

WYKORZYSTANIE SOND GEOTECHNICZNYCH DO OCENY WPŁYWU BUDOWLI NA ŚRODOWISKO WODNO-GRUNTOWE

Kazimierz Garbulewski, Mariusz Lech

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Streszczenie. Rozwój badań geotechnicznych w zakresie geotechniki środowiskowej pozwala na kompleksową ocenę podłoża projektowanych budowli i ich wpływu na stan środowiska. Zakres oceny obejmuje oprócz parametrów wytrzymałościowo-odkształceniowych również parametry środowiskowe, między innymi: przepuszczalność hydrauliczną, poziom zwierciadła wody, kierunki jej przepływu oraz zanieczyszczenie podłoża substancjami chemicznymi. W artykule przedstawiono metodykę badań sondami geotechnicznymi podłoża budowli i sposób interpretacji wyników w celu oceny stanu środowiska wodno-gruntowego oraz wyniki badań przeprowadzone przez Katedrę Geoinżynierii SGGW na poligonie doświadczalnym Stegny w Warszawie.

Słowa kluczowe: badania in situ, sondy geotechniczne, przepuszczalność hydrauliczna, bariera geologiczna, zanieczyszczenie gruntu

WSTĘP

Zrównoważony rozwój, ochrona środowiska i jakość wód powierzchniowych oraz podziemnych to od kilku lat priorytetowe kierunki działalności naukowej, inspirowane i wspierane finansowo przez programy europejskie, w których niemały udział ma geotechnika. Jednym z zagadnień, wchodzących w zakres geotechniki środowiskowej – działu geotechniki poświęconemu ochronie środowiska – jest dynamiczny w ostatnich latach rozwój zastosowań badań geotechnicznych, w tym zwłaszcza sondowań, do szybkiego rozpoznawania środowiska geologicznego, w którym odbywa się migracja zanieczyszczeń, określenia kierunków przepływu zanieczyszczonej wody gruntowej i rodzaju oraz stężenia zanieczyszczeń [Saines i in. 1989, Campanella i Davies 1997, Robertson i in. 1998, Garbulewski 2002].

Adres do korespondencji – Corresponding author: Kazimierz Garbulewski, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776, Warszawa, e-mail: garbulewski@alpha.sggw.waw.pl

W artykule przedstawiono wprowadzone w ostatniej dekadzie do praktyki sondy geotechniczne, które umożliwiają równoległą ocenę warunków geotechnicznych i następujących parametrów środowiska wodno-gruntowego:

– położenie zwierciadła wody gruntowej – powierzchnia ekwipotencjalna w piaskach i powierzchnia ograniczająca strefę podsiąku kapilarnego w gruntach spoiстых,

- ciągłość i miąższość warstw wodonośnych i barier geologicznych,
- przepuszczalność hydrauliczna i przewodność gruntów w podłożu,
- rodzaj i stężenie zanieczyszczeń.

W opisie ogólnych zasad badań sondami geotechnicznymi, metodyki i interpretacji wyników pozwalających uzyskać dane związane ze stanem środowiska wykorzystano doświadczenia Katedry Geoinżynierii SGGW w Warszawie.

METODYKA BADAŃ SONDAMI GEOTECHNICZNYMI

Do oceny stanu środowiska wodno-gruntowego wykorzystywane są najczęściej następujące sondy geotechniczne (rys. 1): CPTU, RCPT, DMT, PZO-1 i BAT.

CPTU. 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. Prędkość sondowania zapewnia warunki z odpływem w piaskach i bez odpływu w gruntach spoiowych. Stożek zainstalowany na końcu zestawu żerdzi ma kąt 60° i powierzchnię przekroju 10 lub 15 cm^2 (rys. 1a). W czasie badania ciągle 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) ze wzorów:

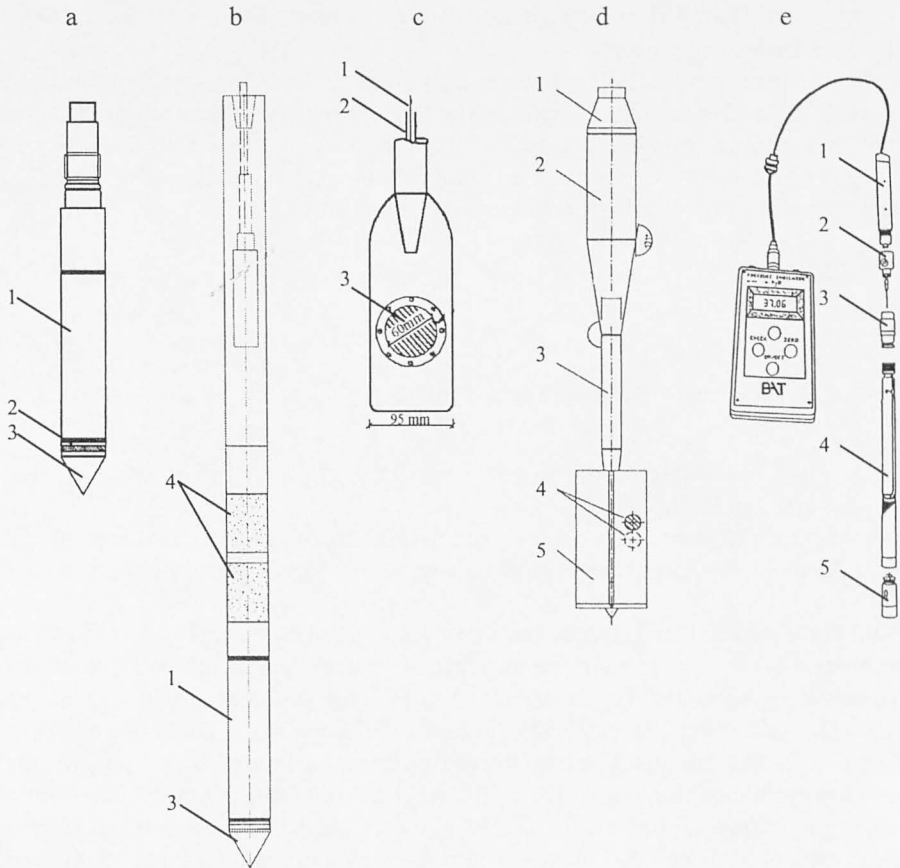
$$R_f = \frac{f_s}{q_c} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$B_q = \frac{u - u_o}{q_c - \sigma_v} \quad (2)$$

gdzie: u_o – ciśnienie hydrostatyczne [MPa],

σ_v – pionowa składowa naprężenia geostatycznego w naprężeniach całkowitych [MPa].

Wyniki badań przedstawiane są w formie ciągłych wykresów pokazujących zmienność pomierzonych parametrów w podłożu budowli.



Rys. 1. Schematy sond: a – CPTU; b – RCPT; 1 – tuleja cierna, 2 – porowaty filtr, 3 – stożek, 4 – izolacja; c – DMT; 1 – przewód stalowy, 2 – przewód pneumatyczny, 3 – membrana; d – PZO-1; 1 – łącznik żerdzi, 2 – komora z czujnikami, 3 – łącznik krzyżaka, 4 – krążki ceramiczne, 5 – krzyżak, e – BAT; 1 – przetwornik ciśnienia, 2 – zbiornik zakończony igłą, 3 – tuleja redukcyjna, 4 – szklany pojemnik, 5 – tuleja prowadząca

Fig. 1. Geotechnical equipment: a – CPTU; b – RCPT; 1 – friction sleeve, 2 – porous filter, 3 – 60 deg conical tip, 4 – isolation; c – DMT; 1 – electrical wire, 2 – pneumatic wire, 3 – membrane; d – PZO-1; 1 – rods connector, 2 – measurement chamber, 3 – vane connector, 4 – ceramic discs, 5 – vane; e – BAT; 1 – pressure transducer, 2 – single-ended needle, 3 – extension adapter, 4 – gas/water container, 5 – quick-coupling unit sleeve

RCPT. Badanie sondą RCPT odbywa się podobnie jak sondą CPTU, przy czym dodatkowo rejestruje się przewodność elektryczną gruntu. System pomiarowy sondy RCPT wykonanej w holenderskiej firmie A.P. van den Berg (rys. 1b) stanowią dwie elektrody w kształcie odizolowanych od siebie pierścieni, pomiędzy którymi przepływa prąd zmienny o stałym napięciu 50 mV i częstotliwości 2000 Hz. Zakres pomiarowy przewodności elektrycznej wynosi od 0 do 40 mS. Pomiary przewodności elektrycznej (lub oporności) wykorzystywane są do określania porowatości i gęstości gruntu w wa-

runkach in situ. Opór elektryczny gruntu stanowi również wskaźnik zanieczyszczenia środowiska wodno-gruntowego.

Zdolność przewodzenia prądu przez wodę porową zależy od jej składu chemicznego (zasolenia), natomiast gruntu od wielu czynników, w tym zwłaszcza od: porowatości, składu mineralnego, stopnia wilgotności, rozmiaru cząstek i ich orientacji. Według Archiego (1942), oporność elektryczną gruntu zależnie od nasycenia porów wodą można określić za pomocą współczynnika ziaren (F) ze wzorów:

$$F = \frac{\rho_b}{\rho_f} = a \cdot n^{-m} \quad (\text{grunt w pełni nasycony wodą; stopień nasycenia } S_r = 1) \quad (3)$$

$$\frac{\rho_b}{\rho_f} = S_r^{-B} \quad (\text{niepełne nasycenie porów wodą; } S_r < 1) \quad (4)$$

gdzie: ρ_b i ρ_f – opór właściwy odpowiednio ośrodka gruntowego i wody porowej [Ωm],
 a , m , B – stałe empiryczne [-],

Oporność elektryczną wody porowej (ρ_f) określa się zwykle w warunkach laboratoryjnych konduktometrem, badając próbki wody, które można pobrać za pomocą sondy BAT.

DMT. Dylatometr Marchettiego składa się z płaskiej, stalowej łopatkki szerokości 95 mm i grubości 14 mm, połączonej pneumatycznym przewodem z jednostką kontrolno-pomiarową. W centralnej części łopatkki zainstalowana jest kołowa, elastyczna membrana, którą odkształca się za pomocą gazu znajdującego się w przewodzie pneumatycznym (rys. 1c). Badania dylatometryczne polegają na wykonywaniu podczas wciśnięcia łopatkki w podłoże pomiarów, co 0,2 m głębokości, trzech wartości ciśnień: ciśnienia potrzebnego do ustawienia membrany w łopatkce na styku z gruntem (wartość A), ciśnienia potrzebnego do odkształcenia membrany o 1,1 mm (wartość B), ciśnienia w momencie powrotu membrany do położenia początkowego (wartość C). Pomierzone ciśnienia umożliwiają wyznaczenie: wskaźnika materiałowego (I_D), modułu dylatometrycznego (E_D), wskaźnika poziomego naprężenia (K_D) i wskaźnika ciśnienia wody w porach (U_D) zgodnie z poniższymi wzorami [Marchetti 1980]:

$$I_D = \frac{p_1 - p_o}{p_o - u_o} \quad (5)$$

$$E_D = 34,7 (p_1 - p_o) \text{ [MPa]} \quad (6)$$

$$K_D = \frac{p_o - u_o}{\sigma_{vo}'} \quad (7)$$

$$U_D = \frac{p_2 - u_o}{p_o - u_o} \quad (8)$$

gdzie: p_o , p_1 i p_2 – ciśnienia skorygowane ze względu na sztywność membrany [MPa],
 u_o – ciśnienie wody w porach w warunkach hydrostatycznych [MPa],
 σ'_{vo} – pionowa składowa naprężenia geostatycznego w naprężeniach efektywnych [MPa].

Wskaźniki dylatometryczne stanowią podstawę określenia rodzaju gruntów, ich mechanicznych i hydraulicznych właściwości oraz historii naprężenia.

PZO-1. W konstrukcji piezosondy PZO-1 (rys. 1d) wykorzystano głowicę napędową znanej w Polsce sondy PSO-1 i zmodernizowaną końcówkę krzyżakową. W jednym ze skrzydełek krzyżaka zainstalowano na przeciwnych powierzchniach dwa ceramiczne krążki o średnicy 20 mm, które połączono nieodkształcalnymi układami hydraulicznymi z piezoporowymi czujnikami ciśnienia wody. Krążki ceramiczne z układami hydraulicznymi stanowią dwa niezależne układy tensjometryczne, służące do pomiaru dodatnich i ujemnych (ssanie) ciśnień wody w porach w zakresie od -95 kPa do $+500$ kPa. Sposób wprowadzania końcówki sondy w podłoże i pomiary momentu siły przy danym kącie obrotu krzyżaka jest taki sam jak w badaniach sondą PSO-1. Przed rozpoczęciem pomiarów piezosondą PZO-1 wewnętrzne układy hydrauliczne muszą być starannie odpowietrzone. Pomiary polegają na notowaniu, co 6^o obrotu krzyżaka, wskazań dynamometru i wzbudzanych ciśnień wody w porach po obu stronach skrzydełka pomiarowego. Piezosonda może również pełnić funkcję piezometru umożliwiającego określenie w podłożu dodatnich ciśnień wody poniżej zwierciadła wody gruntowej i ujemnych powyżej [Pisarczyk i in. 2000].

BAT. System pomiarowy BAT (rys. 1e), wprowadzony w 1984 roku w Szwecji do pobierania próbek wody [Torstensson 1984], został zmodernizowany i obecnie wykorzystywany do: pobierania próbek wody lub powietrza z podłoża, pomiaru wartości ciśnienia porowego, pomiaru współczynnika filtracji (przepuszczalności hydraulicznej).

Zależnie od rodzaju badań system BAT występuje w różnych konfiguracjach. Rysunek 1e przedstawia konfigurację stosowaną przy pomiarze przepuszczalności hydraulicznej.

ZAKRES WYKORZYSTANIA SOND W OOS

Położenie zwierciadła i kierunki przepływu wody gruntowej

Sieć piezometrów lub studni badawczych, stanowiąca najważniejszy element monitoringu każdej budowli inżynierskiej, powinna być rozmieszczona tak, aby istniała całkowita pewność wykrycia zanieczyszczeń środowiska wodno-gruntowego. Wobec tego urządzenia te muszą znajdować się na trasie przepływu wód podziemnych. W wielu przypadkach kierunki przepływu wód podziemnych nie są znane, a muszą być określone w celu zaprojektowania i wykonania systemu monitoringu. Sondowania geotechniczne, zwłaszcza sondą CPTU, mogą dostarczyć wówczas danych o położeniu zwierciadła wód podziemnych lub powierzchni ekwipotencjalnych szybciej niż wiercenia geologiczne. Kierunki przepływu wód podziemnych i gradienty hydrauliczne mogą być określone na podstawie interpretacji uzyskanych z sondowań wartości naporów hydrodynamicznych.

Zwierciadło wody gruntowej definiowane jako linia łącząca punkty w podłożu, w których spełniony jest warunek $u_w = u_{at}$ (u_w – ciśnienie wody w porach, u_{at} – ciśnienie atmosferyczne) rozdziela w gruntach gruboziarnistych dwie strefy: gruntów nasyconych (saturacji) i gruntów nienasyconych (aeracji). W podłożu zbudowanym z gruntów drobnoziarnistych sytuacja jest bardziej skomplikowana, ponieważ oprócz wymienionych dwóch stref występuje jeszcze trzecia, w której grunty charakteryzują się właściwościami zarówno takimi jak w strefie nasyconej, jak i w strefie nienasyconej. Strefa ta, nazywana strefą podsiąku kapilarnego, położona jest bezpośrednio powyżej zwierciadła wody gruntowej. Pory gruntowe w tej strefie wypełnione są całkowicie wodą, jednakże ciśnienie wody w porach jest mniejsze niż ciśnienie atmosferyczne ($u_w < u_{at}$). Miąższość tej strefy, zależnie od rodzaju i stanu zagęszczenia gruntu, może wynosić nawet ponad 10 m.

Pomiary dodatnich wartości naporu hydrodynamicznego (suma wysokości ciśnienia i położenia) w podłożu nasyconym wodą przeprowadzane za pomocą piezometrów pozwalają określić położenie zwierciadła wody w piezometrze ponad poziom odniesienia. W gruntach nienasyconych, na potrzeby pomiaru ujemnych wartości naporu hydrodynamicznego, konieczne jest wprowadzenie do układu pomiarowego porowatej membrany (zwykle ceramicznego materiału) łączącej wodę gruntową z cieczą urządzenia, które nazywane jest tensjometrem. Rozkład w podłożu naporów hydrodynamicznych można wykorzystać do określenia kierunków przepływu wody i gradientów hydraulicznych – stosunek zmian naporów hydrodynamicznych do jednostkowej odległości przepływu wody w podłożu. Gradienty poziome można obliczyć jako stosunek różnicy naporów hydrodynamicznych i odległości między otworami sondowań, natomiast gradienty pionowe na podstawie różnic naporów hydrodynamicznych i głębokości wykonywania testów rozpraszania ciśnień wody w porach. Wartości gradientów hydraulicznych są związane z przewodnością gruntów w podłożu, którą można wyznaczyć, znając przepuszczalność hydrauliczną (k) i miąższość warstwy wodonośnej (t). Przepuszczalność gruntów może stanowić wskaźnik dla lokalizacji piezometrów lub studni badawczych. Piezometry o małych średnicach (1¼ – 2”) mogą być zainstalowane bezpośrednio w otworach sondowań [Saines i in. 1989]. Do określenia położenia zwierciadła wody i naporów hydrodynamicznych można zastosować piezosondę obrotową PZO-1 [Pisarczyk i in. 2000].

Rozpoznanie bariery geologicznej

Wyniki sondowań CPTU, RCPT lub DMT, przedstawiane w formie ciągłych wykresów pokazujących rozkład pomierzonych parametrów, pozwalają ustalić stratyografię podłoża – pochodzenie, rodzaj i głębokość występowania gruntów. Wyniki te, jak pokazano w następnej części artykułu, można wykorzystać do określenia warstw gruntów dobrze przepuszczalnych (wodonośnych) i słabo przepuszczalnych, które mogą być uznane za bariery geologiczne, stanowiące izolację projektowanych obiektów od środowiska wodno-gruntowego.

Określenie przepuszczalności hydraulicznej podłoża

Znajomość współczynnika konsolidacji (c_v) [Terzaghi 1948], który wyraża połączony efekt ściśliwości i przepuszczalności gruntu, pozwala wyznaczyć przepuszczalność hydrauliczną według wzoru:

$$k_v = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w = c_v \cdot \frac{1}{M_v} \cdot \gamma_w \quad (9)$$

gdzie: k_v – przepuszczalność hydrauliczna [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 c_v – współczynnik konsolidacji [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
 m_v – współczynnik zmian objętości gruntu [$\text{m}^2 \cdot \text{kN}^{-1}$],
 γ_w – jednostkowy ciężar wody [$\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$],
 M_v – pierwotny moduł ściśliwości gruntu [$\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$].

Wzór (9) oznacza, że przepuszczalność hydrauliczną można określić metodami pośrednimi z badań konsolidacyjnych, przy czym należy pamiętać o założeniach, które Terzaghi przyjął w swoim modelu: grunt jest materiałem jednorodnym, pory gruntu są całkowicie wypełnione wodą, woda i cząstki gruntu są nieściśliwe, czyli zmiany objętości gruntu obciążonego wynikają ze zmian objętości porów, przepływ wody odbywa się zgodnie z prawem Darcy'ego w jednym kierunku, przepuszczalność hydrauliczna jest wartością stałą.

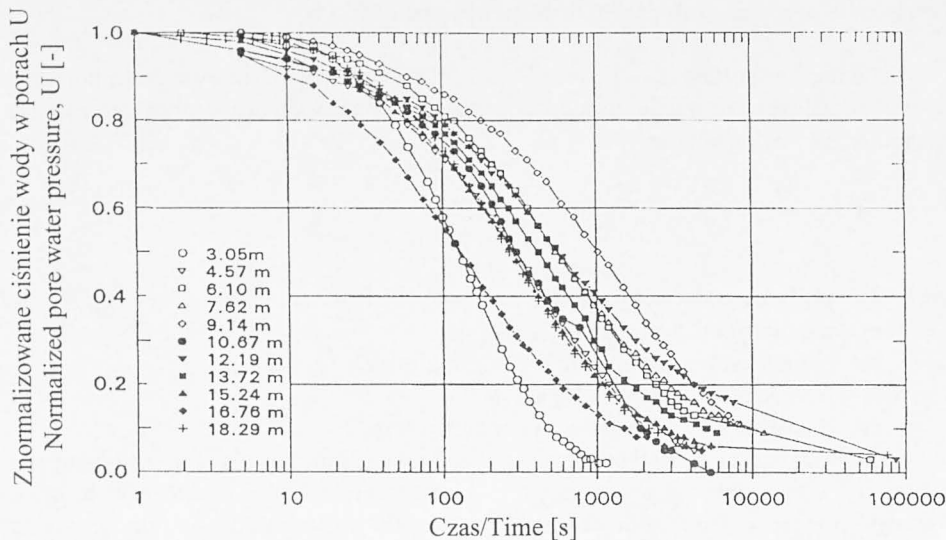
W warunkach in situ założenia modelu Terzaghiego nie są w pełni spełnione, wobec czego uzyskiwane wartości przepuszczalności hydraulicznej mogą odbiegać od wartości rzeczywistych. Przepuszczalność hydrauliczną gruntów w podłożu projektowanej budowli można określić, wykorzystując wyniki badań sondami CPU i DMT. Prace nad możliwością wykorzystania w tym zakresie sondy PZO-1 są obecnie prowadzone [Garbulewski i in. 2005].

W celu oceny przepuszczalności hydraulicznej gruntów sondą CPTU należy przeprowadzić pomiary rozpraszania ciśnienia wody w porach wzbudzonych podczas wciskania sondy, które przedstawiane są w postaci zależności pomiędzy logarytmem lub pierwiastkiem kwadratowym z czasu i znormalizowanym ciśnieniem porowym (U) (rys. 2) określanym ze wzoru:

$$U = \frac{u_t - u_0}{u_i - u_0} \quad (10)$$

gdzie: u_i – maksymalna wartość ciśnienia wody w porach w badaniu [MPa],
 u_t – ciśnienie wody w porach w czasie t [MPa],
 u_0 – ciśnienie hydrostatyczne [MPa].

Krzywe rozpraszania ciśnienia wody w porach iltów warwowych pozwalają stwierdzić, że czas 50% rozproszenia nadwyżki wody w porach (t_{50}) wynosi od około 120 do około 1000 minut [DeGroot i Lutenegeger 1994]. Na tej podstawie przepuszczalność hydrauliczna obliczona według wzoru (9) zawiera się w przedziale od $2,5 \cdot 10^{-8}$ do $1,8 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Rys. 2. Krzywe rozpraszania ciśnienia wody w porach z badań [DeGroot i Lutenegger 1994]
 Fig. 2. Pore pressure dissipation curves from CPTU test [DeGroot and Lutenegger 1994]

Czas 50% rozproszenia nadwyżki ciśnienia wody w porach (t_{50}) pozwala orientacyjnie określić przepuszczalność hydrauliczną gruntu równania [Parez i Faureil 1988]:

$$k_h \approx \frac{1}{(251 \cdot t_{50})^{1,25}} \left[\text{cm} \cdot \text{s}^{-1} \right] \quad (11)$$

W badaniach dylatometrycznych współczynnik konsolidacji poziomej (c_h) można wyznaczyć, stosując dwie metody: DMTA lub DMTC [Lutenegger i Kabir 1988]. W metodzie DMTA wykorzystuje się pomiary rozpraszania w czasie wartości (A – ciśnienie kontaktu membrany z gruntem) i określa czas, w którym następuje przegięcie krzywej A - $\log t$ (czas ten nazwano T_{flex}) (rys. 6). Współczynnik konsolidacji poziomej (c_h) obliczany jest z zależności [Marchetti i Totani 1989]:

$$c_h = \frac{5 \div 10}{T_{\text{flex}}} \left[\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \right] \quad (12)$$

W metodzie DMTC wykorzystujemy pomiary rozpraszania się w czasie wartości C przedstawiane w zależności od pierwiastka kwadratowego z czasu. Ekstrapolując wyniki wyznacza się odczyt C_{100} odpowiadający pełnemu rozproszeniu nadwyżki ciśnienia porowego. Na tej podstawie otrzymujemy odczyt C_{50} i odpowiadający mu czas t_{50} stanowiący 50% rozproszenia różnicy odczytów C_0 i C_{100} [Briaud i Miran 1992].

Rozpoznanie zanieczyszczenia środowiska wodno-gruntowego

Sonda CPTU została w ostatnich latach wyposażona w dodatkowe czujniki, które pozwalają na rozszerzenie jej zastosowania do badań środowiskowych. Jednym z pierwszych był czujnik temperatury, początkowo wykorzystywany do lokalizowania stref przemarzania, a obecnie stosowany do określenia zanieczyszczeń organicznych (które mogą generować ciepło) w profilu gruntowym. Kolejnym czujnikiem jest czujnik pH instalowany na powierzchni lub wewnątrz stożka (sonda Envirocone). Ciągły pomiar pH pozwala wykrywać wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia. Czujnik ten szczególnie przydatny jest do wykrywania odcieków ze składowisk odpadów [Lunne i in. 1997]. Czujnik wewnętrzny ogranicza zakres stosowania sondy, ponieważ w gruntach spoiстых o małej przepuszczalności konieczne jest zassanie pewnej ilości wody porowej do komory pomiarowej. Z kolei czujnik znajdujący się na powierzchni stożka jest narażony na uszkodzenia mechaniczne.

Do wykrywania zanieczyszczeń ropopochodnych stosowane są czujniki potencjału redox (sonda Chemoprobe), emitujące promieniowanie gamma, promieniowanie UV i fluorescencyjne (LIF). Ich zastosowanie jest jednak ograniczone ze względu na specjalne wymagania prowadzenia badań i przechowywania sprzętu. Powstała również wersja stożka wyposażona w kamerę (sonda Vision cone) pozwalającą obserwować grunt w czasie sondowania i lokalizować potencjalne strefy zanieczyszczenia wody gruntowej [Campanella i in. 2001].

Ze względu na możliwość wykrywania gruntów i wód podziemnych zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi w ostatnim okresie szerokie zastosowanie znajduje metoda elektrycznooporowa (sonda RCPT). Ciągły profil oporu właściwego z badań RCPT w połączeniu z profilem gruntowym określonym na podstawie nomogramów pozwala na określenia strefy zanieczyszczonego gruntu. W tabeli 1 przedstawiono typowe zakresy oporu właściwego, jakie można zaobserwować w gruntach.

Tabela 1. Opór właściwy wybranych gruntów

Table 1. Typical bulk resistivity of soils

| Litologia / Lithology | Zakres oporu / Resistivity [Ω m] |
|--|--|
| Grнты spoiste / Cohesive soils | 100–800 |
| Grнты piaszczyste / Sandy soils | 8000–10 000 |
| Grнты luźne / Loose soils | 1000–10 000 |
| Piaski i żwiry rzeczne / Sands and gravels | 100–8000 |
| Il / Clay | 1–100 |
| Gлина polodowcowa / Postglacial clay | 10–8000 |

Wyniki badań sondą z pomiarem przewodności elektrycznej umożliwiają: określenie jakości wody (tab. 2), oszacowanie zasolenia gruntu, określenie stężenia kationów wymiennych ($\delta = 0,121249 + 0,003155 C^{0,940930}$) i metali ciężkich ($\delta = 0,004773 + 0,001894 C_m^{0,941766}$). Według Campanelli i Daviesa [1997], odcieki ze składowisk charakteryzują się opornością elektryczną od 1 do 30 Ω m, piaski i żwiry z arsenikiem od 1 do 10 Ω m, piaski zanieczyszczone substancjami nieorganicznymi od 0,5 do 1,5, pyły i piaski z krezolem od 200 do 1000 Ω m, ily z odpadami drewna od 300 do 600 Ω m.

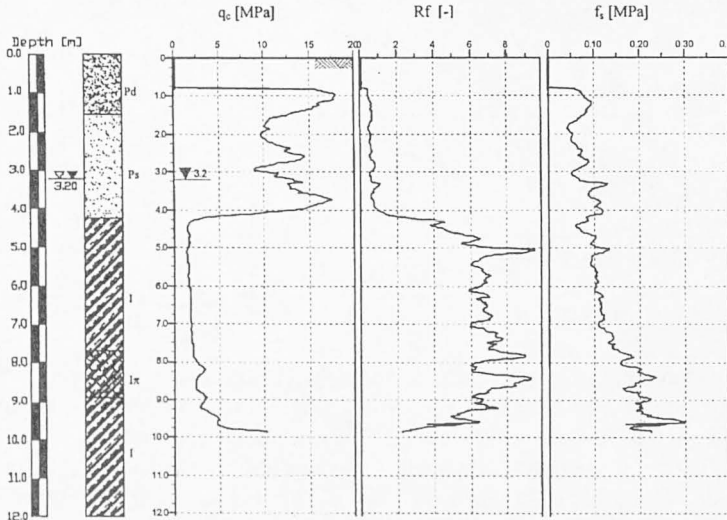
Tabela 2. Typowe wartości przewodności właściwej dla różnych typów wody
Table 2. Typical conductivity of water

| Typ wody / Type of water | Przewodność elektryczna / Conductivity [mS/cm] |
|---|---|
| Naturalna woda gruntowa / Ground water | 0,14 |
| Zanieczyszczona/Contaminated by: odciekami ze składowisk odpadów leachate from waste disposal | 5,99 |
| odciekami z elektrociepłowni leachate from power station | 4,61 |
| Woda morska / Sea water | 36,30 |

BADANIA WŁASNE

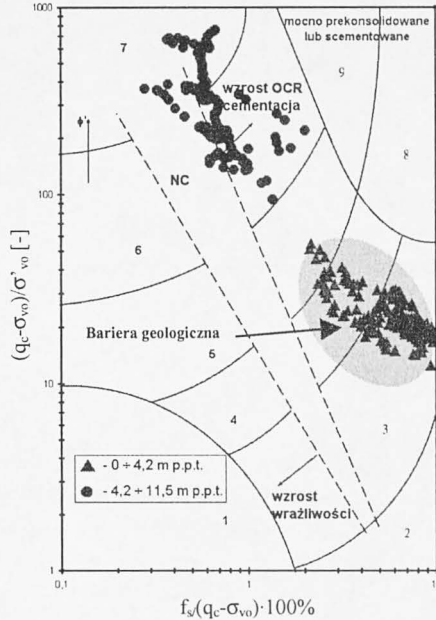
Wyniki badań przeprowadzonych przez Katedrę Geoinżynierii SGGW na poligonie badawczym Stegny w Warszawie [Bajda i Lech 2004] zostały wykorzystane do potwierdzenia możliwości zastosowania sond CPTU i DMT do identyfikacji barier geologicznych.

W podłożu poligonu badawczego występują utwory czwartorzędowe w postaci zagęszczonych piasków o miąższości nieprzekraczającej 7 m, które są podścielone utworami trzeciorzędowymi plicenu (iły i iły pylaste) dochodzące do głębokości 146 m p.p.t. Wiercenia geologiczne wykazały, że swobodne zwierciadło wody znajduje się w piaskach średnich na głębokości 3,20 m p.p.t. Na podstawie rozkładu wartości oporu stożka i współczynnika tarcia przy sondowaniu CPTU wyodrębniono warstwy badanego podłoża (rys. 3), w tym również występujące od głębokości 4,30 m iły plicenięskie. Położenie warstwy ilów plicenięskich określone z badań CPTU jest zgodne z wynikami wiercenia. Analizując wykres oporu stożka, widać, że wartości oporów dla piasków są większe niż dla ilów; dla piasków wahają się w granicach od 8 do 16 MPa, dla ilów od 2 do około 5 MPa.



Rys. 3. Wyniki sondowań CPTU na poligonie badawczym Stegny
Fig. 3. CPTU test results from Stegny site

Na potrzeby identyfikacji gruntów opracowano nomogram Robertsona [Lunne i in. 1997], wykorzystujący znormalizowany opór stożka (q_c) i współczynnik tarcia (R_f) (rys. 4). Nomogram Robertsona umożliwia zakwalifikowanie badanych gruntów do dobrze lub słabo przepuszczalnych, jednakże uznanie gruntów słabo przepuszczalnych za barierę geologiczną wymaga określenia przepuszczalności hydraulicznej $k_h < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

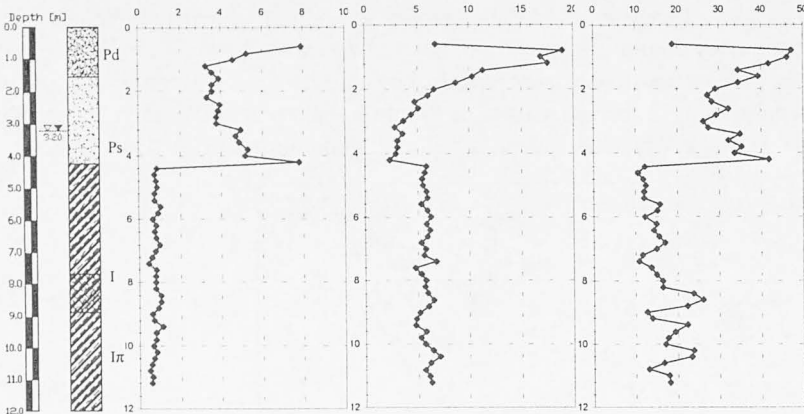


Rys. 4. Nomogram klasyfikacyjny zaproponowany przez Robertsona z wynikami badań CPTU z poligonu badawczego Stegny: 1 – grunty wrażliwe drobnoziarniste, 2 – grunty organiczne, 3 – ility, 4 – gliny pylaste do iltów, 5 – pyły piaszczyste do piasków pylastych, 6 – piaski do piasków pylastych, 7 – piaski grube, żwiry, 8 – bardzo sztywne piaski i piaski pylaste, 9 – bardzo sztywne grunty drobnoziarniste

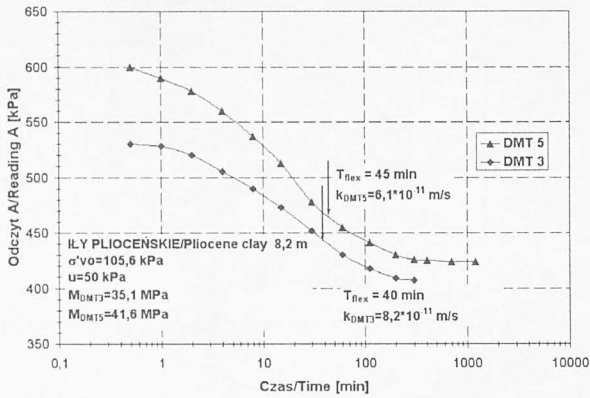
Fig. 4. Classification chart proposed by Robertson with data from the Stegny site: 1 – sensitive fine grained, 2 – organic material, 3 – clay, 4 – silty clay to clay, 5 – sandy silt to silty sand, 6 – sand to silty sand, 7 – coarse sand and gravel, 8 – very stiff sand, 9 – very stiff fine grained

Rysunek 5 przedstawia rozkład wskaźnika I_D i modułu E_D z badań DMT na poligonie Stegny i pozwala wyodrębnić poszczególne grunty w podłożu na podstawie ich zmienności (wartości znacznie mniejsze w iltach niż w piaskach).

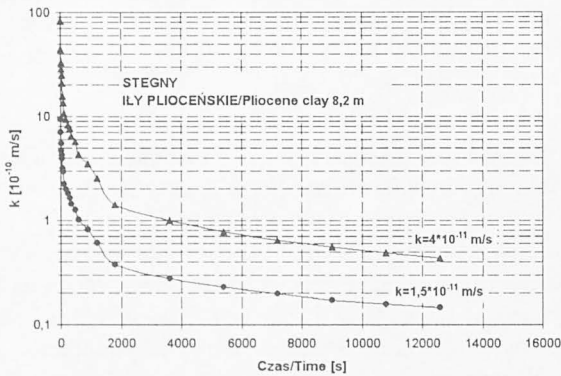
Na poligonie badawczym Stegny w celu określenia przepuszczalności gruntów wykonane zostały badania rozpraszania ciśnienia wody w porach sondą DMT (rozpraszanie odczytu A) (rys. 6). Z badań iltów plioceńskich na głębokości 8,2 m wynika, że wartość T_{flex} wynosi około 40 minut. Przepuszczalność hydrauliczną iltów z badań dylatometrycznych obliczona została analogicznie jak z sondowań CPTU, z zależności (9), i wyniosła $k_h = (6,1 \div 8,2) \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Rys. 5. Wyniki sondowań DMT na poligonie badawczym Stegny
 Fig. 5. DMT test results from Stegny site



Rys. 6. Krzywe rozpraszania ciśnienia wody w porach uzyskane z badań DMT [Sobolewski 2002]
 Fig. 6. Dissipation curves of Pliocene clay from DMT test [Sobolewski 2001]



Rys. 7. Wyniki badań sondą BAT na poligonie badawczym Stegny
 Fig. 7. Results of hydraulic conductivity tests using BAT system for Pliocene clays

Badania sondą BAT wskazują, że przepuszczalność hydrauliczna iłów plioceńskich waha się w granicach od $k_h = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do $k_h = 4,0 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (rys. 7).

PODSUMOWANIE

Zmodernizowane w ostatnich latach sondy geotechniczne pozwalają jednocześnie określać właściwości geotechniczne i wykrywać zanieczyszczenia. Do określenia rodzaju gruntu w podłożu i wykrywania bariery geologicznej można posłużyć się nomogramami wykorzystującymi wyniki badań sondami CPTU i DMT. Badania te wraz z sondą PZO-1 i sondą BAT mogą być ponadto wykorzystane do określenia parametrów przepływu wody w gruncie. Sondowania RCPT umożliwiają wykrywanie gruntów i wód podziemnych zanieczyszczonych substancjami chemicznymi, w tym zwłaszcza ropo-
chodnymi.

PIŚMIENNICTWO

- Archie G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the American Institute of Mineral Metallurgy Engineering.
- Bajda M., Lech M., 2004. Identification of geological barriers at the Stegny site. Proc. of the 16th European Young Geotechnical Engineers Conference, Wiedeń.
- Briaud J.L., Miran J., 1992. The Flat Dilatometer Test. U.S Department of transportation. Publication No FHWA-SA-91-044.
- Campanella R.G., Davies M.P., 1997. In-situ testing for geo-environmental site characterization: A mine tailings example. Proc. of the 14th IC on SMFE, Balkema, Hamburg.
- DeGroot D.J., Lutenegger A.J., 1994: A comparison between field and laboratory measurements of hydraulic conductivity in varved clay. Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM STP 1142 (eds.) D.E. Daniel and S.J. Trautwein, Philadelphia.
- Garbulewski K., 2002. Wykorzystanie sondowań geotechnicznych do oceny stanu środowiska na terenach zdegradowanych. Materiały konferencyjne. Mragowo.
- Garbulewski K., Bereda Z., Chaciński Z., Pisarczyk S., Popielski P., 2005. In situ testing of unsaturated organic soils. Proc. of the International Symposium "Advanced Experimental Unsaturated Mechanics". Trento, Italy (w druku).
- Lunne T., Robertson P.K., Powell K.J.M., 1997. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic and Professional.
- Lutenegger A.J., Kabir M.G., 1988. Dilatometer C-reading to help determine stratigraphy. Penetration Testing 1988, ISOPT – 1, 1, 549–554.
- Marchetti S., 1980. In situ tests by flat dilatometer. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering 106 GT3, 299–321.
- Marchetti S., Totani G., 1989. C_h evaluations from DMTA dissipation curves. Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Rio de Janeiro.
- Parez L., Faureil K., 1988: La piezocone ameliorations: apportes a la reconnaissance de sols. Revue Francaise de Geot. 44, 13–27.
- Pisarczyk S., Garbulewski K., Steckiewicz R., Żakowicz S., 2000: Nowa sonda obrotowa – piezosonda PZO1 – do badań wytrzymałości gruntów słabonośnych. Mat. XII Krajowej Konferencji MG i F „Problemy geotechniczne obszarów przy morskich”. Szczecin.

- Robertson P.K., Lunne T., Powell J.J., 1998. Geo-environmental application of penetration testing. In: Geotechnical Site Characterization (eds.) P.K. Robertson, P.W. Mayne. Balkema, Rotterdam.
- Saines M., Strutyński A., Lytwynshyn G., 1989: Use of piezometric cone penetration testing in hydrogeological investigations. Proc. of the First USA/USSR Hydrogeology Conference, Moscow.
- Sobolewski M., 2002. Określanie charakterystyk przepływu wody w gruntach spoistych na podstawie badań in situ. Praca doktorska. SGGW, Warszawa.
- Terzaghi K., 1948: Theoretical soil mechanics. John Wiley&Sons Inc., London.
- Torstenson B.A., 1984: A new system for groundwater monitoring. Ground Water Monitoring Review IV, (4), 131–138.

APPLICATION OF GEOTECHNICAL SOUNDINGS FOR ESTIMATION OF IMPACT ON GROUND-WATER ENVIRONMENT

Summary. The rise of importance of environmental geotechnics in the last years in Poland is caused by lots of a new environmental regulations. This paper presents a review of selected penetration methods for geoenvironmental site characterization of soil and recent developments of in situ tests. These methods include the piezocone penetration test, the resistivity piezocone, the BAT system, Marchetti dilatometer and vane shear tests. Finally, the in situ test results obtained at a site consisted clay in Warsaw were presented.

Key words: in situ tests, hydraulic conductivity, geological barrier, contaminated soil

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 20.05.2005