

CHARAKTERYSTYKA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH WYBRANYCH MATERIAŁÓW REAKTYWNYCH

Katarzyna Pawluk

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości fizycznych i mechanicznych materiałów reaktywnych. Materiały reaktywne powszechnie wykorzystywane są do budowy strefy oczyszczania przepuszczalnych barier reaktywnych, służących do oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego z zanieczyszczeń. Dotychczasowe kryterium doboru materiałów reaktywnych do budowy barier obejmowało jedynie właściwości zatrzymania zanieczyszczeń oraz badania filtracyjne. Z uwagi na aspekt inżynierski projektowanych konstrukcji w środowisku gruntowo-wodnym i ich długi czas pracy proponuje się uwzględnić również właściwości fizyczne i mechaniczne tych materiałów. W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych wybranych materiałów reaktywnych, które mogą zostać wykorzystane przy doborze technologii wykonania oraz sprawdzenia stanów granicznych nośności podczas etapu projektowania PBR.

Słowa kluczowe: przepuszczalne bariery reaktywne, zeolit, ZVI, wytrzymałość na ścinanie, ściśliwość

WSTĘP

Technologia przepuszczalnych barier reaktywnych (PBR) traktowana jest jako jedna z podstawowych metod zabezpieczania i oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego. Metodę zaczęto stosować na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku w Kanadzie i Stanach Zjednoczonych jako metodę innowacyjną i alternatywną w stosunku do energochłonnej metody „pompuj i oczyszczaj” (*pump and treat*). Od tamtego momentu na całym świecie zastosowano ponad tysiąc systemów PBR i w dalszym ciągu trwa intensywny rozwój tej technologii, polegający na wykorzystaniu innowacyjnych

Adres do korespondencji – Corresponding author: Katarzyna Pawluk, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: katarzyna_pawluk@sggw.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2015

materiałów reaktywnych, konstrukcji oraz technologii wykonania [Powell i in. 1998, Gavaskar 1999, Roehl i in. 2001, Naftz i in. 2002, Suponik 2004, Burt i in. 2005, Fronczyk 2006, Navarro i in. 2006, Thiruvengkatachari i in. 2008, Phillips 2009, Fronczyk i in. 2010, ITRC 2011, Malina 2011, Suponik 2011].

Technologia PBR to różnego rodzaju konstrukcje inżynierskie, stanowiące strefę gruntu wypełnioną materiałem reaktywnym, w której podczas przepływu zanieczyszczeń wraz z wodami gruntowymi dochodzi do ich zatrzymania lub oczyszczenia podczas kontaktu z materiałem reaktywnym na drodze różnego rodzaju procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych [Rumar i Mitchell 1995, Powell i in. 1998]. Technologia ta w porównaniu z innymi metodami oczyszczania środowiska gruntowo-wodnego charakteryzuje się wieloma zaletami, do których przede wszystkim należy zaliczyć możliwość unieruchomienia zanieczyszczeń lub ich rozkład w warunkach *in situ*, bez konieczności odpompowania wód na powierzchnię terenu, jak to ma miejsce w przypadku metody „pompuj i oczyszczaj”. Niewątpliwą zaletą tej metody jest również brak konieczności dostarczania energii, ponieważ wykorzystuje się naturalny przepływ wód gruntowych przez strefę oczyszczania wypełnioną materiałem reaktywnym, która ma większą przepuszczalność niż podłoże gruntowe występujące na terenie zanieczyszczonym [ITRC 2011].

W zależności od zastosowanego materiału reaktywnego w strefie aktywnej PBR zachodzą różne procesy wspomaganego samooczyszczania. Wybór materiału uzależniony jest od rodzaju, stężenia oraz formy występowania zanieczyszczenia w środowisku gruntowo-wodnym. Czynnikiem, które determinują wybór optymalnego materiału, są przede wszystkim: aktywność, stabilność, brak negatywnego oddziaływania na środowisko, zdolność filtracyjna, dostępność oraz koszty [Gavaskar i in. 2000, ITRC 2005]. W pierwszych instalacjach PBR najczęściej wykorzystywano żelazo zerwartościowe (ZVI) [Wang i Zhang 1997, Powell i in. 1998, Gavaskar i in. 2000, Naftz i in. 2002, Suponik 2004, ITRC 2011]. Jednakże wieloletnie badania terenowe oraz laboratoryjne wskazują na możliwość wystąpienia uciążliwości podczas długotrwałego stosowania tego materiału. Głównie wymienia się spadek szybkości reakcji produktów pośrednich w stosunku do substratów oraz zmiany geochemiczne związane z wytrącaniem się osadów, które mogą powodować kolmatację bariery [Kamolpornwijit i in. 2003, Roehl i in. 2005, Johnson i in. 2008, Malina 2011]. W związku z powyższym poszukuje się nowych materiałów do wbudowania w systemy PBR. Spośród materiałów reaktywnych dotychczas wykorzystywanych w praktyce można wymienić następujące: zeolit, węgiel aktywny, wapienie, ORC[®], metale granulowane, popiół lotny, kompost i materiał organiczny [Naftz i in. 2002, Roehl i in. 2002, Yong i Mulligan 2004, Phillips 2009, ITRC 2011].

Wybór odpowiedniego materiału do PBR powinien poprzedzać etap zebrania szczegółowych informacji lub wykonania badań laboratoryjnych dotyczących właściwości materiałów reaktywnych, w tym fizycznych i hydraulicznych (np. porowatość, przewodność hydrauliczna). Należy również pamiętać o tym, że po instalacji materiałów w barierze ich właściwości mogą ulec zmianie [ITRC 2011]. Dotychczas w projektowaniu głównymi kryteriami doboru materiału do budowy bariery była jego zdolność do zatrzymywania zanieczyszczeń oraz właściwości filtracyjne. Jednakże w przypadku projektowania bariery i jej długoterminowej, stabilnej pracy w środowisku gruntowo-wodnym należy również wziąć pod uwagę zarówno właściwości fizyczne, jak i mechaniczne materiałów reaktywnych. Zwłaszcza w przypadku zastosowania do budowy PBR

mieszany materiałów reaktywnych lub układu warstw. W literaturze nie spotkano się z opisem charakterystyk materiałów reaktywnych, dotyczących parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych. Dotychczas takie badania nie były prowadzone przez ośrodki badawcze zajmujące się technologią PBR. Jedynie w pracach Fronczyk [2008] i Fronczyk i in. [2010] podjęto się określenia charakterystyk wytrzymałościowych zeolitu i mieszanek zeolitowo-piaskowych w przepuszczalnych barierach reaktywnych, traktując te parametry jako jedno z głównych kryteriów doboru materiałów reaktywnych do PBR.

W artykule przedstawiono wyniki badań jednoosiowego ściskania w aparacie bezpośredniego ścinania oraz wyniki badań edometrycznych wybranych materiałów reaktywnych – żelaza zerowartościowego oraz zeolitu. Badania mogą zostać wykorzystane jako dane wyjściowe do projektowania i modelowania stanów granicznych nośności konstrukcji PBR.

MATERIAŁ I METODY

Do badań laboratoryjnych wykorzystano następujące materiały: żelazo zerowartościowe (iPutec GmbH & Co. KG, Rheinfelden, Niemcy) oraz zeolit (Zeocem S.P, Słowacja). Żelazo zerowartościowe (ZVI) w 92% stanowiło żelazo z następującymi domieszkami: węgiel 2,8–3,2%, krzem 1,8–2,1%, fosfor 0,04–0,4%, chrom 0,05–0,4%, nikiel 0,05–0,3% oraz glin 0,01–0,1%. Natomiast zeolit w 84% stanowił klinoptylolit z domieszkami: krystalitu 8%, ilitu 4%, minerałów z grupy skaleni 4%, skał węglanowych < 0,5% i śladowej ilości kwarcu.

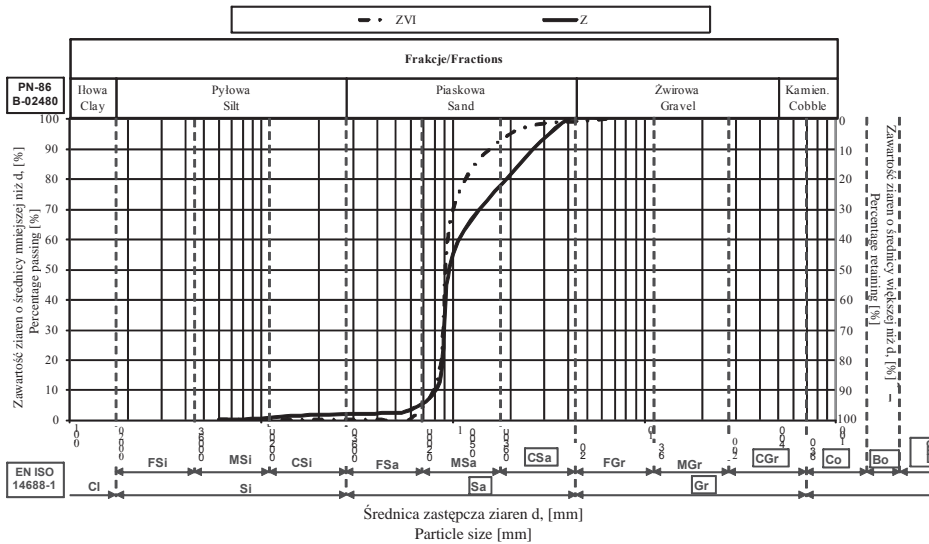
Badania laboratoryjne miały na celu określenie podstawowych właściwości fizycznych i mechanicznych wybranych materiałów. W pierwszej kolejności wykonano analizę sitową uziarnienia oraz klasyfikację materiałów zgodnie z normami: PN-88/B-04481, PN-86/B-02480, PN-EN ISO 14688-1 i ASTM D422-63. Badania przeprowadzono w laboratorium Katedry Geoinżynierii SGGW w Warszawie im. prof. Władysława Kollisa oraz w laboratorium Dipartimento di SIMAU Università Politecnica delle Marche. Następnie wyznaczono minimalną i maksymalną gęstość objętościową szkieletu gruntowego za pomocą aparatu widelkowego zgodnie z normą PN-88/B-04481 oraz powierzchnię właściwą metodą sorpcji błękitu metylenowego zgodnie z normą PN-88/B-04481 w laboratorium Katedry Geoinżynierii. Metoda adsorpcji błękitu metylenowego według polskiej normy PN-88/B-04481 polega na założeniu, że całkowita powierzchnia właściwa równa jest sumie rzutów powierzchni poszczególnych cząstek błękitu metylenowego zaadsorbowanych przez grunt w postaci warstwy jednocząsteczkowej, odniesiona do 1 g masy gruntu wysuszonego do stałej masy.

W laboratorium Dipartimento di SIMAU Università Politecnica delle Marche przeprowadzono badania względnego ciężaru właściwego szkieletu gruntowego (G_s) metodą piknometru zgodnie z normą ASTM D854-10 oraz badania wytrzymałości na ścinanie materiałów w aparacie bezpośredniego ścinania (skrzynkowym) zgodnie z normą ASTM D3080-11. Ponadto w laboratorium Katedry Geoinżynierii przeprowadzono serię badań edometrycznych zgodnie z normą PN-88/B-04481.

Właściwości fizyczne żelaza zerowartościowego (ZVI) i zeolitu (Z) zestawiono w tabeli 1, natomiast na rysunku 1 zaprezentowano ich skład granulometryczny.

Tabela 1. Właściwości fizyczne badanych próbek materiałów reaktywnych
Table 1. Physical properties of tested reactive materials

Material	C_u [-]	C_c [-]	G_s [-]	ρ [Mg·m ⁻³]	ρ_{dmin} [Mg·m ⁻³]	ρ_{dmax} [Mg·m ⁻³]	n [-]	n_e [-]	S_{BET} [m ² ·Mg]
ZVI	1,8	0,9	7,61	6,72	2,91	19,34	0,120	0,210	0,52·10 ⁶
Z	1,8	0,8	2,40	1,05	0,87	1,23	0,561	0,470	33,4·10 ⁵



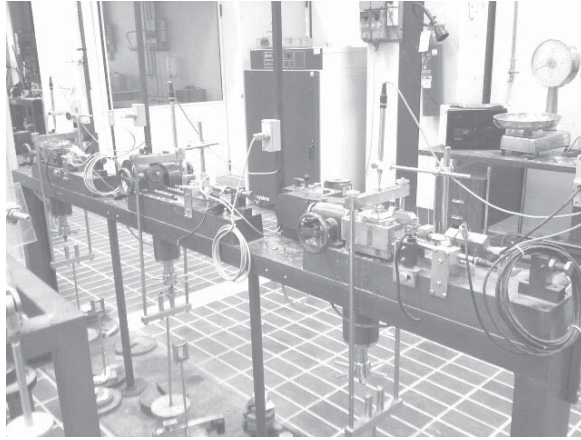
Rys. 1. Wynik analizy uziarnienia żelaza zerowartościowego (ZVI) i zeolitu (Z)
Fig. 1. Grain size distribution of ZVI and zeolite

Na podstawie krzywych uziarnienia wyznaczono wartości wskaźników: krzywizny (C_c) i jednorodności uziarnienia (C_u). Wszystkie badane materiały zostały sklasyfikowane jako piaski średnie – MSa [ASTM D422–63, PN-EN ISO 14688] i zaliczone do gruntów równoziarnistych ($1 \leq C_u \leq 5$), dobrze uziarnionych ($C_u = 1-3$), jednofrakcyjnych ($C_u < 6$) zgodnie z PN-EN ISO 14688.

W celu wyznaczenia parametrów wytrzymałościowych materiałów przeprowadzono serie badań w aparacie bezpośredniego ścinania (rys. 2).

Badania przeprowadzono w skrzynkach o wymiarach $60 \times 60 \times 60$ mm na próbkach zagęszczonych w stanie suchym. Próbki ograniczone były z góry i z dołu dwiema płytkami perforowanymi. Stopień zagęszczenia próbek (I_D) był stały i wynosił 0,6. Badanie przeprowadzono z pełną wstępną konsolidacją, a następnie przystąpiono do ścięcia przy stałej prędkości przesuwu poziomego, wynoszącej $0,0073152 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ oraz następujących naciskach pionowych (naprężeniach normalnych – σ) na próbki: 50, 100, 200, 300 kPa.

Ponadto przeprowadzono serie badań w edometrach standardowych, które należą do podstawowych laboratoryjnych badań ściśliwości określanej najczęściej w postaci modułu ściśliwości (M) oznaczającego stosunek przyrostu naprężenia do wywołanego przez



Rys. 2. Stanowisko badawcze z aparatami bezpośredniego ściskania
Fig. 2. Laboratory test post with the shear box apparatus

ten przyrost odkształcenia. W przypadku tych badań moduły nazwano edometrycznymi modułami ścisłości pierwotnej (M_0) i wtórnej (M), których wartości wyznaczono odpowiednio z krzywej ścisłości pierwotnej i wtórnej [Wdowska 2013]. Ze względu na złożoność konstrukcji aparatu (np. dźwignia, połączenia sworzniowe) przed zasadniczymi badaniami określano odkształcenia własne edometru przy takich samych obciążeniach, przy jakich badano próbki materiałów [Wdowska 2013].

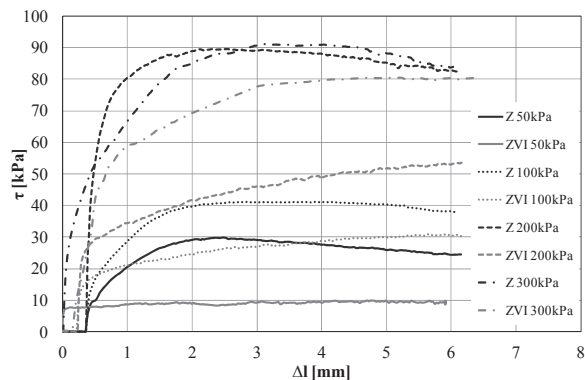
Badanie w edometrze polegało na stopniowym obciążaniu (12,5, 50, 100, 200, 300 kPa) próbek o średnicy 50 mm i wysokości 20 mm zeolitu oraz ZVI o początkowym stopniu zagęszczenia (I_D) równym 0,6 w warunkach uniemożliwiających ich boczną rozszerzalność. Założenie jest zgodne w przybliżeniu z rzeczywistymi warunkami, w jakich znajduje się materiał wbudowany w podłoże, gdzie jego boczna rozszerzalność jest również znacznie ograniczona sąsiadującym sztywnym gruntem. Na rysunku 3 przedstawiono widok stanowiska do badań.



Rys. 3. Stanowisko badawcze z edometrami
Fig. 3. Laboratory test post with the oedometer apparatus

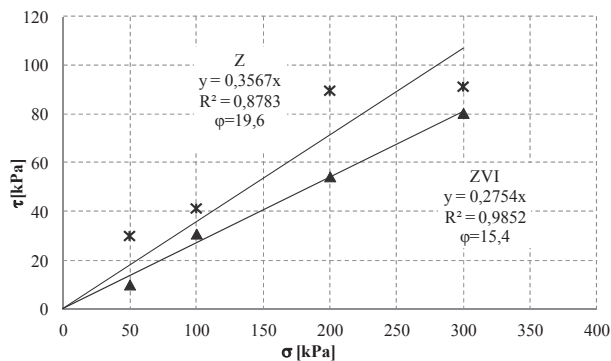
WYNIKI

Wytrzymałość na ścinanie jest jednym z najważniejszych parametrów wpływających na warunki stateczności projektowanych konstrukcji. Oznacza graniczny opór, jaki dany ośrodek przeciwstawia siłom przesuwanym, odniesiony do jednostki powierzchni. W przypadku kiedy w dowolnym punkcie ośrodka naprężenie ścinające osiągnie wartość wytrzymałości na ścinanie, następuje utrata stateczności i poślizg pewnej części gruntu w stosunku do pozostałej. W przypadku ścinania gruntów o strukturze ziarnistej występuje opór tarcia suwnego i obrotowego, czyli opór tarcia wewnętrznego, którego wielkość zależy od rodzaju gruntu (wymiaru i kształtu ziaren, pochodzenia gruntu) [Craig 1997, Pisarczyk 2001, Wiłun 2007]. Wyniki badań bezpośredniego ścinania, przeprowadzonych na kilku próbkach tego samego materiału dla różnych wartości naprężeń normalnych (σ), przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Wyniki badań materiałów w aparacie bezpośredniego ścinania – zależność naprężeń stycznych (τ) od przemieszczeń (Δl) przy ścinaniu

Fig. 4. Results of direct shear box tests on reactive materials – shear stress – displacement curves



Rys. 5. Wyniki badań próbek ZVI (\blacktriangle) i zeolitu ($*$) w aparacie bezpośredniego ścinania – zależność naprężeń stycznych (τ) od naprężeń normalnych (σ)

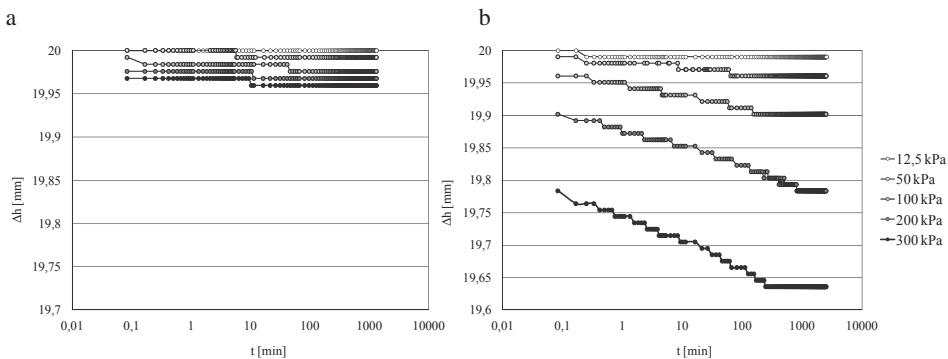
Fig. 5. Results of direct shear box tests on ZVI (\blacktriangle) and zeolite ($*$) – shear strength envelopes

W interpretacji wyników badań przyjęto, że wytrzymałość na ścinanie badanych materiałów wynika tylko i wyłącznie z oporów tarcia. W związku z tym wyznaczono wartości kąta tarcia wewnętrznego (φ), zakładając wartość spójności (c) równą zero. Wartości kąta tarcia wewnętrznego φ przy tym założeniu dla próbek badanych materiałów przedstawiały się następująco: ZVI – $15,4^\circ$ i zeolit – $19,6^\circ$.

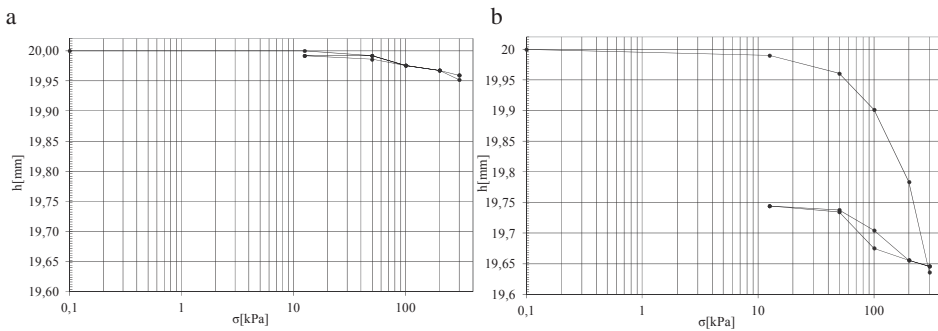
Wartości φ badanych materiałów reaktywnych były małe i mieściły się w zakresach charakterystycznych dla gruntów spoistych – od 16 do 25° [Craig 1997]. W przypadku gruntów niespoistych wartość φ zależy od kształtu i wymiaru ziaren, ich wzajemnej odległości, naprężeń efektywnych w szkielecie gruntu (a więc od pochodzenia i uziarnienia gruntu), oraz od wskaźnika porowatości [Day 2001]. Mniejsze wartości kąta tarcia wewnętrznego dla ZVI były spowodowane wrzecionowatym kształtem ziaren i tworzeniem się uprzywilejowanych płaszczyzn ścicia. Natomiast w przypadku zeolitu otrzymano małe wartości φ ze względu na cementację i/lub ścieranie się materiału na drobniejsze cząstki, które tworzyły wokół większych ziaren otoczkę, ułatwiając ich poślizg przy ścinaniu (mniejsze tarcie wewnętrzne); potwierdzają to również badania przeprowadzone przez Fronczyk i in. [2008].

Należy powtórzyć badania przy zastosowaniu aparatu trójosiowego ściskania, który umożliwi realizację wielu różnych schematów obciążania i określenie charakterystyk wytrzymałościowych materiałów reaktywnych z większą dokładnością. W aparatach trójosiowego ściskania kierunki naprężeń głównych pozostają w czasie badań niezmiennie, w przeciwieństwie do aparatów bezpośredniego ścinania. Kolejną zaletą metody trójosiowego ściskania jest formowanie się powierzchni poślizgu w zależności od właściwości materiału i warunków, a nie jak w przypadku metody bezpośredniej – wymuszonej przez konstrukcję aparatu.

Wyniki badań edometrycznych przedstawiono w formie krzywych konsolidacji na rysunku 6 oraz na wykresach krzywych ściśliwości na rysunku 7.



Rys. 6. Wyniki badań materiałów w edometrach – krzywe konsolidacji dla: a – ZVI, b – zeolitu
Fig. 6. Results of oedometer tests on reactive materials – consolidation curves of: a – ZVI, b – zeolite



Rys. 7. Wyniki badań materiałów w edometrach – krzywe ściśliwości dla: a – ZVI, b – zeolitu
 Fig. 7. Results of oedometer tests on reactive materials – compressibility curves of: a – ZVI, b – zeolite

Porównując wyniki badań dla dwóch materiałów, można stwierdzić, że większe wartości edometrycznych modułów ściśliwości (M) oraz obliczonych na ich podstawie wskaźników skonsolidowania (β) otrzymano dla żelaza zerowartościowego ($M_0 = 147,97$ kPa, $M = 150,00$ kPa, $\beta = 0,99$) przy obciążeniach wynoszących kolejno: 5, 50, 100, 200, 300 kPa. Natomiast dla zeolitu parametry te wynosiły odpowiednio: $M_0 = 16,48$ kPa, $M = 61,04$ kPa, $\beta = 0,27$. W przypadku ZVI zmiany wysokości próbek w zakresie stosowanych w badaniach naprężeń były niewielkie i wynosiły od 0,041 do 0,241%, podczas gdy wyniki badań zeolitu były zbliżone do wyników otrzymywanych dla gruntów niespoistych. Zmiany wysokości próbek wahały się od 0,049 do 1,771%, co świadczy o większej podatności na odkształcenia tego materiału.

PODSUMOWANIE

Interpretacja przedstawionych wyników jest niezmiernie trudna z uwagi na nieliczne publikacje na ten temat. Jednakże określone wstępne parametry wytrzymałościowe materiałów mogą być wykorzystane przy doborze technologii wykonania PBR oraz sprawdzenia stanów granicznych nośności podczas etapu projektowania. Ponadto mogą posłużyć jako dane do obliczeń numerycznych z wykorzystaniem metod elementów skończonych dla konkretnego obiektu inżynierskiego (np. w programie PLAXIS). Należy jednak przeprowadzić badania parametrów wytrzymałościowych materiałów reaktywnych przy zastosowaniu aparatu trójosiowego ściskania umożliwiające zastosowanie wielu różnych schematów obciążania, a także określenie charakterystyk wytrzymałościowych z większą dokładnością. Przeprowadzenie serii badań z wykorzystaniem zanieczyszczonych materiałów reaktywnych pozwoli na prognozowanie zmian wytrzymałości materiałów reaktywnych podczas pracy PBR w warunkach terenowych. Charakterystyki wytrzymałościowe i odkształceniowe materiałów reaktywnych powinny być uwzględniane na równi z pozostałymi podczas etapu projektowania i modelowania PBR, w szczególności w przypadku konstrukcji wielowarstwowych oraz zastosowania mieszanin materiałów reaktywnych do budowy strefy oczyszczania.

PIŚMIENNICTWO

- ASTM D422-63:2007. Standard Test Method for Particle – Size Analysis of Soils.
- ASTM D854-10 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
- Burt, T.A., Li, Z., Bowman, R.S. (2005). Evaluation of granular surfactant-modified/zeolite zero valent iron pellets as a reactive material for perchloroethylene reduction. *Journal of Environmental Engineering*, 131 (6), 934–942.
- Craig, R.F. (1997). *Soil mechanics*. Taylor & Francis, New York.
- Day, R. (2001). *Soil testing manual: procedures, classification data, and sampling practices*. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Fronczyk, J. (2006). Przepuszczalne bariery reaktywne – właściwości materiału aktywnego. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 33, 85–94.
- Fronczyk, J. (2008). Wykorzystanie mieszanek zeolitowo-piaskowych w przepuszczalnych barierach reaktywnych w rejonie składowisk odpadów. *Rozprawa doktorska*. SGGW, Warszawa.
- Fronczyk, J., Bąkowski, J., Garbulewski, K. (2010). Charakterystyki wytrzymałościowe zeolitu i mieszanek zeolitowo-piaskowych w przepuszczalnych barierach reaktywnych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 47 (1), 3–12.
- Gavaskar, A. (1999). Design and construction techniques for permeable reactive barriers. *Journal of Hazardous Materials*, 68, 41–71.
- Gavaskar, A., Gupta, N., Sass, B., Janosy, R., Hicks, J. (2000). Design guidance for application of permeable reactive barriers for groundwater remediation. Battelle, Columbus OH.
- ITRC – Interstate Technology & Regulatory Council (2005). *Permeable Reactive Barriers: Lessons Learned/New Directions*. PRB-4. Interstate Technology & Regulatory Council, PRB: Technology Update Team., Washington, D.C. Pobrano z lokalizacji: <http://www.itrcweb.org>.
- ITRC – Interstate Technology & Regulatory Council (2011). *Permeable Reactive Barrier: Technology Update*. PRB-5. Interstate Technology & Regulatory Council, PRB: Technology Update Team., Washington, D.C. Pobrano z lokalizacji: <http://www.itrcweb.org>.
- Johnson, R.L., Thoms, R.B., O'Brien Johnson, R., Krug, T. (2008). Field evidence for flow reduction through a zero-valent iron permeable reactive barrier. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 28 (3), 47–55.
- Kamolpornwijit, W., Liang, L., West, O.R., Molin, G.R., Sullivan, A.B. (2003). Preferential flow path development and its influence on long-term PRB performance: Column study. *Journal of Contaminant Hydrology*, 66 (3–4), 161–178.
- Malina, G. (2011). *Likwidacja zagrożenia środowiska gruntowo-wodnego na terenach zanieczyszczonych*. Wyd. PZLiTS, Poznań.
- Naftz, D.L., Morrison, S.J., Fuller, C.C., Davis, J.A. (2002). *Handbook of Groundwater Remediation Using Permeable Reactive Barriers: Applications to Radionuclides, Trace Metals, and Nutrients*. Elsevier Science, Amsterdam.
- Navarro, A., Chimenos, J.M., Muntaner, D., Fernandez, A.I. (2006). Permeable reactive barriers for removal of heavy metals: lab-scale experiments with low-grade magnesium oxide. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 26 (4), 142–152.
- Phillips, D. (2009). Permeable Reactive Barriers: A sustainable technology for cleaning contaminated groundwater in developing countries. *Desalination*, 248 (1–3), 352–359.
- Pisarczyk, S. (2001). *Gruntoznawstwo inżynierskie*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- PN-86/B-02480:1981. *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*.
- PN-88/B-04481:1988. *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*.
- PN-EN ISO 14688:2002. *Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikowanie gruntów*.
- Powell, R.M., Blowes, D., Gillham, R.W., Schultz, D., Sivavec, T., Puls, R.W., ..., Landis, R. (1998). *Permeable reactive barrier technologies for contaminant remediation*. EPA/600/R-98/125. EPA, Washington DC.

- Powell, R.M., Powell, P.D., Puls, R.W. (2002). Economic analysis of the implementation of permeable reactive barriers for remediation of contaminated ground water. EPA/600/R-02/034. EPA, Washington, DC.
- Roehl, K.E., Huttenloch, P., Czurda, K. (2001). Permeable sorption barriers for in-situ remediation of polluted groundwater – reactive materials and reaction mechanisms. In: Green 3. The Exploitation of Natural Resources and the Consequences. Thomas Telford Publishing, London, 466–473.
- Roehl, K.E., Huttenloch, P., Czurda, K. (2002). Permeable sorption barriers for in-situ remediation of polluted groundwater – reactive materials and reaction mechanisms. Thomas Telford Publishing, New York.
- Roehl, K.E., Czurda, K., Meggyes, T., Simon, F., Steward, D.I. (2005). Long-term performance of permeable reactive barriers. Elsevier, USA.
- Rumar, R.R., Mitchel, J.K. (1995). Assessment of barrier Containment Technologies. U.S. Department of Energy. National Technical Information Service, PB96-180583,437.
- Suponik, T. (2004). Optymalizacja parametrów bariery remediacyjnej dla zanieczyszczonych wód gruntowych obszaru składowisk odpadów. Praca doktorska. Wydział Górnictwa i Geologii, Politechnika Śląska, Gliwice.
- Suponik, T. (2011). Optimization of the PRB (Permeable Reactive Barriers) parameters for selected area of dumping site. The Publishing House of the Silesian University of Technology, Gliwice.
- Thiruvengkatahari, R., Vigneswaran S., Naidu, R. (2008). Permeable reactive barrier for groundwater remediation. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 14 (2), 145–156.
- Wang, C., Zhang, W. (1997). Nanoscale metal particles for dechlorination of PCE and PCBs. Environmental Sciences and Technology, 31 (7), 2154–2156.
- Wdowska, M. (2013). Wpływ zmian stopnia wilgotności na charakterystyki ściśliwości w badaniach edometrycznych. Acta Scientiarum Polonorum, Architectura, 12 (2), 33–41.
- Wiłun, Z. (2007). Zarys geotechniki. WKŁ, Warszawa.
- Yong, R.M., Mulligan, C.N. (2004). Natural attenuation of contaminants in soils. Lewis Publishers, Boca Raton FL.

THE MECHANICAL PROPERTIES OF SELECTED REACTIVE MATERIALS

Abstract. In this paper the physical and mechanical properties of reactive materials are presented. Reactive materials are build the reactive zone of permeable reactive barrier (PRB) used for the remediation of contaminated groundwater. Up till now the criteria for selecting a reactive material for PRB are included only the remediation and hydraulic properties of materials. However, physical and mechanical properties of these materials have to be taking into account due to the engineering aspect of design parameters of PRB in groundwater, as well as their stability and longevity. The paper presents the results of shear strength and compressibility properties of selected reactive materials that may be considered during the selection of construction technology of barrier and to verify the ultimate limit states during the design stage of PBR.

Key words: permeable reactive barriers, zeolite, ZVI, shear strength, compressibility

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.09.2015

Cytowanie: Pawluk, K. (2015). Charakterystyka właściwości mechanicznych wybranych materiałów reaktywnych. Acta Sci. Pol., Architectura, 14 (3), 57–66.