

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 58, 2012: 284–294
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 58, 2012)

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 58, 2012: 284–294
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 58, 2012)

Wojciech SAS, Ewa MACIOROWSKA

Laboratorium Centrum Wodne, Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie
Water Center Laboratory, Department of Geotechnical Engineering WULS-SGGW

Współczynnik filtracji destruktu betonowego, jako gruntu antropogenicznego, oznaczany laboratoryjnie metodą stałogradientową

Permeability coefficient of recycled concrete aggregate as an anthropogenic soil tested in laboratory by constant head method

Słowa kluczowe: współczynnik filtracji, grunt antropogeniczny, destruktu betonowy

Key words: coefficient of permeability, anthropogenic soil, recycled concrete aggregate

Wprowadzenie

Budowa konstrukcji ziemnych związana jest przede wszystkim z wykorzystaniem materiałów ziarnistych – gruntów oraz kruszyw, pochodzenia naturalnego. Materiał wbudowywany w nasypy musi odpowiadać zarówno wymaganiom technicznym, ekonomicznym, jak i środowiskowym. W przypadku gruntów i kruszyw naturalnych właściwości fizyczne, mechaniczne i filtracyjne tych materiałów znajdują swoje potwierdzenie w bogatej literaturze krajowej i zagranicznej. Jednakże zmniejszające się

zasoby materiałów naturalnych zmuszają do poszukiwania materiałów alternatywnych. Zastosowanie tych materiałów jest uzasadnione uwarunkowaniami technicznymi, ekonomicznymi, jak również środowiskowymi oraz prawnymi (Sas i Sobańska 2010). Częstą barierą stosowania materiałów alternatywnych jest niewystarczająca znajomość ich właściwości oraz brak opisów w literaturze. Jednym z przykładów takich materiałów jest materiał rozbiórkowy, pochodzący z recyklingu betonu cementowego, którego wartość techniczna potwierdzana jest przez wielu naukowców w kraju (Ocena i badania... 2004, Wpływ technologii... 2005) i za granicą (Araya i in. 2011).

W artykule przedstawiono metodykę i wyniki badań współczynnika filtracji przeprowadzonych na destrukcie betonowym o uziarnieniu 0–31,5 mm (Ma-

ciorowska 2012) wraz z dyskusją uzyskanych rezultatów badań.

Charakterystyka procesu filtracji

Zdolność gruntu do przepuszczania wody przez kanaliki utworzone z porów nazywana jest wodoprzepuszczalnością. Do określenia wodoprzepuszczalności gruntu wykorzystuje się stałą k , zwaną stałą Darcy'ego lub współczynnikiem filtracji. Opisuje ona zależność między spadkiem hydraulicznym i prędkością przepływu wody w gruncie (Wiłun 2001):

$$v = ki \quad (1)$$

gdzie:

v – prędkość przepływu wody w czasie [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

k – współczynnik wodoprzepuszczalności – stała Darcy'ego, równy prędkości przepływu (v) przy $i = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

i – spadek hydrauliczny.

Współczynnik filtracji charakteryzuje dany ośrodek, dlatego też zależy od uziarnienia i porowatości gruntu oraz od temperatury przepływającej wody.

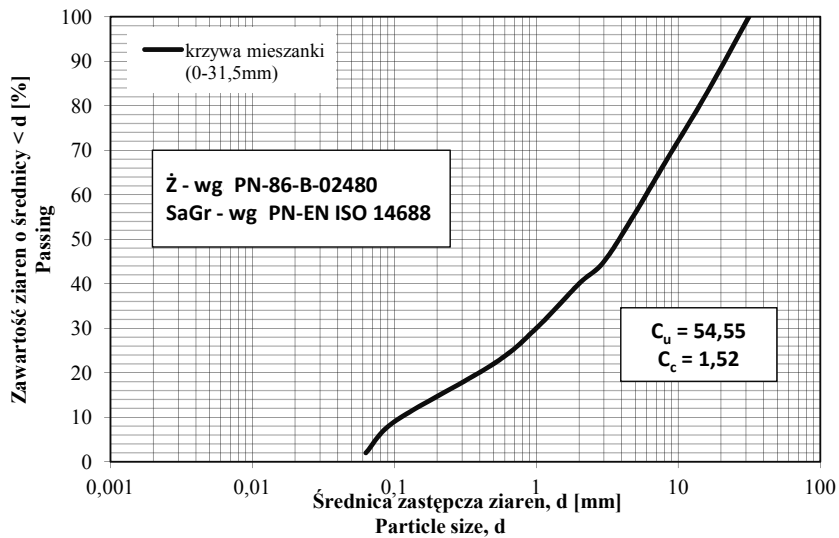
Charakterystyka materiału badawczego

Jako materiał badawczy posłużył destrukcyjny beton klasy B25, według PN-B-06250-1988, a C20/25 według PN-EN 1992-1-1-2008. Dobór materiału badawczego dokonany został celowo, jako reprezentatywny dla obecnie wyburzanych konstrukcji z lat 70., 80. i 90. ubiegłego wieku. Destrukt pozyskano z laboratorium badania jakości beto-

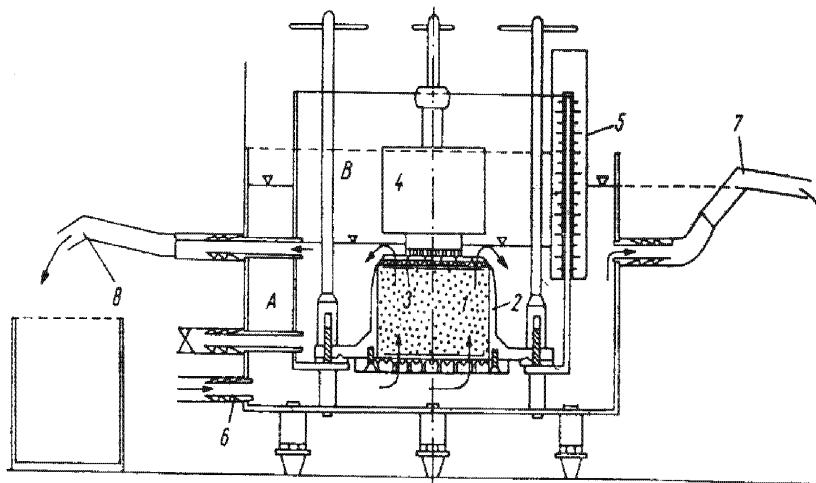
nu. Uzyskany materiał badawczy został następnie rozfrakcjonowany, a dalsze badania przeprowadzono na mieszance o uziarnieniu 0–31,5 mm (Maciorowska 2012). Skład granulometryczny destruktu stanowią frakcje gruboziarniste, ziarna piasku (kruszywa naturalne) obtoczone nieregularnie spoiwem (shydratyzowanym cementem) oraz frakcja drobna (pyły) pochodząca z przekruszonego spoiwa. Krzywą uziarnienia badanego materiału antropogenicznego przedstawiono na rysunku 1. Badany materiał antropogeniczny, zależnie od przyjętej klasyfikacji, jest kruszywem z recyklingu – mieszanką niezwiązaną 0-31,5 (Mieszanki niezwiązane... 2010, PN-EN 13242), lub żwirem piaszczystym o symbolu saGr (PN-EN ISO 14688-2). Prezentowany materiał jest kruszywem – gruntem o ciągłym uziarnieniu (PN-EN ISO 14688-2), o wskaźniku różnoziarnistości $C_u = 54,55$ (grunt wielofrakcyjny) oraz wskaźniku krzywizny $C_c = 1,52$ (dobrze uziarniony pod względem procesu zagęszczania). Materiał badawczy w swojej masie zawierał: 9% frakcji 0,1 mm, 2% frakcji poniżej 0,063 mm, 21% stanowiły ziarna między 0,1 i 1,0 mm. Zdecydowaną większość (70%) stanowiły ziarna między 1,0–31,5 mm. Jest to więc materiał gruboziarnisty, o stosunkowo niewielkim zapyleniu.

Metodyka badania współczynnika filtracji

Do pomiaru współczynnika filtracji materiału antropogenicznego zastosowano urządzenie ITB-ZWK-2, którego schemat przedstawiono na rysunku 2. Badania wykonano w laboratorium Ka-



RYSUNEK 1. Krzywa uziarnienia materiału badawczego
FIGURE 1. Grain size distribution curve of tested material



RYSUNEK 2. Aparat ITB – ZWK-2 (Wiłun 2001): A – cylinder zewnętrzny, B – cylinder wewnętrzny; 1 – próbka mieszanki gruzobetonowej, 2 – pierścień, 3 – perforowany krążek, 4 – obciążnik o masie 12,5 kg, 5 – pionowa podziałka do odczytu wysokości zwierciadła wody w cylindrach, 6 – zawór doprowadzający wodę do cylindra, 7 – przelew z cylindra zewnętrznego, 8 – przelew z cylindra wewnętrznego

FIGURE 2. Apparatus ITB – ZWK-2 (Wiłun 2001): A – outer cylinder, B – inner cylinder; 1 – sample of unbund material, 2 – ring, 3 – perforated disc, 4 – 12,5 kg dead load, 5 – vertical measurement of the water table, 6 – valve supplying water to the cylinder, 7 – overflow off outer cylinder, 8 – overflow off inner cylinder

tedry Geoinżynierii Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska SGGW w Warszawie. Metodyka badawcza z wykorzystaniem tego urządzenia jest zgodna z metodą stałogradientową (PKN-CEN ISO/TS 17892-11) oraz Wymaganiami Technicznymi nr 4 (Mieszanki niezwiązane... 2010).

Badania wykonano na serii 5 próbek, przy 3 różnych gradientach na każdej próbce, o wartościach 0,67, 0,75 oraz 0,83 (Maciorowska 2012). Wszystkie badania wykonano, powtarzając tę samą metodykę badawczą. Zastosowany zakres gradientów podczas badań jest zgodny z wartościami podanymi w wytycznych WT-4 (Mieszanki niezwiązane... 2010) w granicach 0,3–0,8, a także odpowiada materiałom brązowym (Wały przeciwpowodziowe – Wytyczne instruktażowe 1982), gdzie zakres gradientów dopuszczalnych dla korpusów wałów zależnie od klasy wałów wynosi dla piasku grubego od 0,7–1,0. Zgodnie ze wskazaniami WT-4 (Mieszanki niezwiązane... 2010), materiał badawczy zaliczono do słabych kruszyw i przed badaniem filtracji poddano wstępnemu pięciokrotnemu przekruszeniu metodą Proctora (kruszenie się ziaren i wzrost zawartości frakcji o drobniejszym uziarnieniu). Dla celów postawionego zadania badawczego próbki do badań zagęszczano w cylindrach, stosując energię zagęszczania odpowiadającą 0,85% energii normalnej Proctora przy wilgotności powietrzno-suchej (PN-88/B-04481). Średnia wartość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego $\rho_d = 1,54 \pm 0,02 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Po każdej serii badań próbki gruntu podlegały ponownej ocenie składu granulometrycznego. Po zagęszczeniu próbki w pierścieniu umieszczano ją w cylindrze

wewnętrznym, pierścień mocowano, a próbkę obciążano obciążnikiem o masie 12,5 kg i przepuszczano przez nią wodę. Woda była doprowadzana do dołu próbki i przepływała przez nią do górnej jej powierzchni w celu usunięcia pęcherzyków powietrza z porów próbki. Podziałka umieszczona na ścianie cylindra wewnętrznego służyła do odczytywania różnicy poziomów wody w obu cylindrach. Po ustaleniu się spadku hydraulicznego przystępowano do właściwego pomiaru filtracji. W każdym przypadku mierzono czas przefiltrowania 100 ml wody. Rozpoczęcie właściwego pomiaru następowało po ustabilizowaniu się odpływu wody z próbki. Badania uznawano za zakończone, gdy trzy kolejne pomiary nie różniły się między sobą więcej niż o 2%.

Wyniki badań współczynnika filtracji

W trakcie badań po ustabilizowaniu się odpływu z próbki (odpowietrzeniu próbki i nasyceniu porów wodą) dla każdego gradientu w trzech powtórzeniach notowano czas przefiltrowania 100 ml wody. Wyniki badań uśrednionych wartości czasu zestawiono w tabeli 1.

Następnie, mając dany czas przepływu 100 ml wody przez próbkę kruszywa, obliczano współczynnik filtracji z następującego wzoru:

$$k = \frac{V}{100 \cdot F \cdot t \cdot i} \quad (2)$$

gdzie:

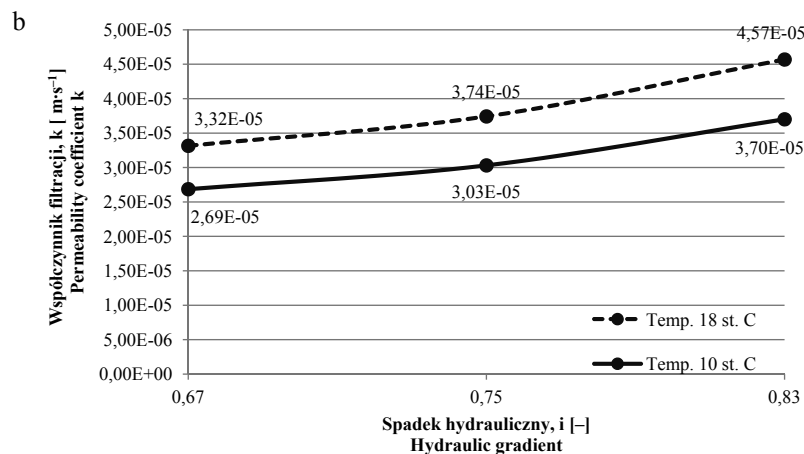
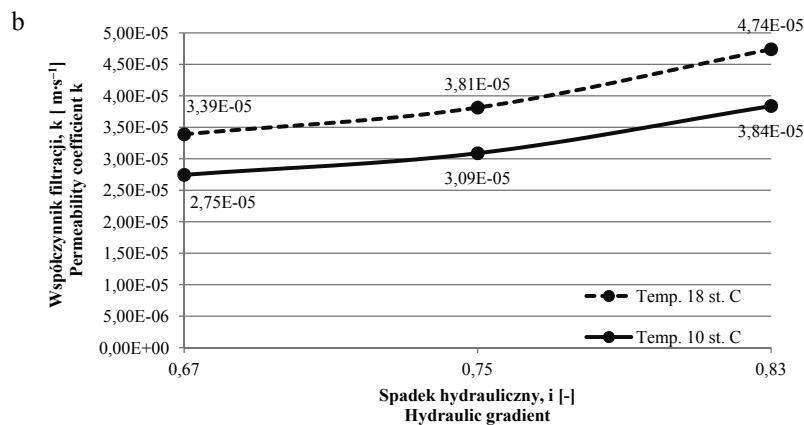
k – współczynnik filtracji [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

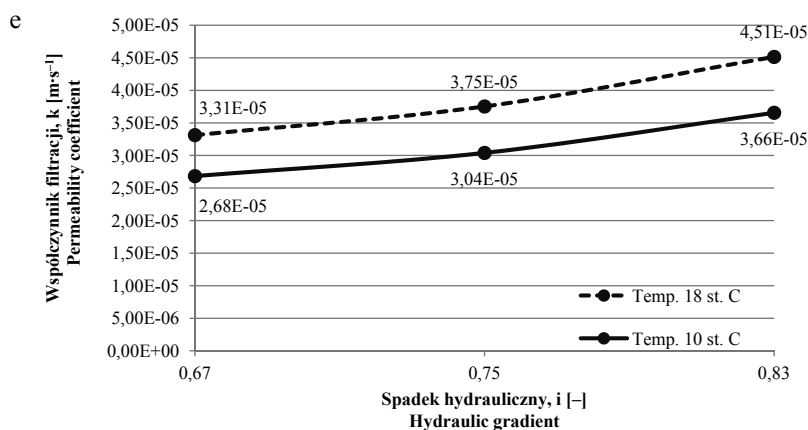
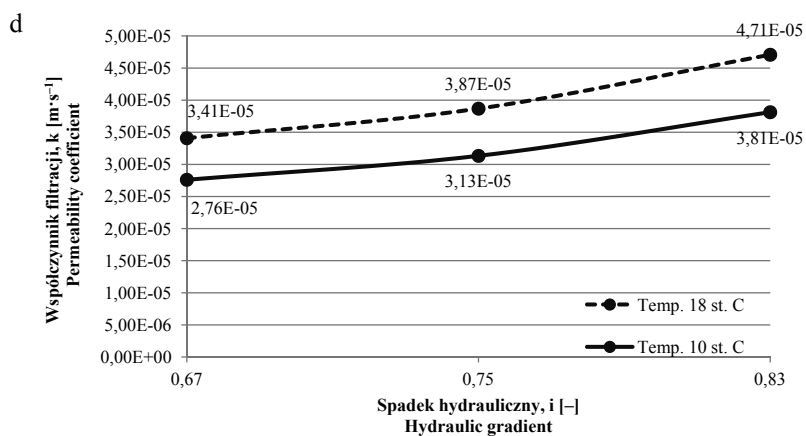
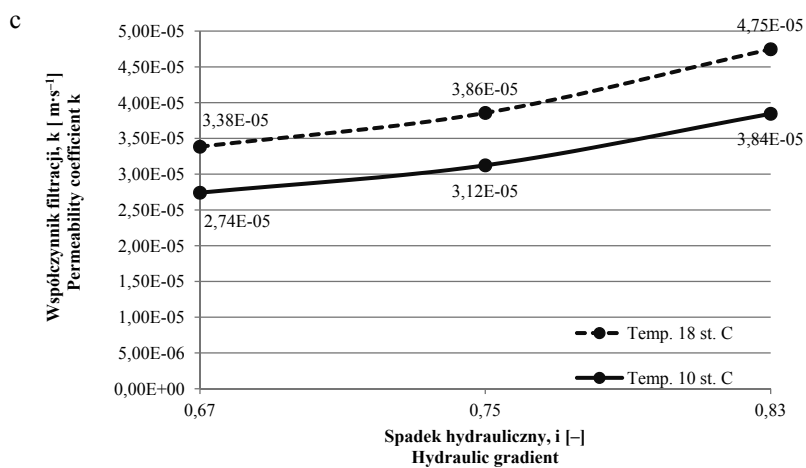
V – objętość wody przefiltrowana przez próbkę kruszywa w czasie t [ml],
 F – powierzchnia przekroju próbki prostopadła do kierunku filtracji [cm²],
 t – czas filtracji [s],
 i – spadek hydrauliczny [-].

Uzyskane z badań wartości współczynnika filtracji (k) dla poszczególnych serii badań przeliczono w stosunku do temperatury 10°C (k_{10}) i tak uzyskane wyniki, w zależności od zastosowanych gradientów, zamieszczono na rysunku 3.

TABELA 1. Średnie wartości czasu niezbędne dla przefiltrowania 100 ml wody
 TABLE 1. Mean time results depending on 100 ml water outflow

Spadek hydrauliczny Hydraulic gradient, i [-]	Średni czas / Mean time, t_{sr} [s]				
	próbka nr 1 sample No 1	próbka nr 2 sample No 2	próbka nr 3 sample No 3	próbka nr 4 sample No 4	próbka nr 5 sample No 5
0,67	419	428	420	417	429
0,75	331	335	327	326	336
0,83	240	247	239	241	252





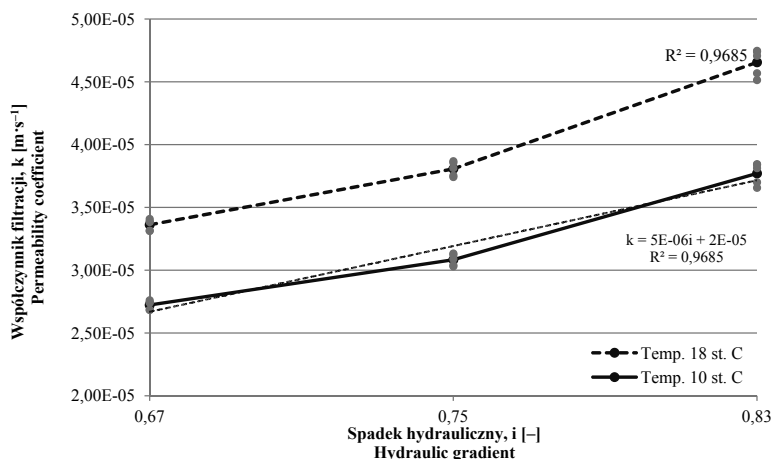
RYSUNEK 3. Zależność współczynnika filtracji od zastosowanego gradientu hydraulicznego dla próbek: a – nr 1, b – nr 2, c – nr 3, d – nr 4, e – nr 5

FIGURE 3. Correlation of permeability coefficient versus hydraulic gradient for sample: a – No 1, b – No 2, c – No 3, d – No 4, e – No 5

Analiza wyników badań

Uzyskane wartości współczynników filtracji poddano analizie statystycznej. W tym celu wyniki badań zestawiono na zbiorczym wykresie, gdzie zbiór wartości współczynników filtracji przedstawiono w funkcji zastosowanych gradientów (rys. 4). W tabeli 2 pokazano wartość minimalną i maksymalną oraz rozstęp wyników badań. Wartość współczynnika determinacji (R^2) dla zastosowanej linii trendu (funkcji liniowej) równy 0,9685, świadczy o bardzo silnym związku między

uzyskanymi wynikami badań. Można zauważyć, że dla gradientu 0,67 uzyskano największe zagęszczenie punktów badawczych wokół wartości średniej, a wraz ze wzrostem gradientu rozstęp się zwiększa. Może to świadczyć o tym, że przy większej wartości gradientu w gruntach tych zbliżamy się do takiej jego wartości, po której przekroczeniu możemy wywołać filtrację burzliwą (Malinowska i Szymański 2009). Zastosowane w badaniach gradienty nie pozwoliły jednak autorom na potwierdzenie zjawiska.



RYSUNEK 4. Zestawienie wyników badań k i k_{10} oraz zależność liniowa $k_{10}(i)$
 FIGURE 4. Composition of research results k and k_{10} with linear relation $k_{10}(i)$

TABELA 2. Wartości rozstępu dla 5 serii badań
 TABLE 2. Interval value for obtained data of 5 samples

Spadek hydrauliczny Hydraulic gradient i [-]	Temperatura Temperature [°C]	Minimum [$m \cdot s^{-1}$]	Maksimum [$m \cdot s^{-1}$]	Rozstęp Interval [$m \cdot s^{-1}$]
0,67	18	3,31E-05	3,41E-05	9,54E-07
0,75	18	3,74E-05	3,87E-05	1,26E-06
0,83	18	4,51E-05	4,75E-05	2,33E-06
0,67	10	2,68E-05	2,76E-05	7,73E-07
0,75	10	3,03E-05	3,13E-05	1,02E-06
0,83	10	3,66E-05	3,84E-05	1,88E-06

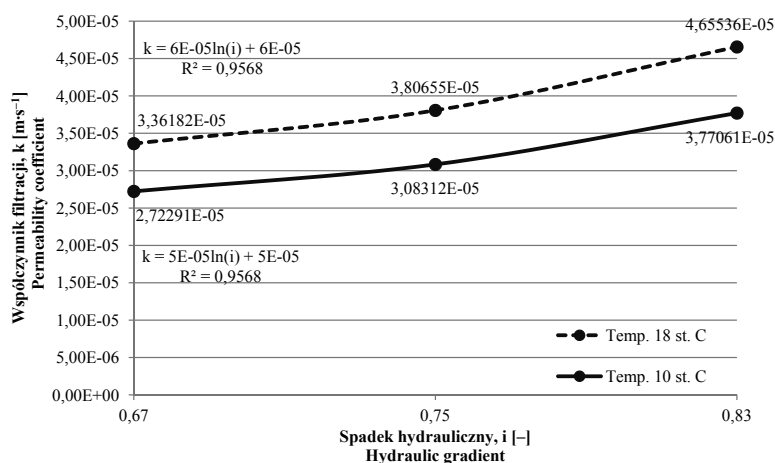
Otrzymane wyniki przedstawiono także na zbiorczym wykresie przedstawiającym uśrednione wartości wyników badań w funkcji gradientu hydraulicznego. Przy zastosowaniu funkcji logarytmicznej uzyskano współczynnik determinacji (R^2) równy 0,9568, co świadczy również o bardzo silnym związku uzyskanych wyników badań (rys. 5).

Prezentowane wykresy wskazują na uzyskaną w badaniach zależność współczynnika filtracji od zastosowanego gradientu hydraulicznego. Odbiega to od przyjętego założenia, że współczynnik filtracji zależy od uziarnienia i porowatości badanego materiału oraz od temperatury przepływającej wody i jest niezależny od zastosowanego gradientu hydraulicznego. Na uzyskane zależności może wpływać wiele czynników, m.in. zmiana uziarnienia mieszanki w trakcie zagęszczania (wpływ kruszenia się słabych ziaren) oraz stabilność wewnętrzna

i zewnętrzna uziarnienia (sufozyjność) w trakcie przepływu wody przez próbkę przy różnych gradientach.

W celu określenia rozbieżności między uzyskanymi wynikami współczynnika filtracji dla poszczególnych gradientów wyznaczono wartość średnią dla wszystkich gradientów oraz określono procentowe odchylenie wyników poszczególnych gradientów od średniej. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 6.

Analizując uzyskane wyniki, należy stwierdzić, że różnica między wartościami uzyskanymi dla poszczególnych gradientów jest stosunkowo niewielka i może zostać pominięta w przypadku rozwiązań praktycznych (Sas i in. 2012). Jednakże wskazuje także na trend zależności współczynnika filtracji od zastosowanego gradientu hydraulicznego w badaniach laboratoryjnych.

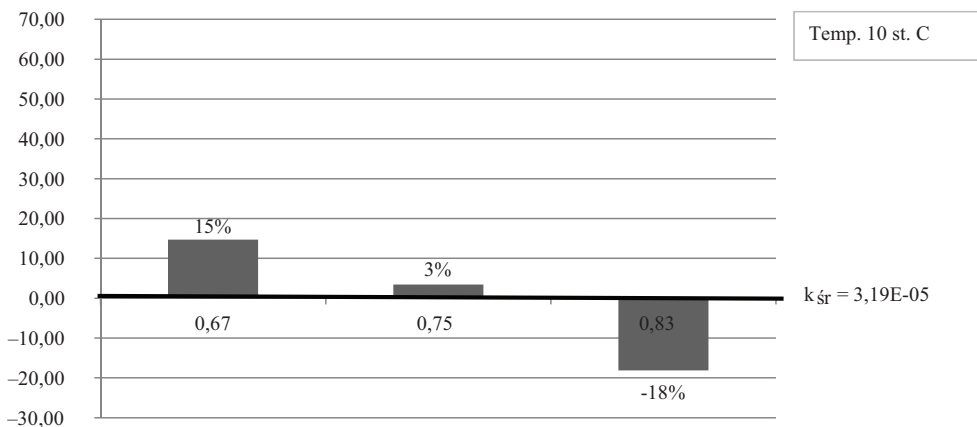


RYSUNEK 5. Średnie wartości współczynnika filtracji w funkcji gradientu hydraulicznego (zależność logarytmiczna)

FIGURE 5. Mean values of coefficient of permeability versus hydraulic gradient (logarithmic relation)

TABELA 3. Procentowe odchylenie wartości współczynników filtracji od średniej
 TABLE 3. Percentage deviations value of coefficient of permeability from average

Spadek hydrauliczny Hydraulic gradient i [-]	Temperatura Temperature [°C]	Gradient hydrauliczny dla próbek Hydraulic gradient for samples					Średnia dla gradientu Mean for gradient	Odchylenie od średniej Deviation of mean for research [%]
		nr 1 No 1	nr 2 No 2	nr 3 No 3	nr 4 No 4	nr 5 No 5		
0,67	10	2,75E-05	2,69E-05	2,74E-05	2,76E-05	2,68E-05	2,72E-05	15
0,75	10	3,09E-05	3,03E-05	3,12E-05	3,13E-05	3,04E-05	3,08E-05	3
0,83	10	3,84E-05	3,70E-05	3,84E-05	3,81E-05	3,66E-05	3,77E-05	-18
Średnia z badań / Mean for research							3,19E-05	



RYSUNEK 6. Zależność „gradientowych” wartości współczynnika filtracji od wartości średniej
 FIGURE 6. Mean values of permeability coefficient versus hydraulic gradient

Wnioski

W artykule podjęto ważną tematykę dotyczącą określania parametrów materiałów antropogenicznych. Tworzenie bazy wyników, w tym przypadku dla materiału pochodzącego z recyklingu destruktu betonowego, może pomóc inżynierom w podejmowaniu decyzji co do możliwości i celowości stosowania tych materiałów w budownictwie ziemnym. Uzyskane wyniki wskazują także możli-

wość stosowania metod przeznaczonych dla materiałów naturalnych.

Uzyskane wyniki są trudne do weryfikacji na podstawie rezultatów innych prac. Ze względu na małą bazę parametrów filtracji są one dyskusyjne i wymagają prowadzenia dalszych prac w celu statystycznego ich uwiarygodnienia. Wykazana zależność współczynnika filtracji od zadanego gradientu hydraulicznego odbiega od kryteriów stosowanych i wynikających z prawa Darcy'ego.

Nie są to wielkości znaczące, ale jednak ukazują pewien trend, którego wyjaśnienie może być bardziej złożone. Wynika z nich także, że w badaniach laboratoryjnych należy stosować gradienty zgodne z warunkami rzeczywistymi występującymi w konstrukcjach inżynierskich poddanych procesowi filtracji. W analizie wyników badań prawdopodobnie należy także uwzględnić właściwości chemiczne materiału i ich stabilność pod wpływem wody.

Prace te stanowią obecnie obszar badawczy autorów artykułu i po uzyskaniu nowych wyników badań będą cyklicznie prezentowane. Efektem dodanym ma być analiza możliwości zastosowania tych materiałów w warstwach prowadzących wodę lub poddawanych okresowo jej wpływowi.

Literatura

- ARAYA A. i inni 2011: Integrating traditional characterization techniques in mechanistic pavement design approaches. T&DI Congress, Chicago: 596–606.
- MACIOROWSKA E. 2012: Zmienność współczynnika filtracji destruktu betonowego w zależności od granulacji materiału badawczego. Praca inżynierska. SGGW, Warszawa.
- MALINOWSKA E., SZYMAŃSKI A. 2009: Analiza zmian gradientu hydraulicznego w charakterystykach przepływu słabonośnego podłoża. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 4 (46): 35–47.
- Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych. Wymagania Techniczne 4, 2010. Załącznik 3 do zarządzenia 102. GDDKiA, Warszawa.
- Ocena i badania wybranych odpadów przemysłowych do wykorzystania w konstrukcjach drogowych, 2004. IBDiM, Warszawa.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-11 Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 11. Badanie filtracji przy stałym i zmiennym gradientcie hydraulicznym. PKN 2009.
- PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- PN-B/06250-1988 Beton zwykły.
- PN-EN 13242:2004 Kruszywa do niezwiązanych i hydraulicznie związanych materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym.
- PN-EN 1992-1-1-2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowani gruntów. Część 2. Zasady klasyfikowania.
- SAS W., SOBĄŃSKA K. 2010: Recykling jako sposób zagospodarowania odpadów powstających przy remontach dróg. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 1 (47): 53–64.
- SAS W., SZYMAŃSKI A., MALINOWSKA E., GABRYŚ K. 2012: Geotechniczne uwarunkowania zastosowania materiałów antropogenicznych w budownictwie. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 4: 376–380.
- Wały przeciwpowodziowe. Wytyczne instruktażowe, 1982. Opracowanie zbiorowe pod kierunkiem A. Żbikowskiego. Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa.
- WIŁUN Z. 2001: Zarys geotechniki. WKŁ, Warszawa.
- Wpływ technologii zagęszczania na właściwości materiałów gruboziarnistych stosowanych do warstw mrozoochronnych, 2005. IBDiM, Warszawa.

Streszczenie

Współczynnik filtracji destruktu betonowego jako gruntu antropogenicznego oznaczany laboratoryjnie metodą stałogradientową. Warunki ekonomiczne oraz środowiskowe obecnie w dużym stopniu wpływają na zastosowanie w konstrukcjach ziemnych materiałów alternatywnych. Poważną barierą stosowania takich materiałów jest niewystarczająca znajomość ich właściwości fizycznych, mechanicznych oraz przepuszczalności, a także brak opisów tych właściwości w literaturze. Dobrym przykładem zastosowania materiałów alternatywnych

do budowy nasypów oraz wznoszenia konstrukcji nawierzchni drogowych jest materiał powstający podczas recyklingu destruktu betonowego, pochodzącego z rozbiórki obiektów budowlanych. Jednym z parametrów niezbędnych do praktycznego zastosowania tego materiału jest współczynnik filtracji, którego charakterystyka w literaturze jest niewystarczająco udokumentowana. W artykule przedstawiono metodykę i wyniki badań współczynnika filtracji, przeprowadzonych na gruncie antropogenicznym, o ciągłym uziarnieniu w zakresie 0–31,5 mm wraz z dyskusją uzyskanych rezultatów badań.

Summary

Permeability coefficient of recycled concrete aggregate as an anthropogenic soil tested in laboratory by constant head method. The aim of this paper is to prove

that anthropogenic material is useful to construct earth structures under influence of water table. The obtained results give a view through coefficient of permeability of granular material based on recycled concrete aggregate. Present work shows the concepts of permeability coefficient versus hydraulic gradient. It also outlines the methodology of conducted tests and their outcomes. The thesis ends with interpretation of obtained results and expression of reached conclusions.

Autor's address:

Wojciech Sas
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Laboratorium Centrum Wodne
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: wojciech_sas@wp.pl