

PRACE NAUKOWO-PRZEGLĄDOWE

Zdzisław SKUTNIK, Marek BAJDA

Katedra Geoinżynierii SGGW W w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Ocena jakości przesłony przeciwfiltracyjnej wykonanej w technologii DSM za pomocą sondowań geotechnicznych **Quality control test of cut-off wall performed in the DSM technology on the basis of geotechnical soundings**

Słowa kluczowe: przesłona przeciwfiltracyjna, technologia DSM, sonda BAT, badania CPT, współczynnik przepuszczalności

Key words: cut-off wall, DSM technology, BAT probe, CPT tests, coefficient of permeability

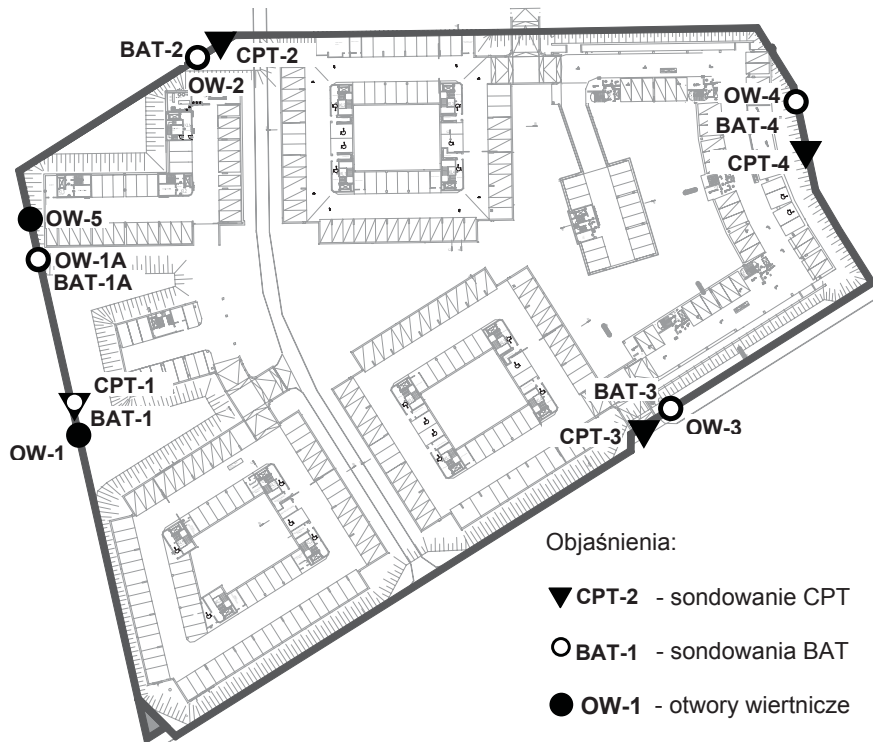
Wprowadzenie

Coraz częściej w celu zmniejszenia dopływu wody gruntowej do wykopów fundamentowych w przypadku niemożności wykonania „szczelnej wan-ny” (głębokie zaleganie stropu gruntów słaboprzepuszczalnych) stosowane są niepełne przesłony przeciwfiltracyjne. Czasami z uwagi na trudne warunki geotechniczne (np. występowanie gruntów kamienistych) nie zawsze możliwe jest wykonanie stalowej ścianki szczelnej (np. typu Larsena) stąd poszukiwane są technologie, za pomocą których można wykonać barierę ograniczającą dopływ wody do wykopu. Jednym z takich rozwiązań jest przesłona wykonana

w technologii DSM (Deep Soil Mixing) z zastosowaniem roztworów cementowo-bentonitowych i na bazie glin polimineralnych, która obok innych rozwiązań (Falaciński i inni 2004) jest coraz częściej stosowana. Wykonana na jednym z warszawskich nowobudowanych osiedli przesłona, której układ przedstawiono na rysunku 1 oprócz ograniczenia dopływu wody do wykopu miała również za zadanie podtrzymywanie ścian wykopu stąd dodatkowo zastosowano wzmocnienia w postaci dwuteowników (rys. 2).

Metodyka i wyniki badań przepuszczalności przesłony sondą BAT

Głównym celem badań sondą BAT było określenie przepuszczalności przesłony w warunkach in situ (Daniel i Choi 1999). Wykonując badania przepuszczalności na różnych głębokościach, możliwe było też określenie zmienności



RYSUNEK 1. Lokalizacja przesłony oraz punktów badawczych
 FIGURE 1. Location of the cut-off wall and test profiles



RYSUNEK 2. Widok przesłony podpartej dwuteownikami
 FIGURE 2. The view of cut-off wall supported with T-beam

współczynnika filtracji (przepuszczalności) w profilu przesłony (Koda i Skutnik 2003). Do badań przepuszczalności wytypowano pięć profili pomiarowych zlokalizowanych w różnych miejscach przesłony BAT1, BAT1A, BAT2, BAT3 i BAT4, w których przeprowadzono badania na różnych głębokościach.

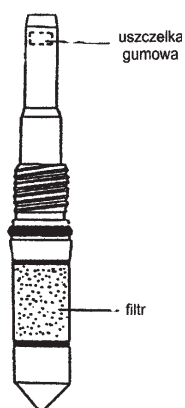
Sonda BAT zwana też Systemem Monitoringu Wód Podziemnych (Torstensson, 1984), za pomocą której wykonano badania służy do: pomiaru współczynnika przepuszczalności, określania kierunków przepływu wody w gruncie, pomiaru ciśnienia wody w porach, pobierania próbek wody bądź powietrza gruntowego, pomiaru mniejszego naprężenia głównego metodą „pęknięcia hydraulicznego”.

Instalowana w gruncie końcówka filtrująca zwana również piezometrem BAT, jest to piezometr typu zamkniętego, którego schemat oraz widok przedstawiono na rysunku 3. Jego konstrukcja, filtr o odpowiedniej przepuszczalności oraz zakończona gumową uszczelką dysza, pozwalają na wykonanie badań w ośrodku gruntowym o niskim współczynniku

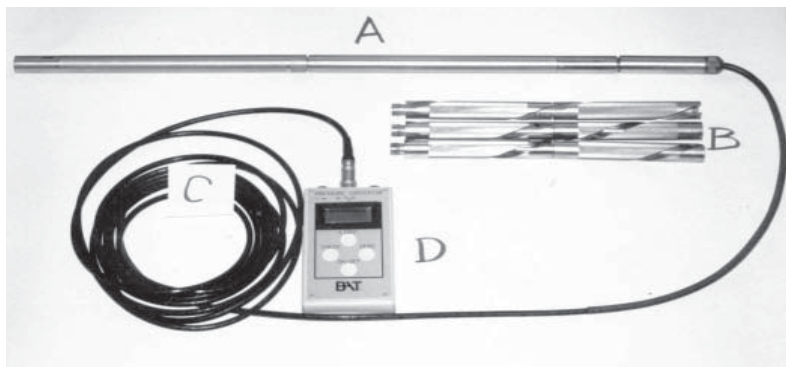
przepuszczalności ($< 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), w której wprowadzana jest ta końcówka.

W celu umieszczenia końcówki na żądanej głębokości, przytwierdzana jest ona do rury (żerdzi) o odpowiedniej średnicy, a następnie wciskana, bądź wbijana. Szczególnie istotna jest wielkość średnicy wewnętrznej żerdzi, wynosząca minimum 24 mm, co pozwala na opuszczanie jednostki pomiarowej do piezometru celem wykonania badania.

Jednostka pomiarowa, czyli sonda BAT to system membran, igieł, szklanych zbiorników oraz przetwornik ciśnienia połączony przewodem elektrycznym z urządzeniem odczytowym. W zależności od rodzaju wykonywanego badania jednostka pomiarowa montowana jest w odpowiednią konfigurację. Rysunek 4 przedstawia schemat jednostki pomiarowej w konfiguracji do badania współczynnika filtracji. Przedstawiona na fotografii (rys. 5) sonda BAT (A) połączona jest przewodem elektrycznym (C) z urządzeniem odczytowym (D), obciążniki (B) zwiększają masę sondy zapewniając penetrację uszczelki piezometru przez igłę sondy.



RYSUNEK 3. Schemat i widok końcówki filtrującej sondy BAT
 FIGURE 3. The scheme and view of BAT piezometer



RYSUNEK 4. Sonda BAT w konfiguracji do pomiaru współczynnika przepuszczalności: A – jednostka testująca, B – ciężarki, C – kabel połączeniowy, D – jednostka odczytowa
 FIGURE 4. Layout of BAT system for permeability measurements: A – testing unit, B – weights, C – connecting cable, D – readout unit



RYSUNEK 5. Wykonywanie badania przepuszczalności systemem BAT w przesłonie
 FIGURE 5. The view of BAT system during permeability test in cut-off wall

Badanie współczynnika przepuszczalności polega na połączeniu jednostki pomiarowej zawierającej szklany pojemnik wypełniony wodą, w którym przed badaniem wytwarzane jest ciśnienie niższe od ciśnienia porowego („in flow test”) lub ciśnienie wyższe od ciśnienia porowego („out flow test”), z piezometrem. Następnie rejestrowane są zmiany

ciśnienia wewnątrz pojemnika, zależne od przepuszczalności hydraulicznej badanego ośrodka gruntowego, w którym zainstalowany jest piezometr. Na podstawie zmian ciśnienia w funkcji czasu oblicza się współczynnik przepuszczalności według wzoru (1) zaproponowanego przez twórcę systemu BAT (Torstensson 1984):

$$k = \frac{p_0 V_0}{F t} \left[\frac{1}{u_0 p_0} - \frac{1}{u_0 p_t} + \frac{1}{u_0^2} \ln \left(\frac{p_t (p_0 - u_0)}{p_0 (p_t - u_0)} \right) \right] \quad (1)$$

gdzie:

p_0 – początkowe ciśnienie w zbiorniku [m H₂O],

p_t – ciśnienie w zbiorniku po czasie t [m H₂O],

u_0 – ciśnienie porowe [m H₂O],

t – czas [s],

V_0 – objętość gazu w jednostce testującej [m³],

F – współczynnik przepływu – stała filtra piezometru [m], określana według wzoru

$$F = \frac{2 \pi l}{\ln \left[\frac{l}{d} + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{d} \right)^2} \right]} \quad (2)$$

gdzie:

l – długość filtra [m],

d – średnica filtra [m].

W czasie badań przepuszczalności przesłony do wciskania piezometru BAT wykorzystano sondy holenderskiej firmy Van den Berg, HASON 25 KN i HYSON 200 kN, bądź wykonywano odwiert, a następnie końcówkę wbijano.

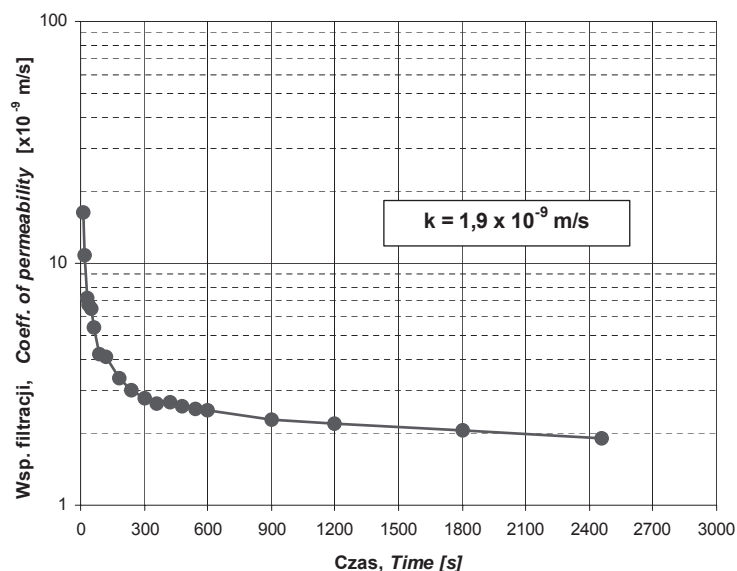
Przykładowy wynik badania współczynnika przepuszczalności w formie wykresu zmian ciśnienia w układzie pomiarowym w czasie badania oraz obliczone wartości współczynnika przepuszczalności przedstawiono na rysunku 6. Za miarodajną wartość współczynnika przepuszczalności przyjmuje się zazwyczaj jego wartość dla okresu czasowego od 20 do 30 minut od rozpoczęcia pomiaru. Takie założenie eliminuje początkowe wartości dotyczące pomiaru przewodności hydraulicznej w ośrodku,

w którym nie nastąpiło jeszcze wyrównanie temperatur i nasycenie wodą ewentualnych szczelin powstałych podczas wciskania końcówki, tzn. w pierwszych minutach pomiaru.

Przeprowadzone sondą BAT badania wykazały, że przepuszczalność przesłony jest bardzo zmienna. Określony współczynnik filtracji zawiera się w przedziale od $1,9 \cdot 10^{-9}$ do $3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Największe wartości przepuszczalności uzyskano w profilach BAT1 i BAT4. Wykonane w tych samych profilach wiercenia wykazały, że np. w profilu OW4 poniżej głębokości 3,0 m stwierdzono występowanie piasków średnich i gruboziarnistych, a nawet żwirów, które pomimo silnego scementowania wykazywały znaczną przepuszczalność. W innym profilu, w których przepuszczalność wynosiła $(1,8-3,0) \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ stwierdzono, że przesłona była bardzo miękka powodująca zaciskanie otworu wiertniczego. Jedynie w profilu BAT 2 przeprowadzone badania przepuszczalności wykazały dobrą jej jakość pod względem przepuszczalności. Pomierzone wartości współczynnika filtracji na głębokościach 3,2 oraz 5,1 m odpowiednio wynoszą $3,6 \cdot 10^{-9}$ oraz $1,9 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Metodyka i wyniki sondowań CPT

Sondowania CPT zazwyczaj wykonywane są w celu oceny geotechnicznych warunków posadowienia, zaprojektowania obudowy wykopu fundamentowego lub jego odwodnienia. W przypadku przesłony przeciwfiltracyjnej wykonanej w technologii DSM, celem sondowań CPT była ocena jednorodności, ciągłości



RYSUNEK 6. Wyniki badań przepuszczalności przesłony sondą BAT; profil BAT 2 – gł. 5,1 m
 FIGURE 6. The BAT permeability test results; profile BAT 2 – depth 5.1 m

wykonania przesłony oraz jej wytrzymałości na ścinanie.

Sondowanie statyczne CPT polega na wciskaniu w grunt penetrometru składającego się z zestawu żerdzi zakończonych sondą ze stożkiem pomiarowym. Prędkość wciskania jest stała i wynosi około $2 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Sondowania statyczne CPT na terenie objętym badaniami uwzględniając warunki terenowe w miejscach dostępnych, gdzie bezpośrednio obok przesłony nie był wykonany jeszcze wykop przeprowadzono sondą hydrauliczną typu HYSON 200 kN, zaś w miejscach mniej dostępnych wykorzystano sondę mechaniczną typu HASON 25 kN, obie holenderskiej firmy Van den Berg z końcówką stożkową Begemanna. Zarówno wymiary stożka jak i przebieg badania są zgodne ze standardami międzynarodowymi (m.in. Swedish Standard, Dutch Standard, ISSMGE) i wy-

mogami normy PN-74/B-04452 Grunty budowlane. Badania polowe. Opracowanie i interpretację wyników badań wykonano przy użyciu programu CPT-pro (firmy Geosoft).

Otrzymane bezpośrednio z badań wykresy parametrów sondowań: opór stożka (q_c), opór tarcia gruntu na tulei (f_s), współczynnik tarcia (R_f), wstępnie zweryfikowano. Weryfikacja polegała na analizie przebiegu wykresu zmian parametrów sondowań w badanym profilu gruntowym i ocenie wielkości wpływu czynników mechanicznych, fizycznych oraz litologii. W wyniku analizy na profilu sondowań określone są: strefy o nagłych przyrostach oporów stożka (q_c), możliwych ze względu na zmianę stanu i rodzaju gruntu, strefy o bardzo niskich oporach sondowania (q_c), możliwych ze względu na występowanie rozluźnień, zawilgoceń itp.

Przy zastosowaniu programu „CPT-pro” firmy „Geosoft”, obliczono następujące parametry: stopień zagęszczenia (I_D) – stosowany zazwyczaj dla gruntów niespoistych, wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu (S_u) – stosowaną dla gruntów spoistych, kąt tarcia wewnętrznego (φ).

Powyższe parametry gruntowe obliczono z następujących wzorów:

- wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu, S_u

$$S_u = (q_c - \sigma'_{vo})/N_{kt} \quad (3)$$

gdzie:

q_c – opór stożka

σ'_{vo} – naprężenie efektywne in situ

N_{kt} – współczynnik zależny od geometrii stożka i sztywności badanego gruntu, przyjęto 20,

- stopień zagęszczenia, I_D (Baldi 1986)

$$I_D = 0,42 \ln(q_c / (248 \sigma'_{vo}))^{0,55} \quad (4)$$

- kąt tarcia wewnętrznego, φ' (Schmertmann 1978)

$$\varphi' = 0,125 I_D + B \quad (5)$$

gdzie B – współczynnik zależny od rodzaju gruntu ($B = 28$ – piasek drobny równoziarnisty, $B = 31,5$ – dobrze uziarniony piasek drobny i piasek średni równoziarnisty, $B = 34,5$ – piasek gruby równoziarnisty i dobrze uziarniony piasek średni, $B = 37$ – żwir równoziarnisty lub pospółka).

Sondowania CPT wykonane zostały w 4 profilach (CPT 1, CPT 2, CPT3 i CPT 4).

Sondowanie CPT 1 wykonane po stronie zachodniej wykazało bardzo małe wartości oporów stożka (q_c) do głębokości 3,5 m – około 2 MPa, następnie wartości q_c wzrosły do około 6 MPa na głębokości 5,5 m i 12 MPa na

głębokości 6,0 m. W sondowaniu CPT2 wykonanym po stronie północnej opory sondowania q_c na głębokości od 1,0 do 3,0 m zmieniają od 1 MPa do około 25 MPa, na głębokości zaś od 3,0 do 5,0 m w zakresie od 25 do 30 MPa. Głębiej w przedziale głębokości od 5,0 do 8,0 m opory sondowania q_c nieznacznie spadają wynosząc około 10 MPa. W przypadku sondowania CPT3 wykonanego tylko do głębokości 3,0 m (brak możliwości dobrego zakotwienia urządzenia) wartość q_c zmieniała się w zakresie od 1 MPa na głębokości 1,0 m, do około 14 MPa na głębokości 3,0 m. Wiercenie wykonane obok tego sondowania wykazało, że napotkano przeszkodę w postaci kamienia po przejściu, którego stwierdzono, że przesłona jest bardzo miękka, a od głębokości 5,0 m otwór był zaciskany. Głębokość przesłony wykonanej w tym miejscu wyniosła około 5,5 m. W przypadku sondowania CPT4 opory sondowania zmieniały się od 1 MPa na głębokości 2,0 m do 8 MPa na głębokości od 3,2 do 4,6 m. Poniżej głębokości 4,6 m do głębokości 7,0 m opory sondowania (q_c) oscylują wokół wartości 10 MPa.

Z uwagi na fakt, że celem sondowań była przede wszystkim ocena głębokości i jednorodności przesłony w niniejszym artykule wyniki badań CPT nie będą przedstawione.

Ocena przesłony na podstawie wykonanych badań i obserwacji

Na podstawie wykonanych badań oraz obserwacji można stwierdzić, że przepuszczalność przesłony zmienia się w zakresie od $3,0 \cdot 10^{-7}$ do $1,9 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Największe wartości współczynnika filtracji (przesłona najbardziej przepuszczalna) uzyskano w przesłonie od strony zachodniej (profil BAT 1) $3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i wschodniej (profil BAT 4) $2,07 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, przy czym w profilu BAT 1 stwierdzono, że przesłona jest bardzo miękka, zaś w profilu BAT 4 przesłona była bardzo sztywna (mocno scementowana) jednakże przepuszczalna.

W tabeli 1 zestawiono wartości współczynników filtracji uzyskanych z badań sondą BAT. W tabeli tej zamieszczono również informacje dotyczące rodzaju i stanu gruntu występującego w podłożu w poszczególnych profilach na danych głębokościach przed wykonaniem przesłony.

Jak wynika z analizy powyższej tabeli, największe wartości współczynników filtracji uzyskano w miejscach występowania gruntów o grubszym uziarnieniu tj. piasków średnich i grubych (Profil BAT1 i BAT4).

Nie jest znane autorom niniejszego opracowania czy w zależności od warunków gruntowych roztwór cementowo-bentonitowy był modyfikowany czy wszędzie zastosowano roztwór jednokowy. W celu uzyskania mniejszej wartości współczynnika przepuszczalności w gruntach bardziej przepuszczalnych należy stosować inny roztwór bądź inną technologię.

W tabeli 2 zestawiono głębokości wykonanych wierceń i sondowań CPT, na podstawie których dokonano oceny

TABELA 1. Zestawienie wyników badań przepuszczalności sondą BAT
TABLE 1. The results of BAT permeability tests

Profil pomiarowy	Głębokość [m ppt.]	Współczynnik filtracji [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Rodzaj gruntu, w którym wykonano przesłonę	Stan gruntu, w którym wykonano przesłonę I_D
BAT 1	4,3	$1,8-3,0 \cdot 10^{-7}$	P_s	0,25
BAT 1A	4,2	$7,1 \cdot 10^{-9}$	P_d/P_s	0,40
BAT 2	3,2	$3,6 \cdot 10^{-9}$	P_d	0,25
BAT 2	5,1	$1,9 \cdot 10^{-9}$	P_d	0,45
BAT 3	4,0	$1,21 \cdot 10^{-8}$	P_s	0,25
BAT 3	5,2	$6,4 \cdot 10^{-9}$	P_d	0,37
BAT 4	5,2	$2,07 \cdot 10^{-7}$	P_s/Pr	0,41

TABELA 2. Ocena głębokości przesłony na podstawie wierceń i sondowań i wierceń
TABLE 2. Estimation of cut-off wall depth on the basis of soundings and drillings

Profil wiercenia	Głębokość wiercenia [m ppt.]	Profil sondowania	Głębokość sondowania [m ppt.]	Stwierdzona głębokość przesłony [m ppt.]
OW 1	6,2	CPT 1	6,0	6,0
OW 1A	6,0	–	–	powyżej 6,0
OW 2	7,6	CPT 2	8,0	7,5
OW 3	5,5	CPT 3	3,0	5,5
OW 4	6,5	CPT 4	6,8	6,2

głębokości wykonanej przesłony w badanych miejscach.

Głębokość wykonanej przesłony jest bardzo zmienna. Największą głębokość około 7,5 m stwierdzono w profilu OW 2, CPT 2. Najmniejszą około 5,5 m w profilu OW 3. W profilu OW 1, CPT 1 głębokość przesłony wyniosła około 6,0 m. W profilu OW 4, CPT 4 przesłona miała głębokość 6,2 m.

Sondowania CPT wykazały dużą niejednorodność przesłony w profilu pionowym. Wartości wytrzymałości na ścinanie przesłony uzyskane na podstawie sondowań CPT są bardzo zmienne od bardzo niskich poniżej 0,1 MPa, sondowanie CPT 1, a w sondowaniach CPT2 i CPT4 osiągają, a nawet przekraczają wartość 0,5 MPa.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że sonda BAT może być z powodzeniem wykorzystywana do oceny przepuszczalności przesłony przeciwfiltracyjnej wykonywanej w technologii DSM. W zależności od twardości przesłony należy dobrać najodpowiedniejszy sposób wprowadzenia końcówki filtrującej w przesłonę. W przypadku dużej twardości przesłony, aby nie uszkodzić końcówki filtrującej należy wykonać odwiert, a następnie zainstalować filtr poprzez wbijanie.

Wyniki badań wykazały, że przepuszczalność przesłony wykonanej w technologii DSM zależy przede wszystkim od gruntu podłoża w którym ta przesłona jest wykonana. W przypadku występowania gruntów bardzo przepuszczalnych, aby uzyskać wymaganą

przepuszczalność przesłony należałoby zmienić recepturę lub ciśnienie iniektu.

Literatura

- DANIEL D.E., CHOI H. 1999: Hydraulic conductivity evaluation of vertical barrier walls. Special Publication No. 90: Geo-engineering for underground facilities. (ed. By Fernandez G. and Bauer R.A.), Urbana-Champaign: 140–161.
- FALACIŃSKI P., GARBULEWSKI K., KLEDYŃSKI Zb., SKUTNIK Z., Ziarkowska K. 2004: Badania barier hydraulicznych z zawiesin cementowo-bentonitowych z dodatkiem popiołów fluidalnych. *Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska 2* (29): 202–215.
- FRATALOCCHI E., PASQUALINI E. 1998: Permeability over time of cement-bentonite slurry walls. Proc. 3rd Congr. on Environ. Geotechn., A.A. Balkema ed., Lisbona, Vol.2, 509-514.
- KODA E., SKUTNIK Z. 2003: Quality control tests of vertical bentonite barriers for old sanitary landfill containment. Proc. 13th Eur. Conf. on Soil Mech. and Geot. Engin., Praga, I: 409–414.
- TORSTENSSON B. A. 1984: A new system for Groundwater Monitoring. *Groundwater Monitoring Review*: 131–138.

Summary

Quality control test of cut-off wall performed in the DSM technology on the basis of geotechnical soundings. In the paper the results of geotechnical investigations of hydraulic permeability, shear strength and depth control of cut-off wall are presented. The barrier performed in the DSM technology using a slurry composed of bentonite, cementations materials and water as well as polymineral clays. The tests were carried out using BAT system, Cone Penetration Tests and drillings. The main purpose of performed investigations was post construction quality estimation of cut-off wall.

Autors' address:

Zdzisław Skutnik, Marek Bajda
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: zdzislaw_skutnik@sggw.pl
marek_bajda@sggw.pl