyński, R. 2007. Geologiczno-inżynierskie zachowanie się ilów londyńskich i warszawskich. *Geologos* 11, s. 481–490.
- Keller, G.V. i Frischknecht, F.C. 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford: Pergamon Press.
- Koda i in. 2015 – Koda, E., Lech, M. i Osiński, P. 2015. Wykorzystanie metody elektrooporowej do rozpoznania nieszczelności izolacji składowisk odpadów. *XXVII konferencja naukowo-techniczna: Awarie budowlane*. Szczecin, 22-26 maja 2015. Szczecin: Wyd. ZUT, s. 349–356.
- Lech, M. i Garbulewski, K. 2009. Rozpoznanie właściwości ilów płoceńskich metodą elektrooporową. [W:] Dembicki E., Kumor M.K. i Lechowicz Z. red. *Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych*. Bydgoszcz: Wydawnictwo UTP, s. 369–376.
- Lech i in. 2015 – Lech, M., Bajda, M. i Markowska-Lech, K. 2015. Zastosowanie tomografii elektrooporowej do określenia głębokości zalegania stropu ilów na wybranych obiektach w rejonie Warszawy. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 3, s. 222–225.
- Lima A.S. i Oliveira A.C.V. 2004. Hydrogeological characterization by electrical resistivity surveys in granitic terrains [W:] Mayne P. W. i Quental Coutinho R. red. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Porto 19–22 September 2004. London: Taylor and Francis Group, s. 505–511.
- Lowrie, W. 2014. *Fundamentals of Geophysics* (2-nd edition). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lunne i in. 1997 – Lunne, T., Robertson, P.K. i Powell, J.J. 1997. *CPT in geotechnical practice*. London: Blackie Academic and Professional.
- Marchetti i in. 2008 – Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G. i Marchetti, D. 2008. In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT). *ASCE Geotechnical Special Publication* no. 170. Reston: ASCE, s. 1–20.
- Mondelli i in. 2008 – Mondelli, G., Zuquette, L.V., Elis, V.R. i Giachetti, H.L. 2008. Considerations about the geo-environmental site characterization of a MSW disposal site. [W:] Huang, A. i Mayne, P. W. red. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Taipei, 1-4 April 2008. London: Taylor and Francis Group, s. 895–901.
- Nagy, L. i Turi, D. 2008. Quality controlled geotechnical-geophysical investigation of flood levees in Hungary [W:] Huang, A. i Mayne, P. W. red. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Taipei, 1–4 April 2008. London: Taylor and Francis Group, s. 493–498.
- Niederleithinger i in. 2008 – Niederleithinger, E., Weller, A., Lewis, R. i Stoetzner, U. 2008. Evaluation of geophysical techniques for river embankment investigation [W:] Huang, A. i Mayne, P. W. red. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. Taipei, 1–4 April 2008. London: Taylor and Francis Group, s. 909–914.

- Reynolds, J.M. 2011. *An introduction to applied and environmental geophysics*. New York: John Wiley and Sons Ltd.
- Samouelian i in. 2005 – Samouelian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. i Richard, G. 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research* 83, s. 173–193.
- Stokoe, K.H. i Santamarina, J.C. 2000. Seismic-Wave-Based Testing In Geotechnical Engineering. [W:] *International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*. Melbourne, 19-24 November 2000. Lancaster: Technomic publishers, s. 1490–1536.
- Stopiński, W. 2003. Bedrock monitoring by means of the electric resistivity method during the construction and operation of Czorsztyn-Niedzica dam. *Acta Geophysica Polonica* 51(2), s. 215–256.
- Stopiński, W. i Chelidze, T. 2003. Fast-changing dynamic and percolating processes in crushed rocks monitored with electric resistivity measurements. *Acta Geophysica Polonica* 27(2), s. 203–213.