

## WERYFIKACJA WYZNACZANIA WSPÓŁCZYNNIKA FILTRACJI GRUNTÓW NIESPOISTYCH ZA POMOCĄ WZORÓW EMPIRYCZNYCH W UJĘCIU ICH MIKROSTRUKTURY

Krzysztof Parylak, Zofia Zięba, Alicja Bułdys, Kinga Witek  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono znaczenie cech kształtu cząstek gruntów niespoistych w procesie filtracji wody oraz ich rolę w ujęciu normy Eurokod 7. Szczegółnej analizie poddano sposób wyznaczania współczynnika filtracji na podstawie wzorów empirycznych, które zgodnie z wymienioną normą mają stanowić wiarygodne narzędzie do określania tego parametru dla gruntów niespoistych. Oceny przydatności tej metody dokonano na podstawie doświadczalnych badań dwóch gruntów niespoistych o jednakowym drobnym uziarnieniu, ale o skrajnie zróżnicowanych cechach kształtu cząstek. Weryfikację obliczeń współczynnika filtracji przeprowadzono dla najczęściej stosowanych w praktyce wzorów empirycznych. Otrzymane wyniki porównano z wynikami badań laboratoryjnych wykonanych na próbkach gruntów o takich samych wskaźnikach porowatości, jakie przyjmowano w metodzie obliczeniowej. W konkluzji wykazano, że zalecane przez Eurokod 7 wykorzystywanie wzorów empirycznych do wyznaczania współczynnika filtracji gruntów niespoistych nie jest wiarygodnym sposobem określania tego parametru, głównie z powodu pomijania lub niedostatecznego uwzględnienia wpływu ich mikrostruktury.

**Słowa kluczowe:** współczynnik filtracji, mikrostruktura gruntów, wzory empiryczne

### WSTĘP

Współczynnik filtracji ( $k$ ) jest parametrem definiującym zdolność ośrodka gruntowego do przepływu w nim wody. W dużym stopniu zależy od takich cech gruntów, jak: uziarnienie, porowatość, skład mineralny, stopień wilgotności, a także od nadal niedocenianego kształtu i tekstury powierzchni cząstek [Cadergen 1997, Head i Epps 2011].

Z punktu widzenia praktyki inżynierskiej szczególnie istotny jest prawidłowy opis zjawiska przepływu wody w gruncie i precyzyjne wyznaczenie charakteryzującego go

współczynnika filtracji. Załącznik S do normy Eurokod 7 [PN-EN 1997-2] wyróżnia cztery metody badań tego parametru, jakimi są: badania polowe, badania laboratoryjne, szacowanie z badania edometrycznego oraz empiryczne korelacje ze składem granulometrycznym.

Wartości współczynnika filtracji uzyskane na podstawie metod opartych na fizycznym przepływie wody przez grunt (metody polowe i laboratoryjne) w sposób najbardziej dokładny uwzględniają wpływ geometrii ziaren na wartość współczynnika  $k$ . Problematyczne natomiast staje się wprowadzenie cech kształtu cząstek do wzorów empirycznych.

Trudność ujęcia mikrostruktury gruntów w formułach obliczeniowych powoduje, że uzyskane na ich podstawie wyniki nie powinny być uznawane za wiarygodne. Budzi zatem uzasadnioną wątpliwość fakt, że zgodnie z załącznikiem S do normy Eurokod 7 [PN-EN 1997-2] wzory empiryczne pozwalają w „dość dokładny” sposób określić współczynnik filtracji w przypadku jednorodnych gruntów niespoistych.

Celem podjętych w niniejszej pracy analiz jest weryfikacja wiarygodności stosowanych w praktyce metod wyznaczania współczynnika filtracji gruntów niespoistych na podstawie wzorów empirycznych. Mimo że sposób ten jest powszechnie uważany za mało dokładny, bardzo często traktowany jest jako wygodne narzędzie, głównie ze względu na łatwość określania cech uziarnienia, jak również metod obliczeń [Szymkiewicz i Kryczka 2011].

## **ZNACZENIE KSZTAŁTU CZĄSTEK GRUNTÓW W PROCESIE RUCHU WODY ORAZ W UJĘCIU NORMY EUROKOD 7**

Zależność między zdolnościami filtracyjnymi ośrodka gruntowego a strukturą porową jest przedmiotem stosunkowo nielicznych badań, a w większości analizy te ograniczają się do określania wpływu wielkości porów [Garcia-Bengochea 1978, Sasal i in. 2006]. Na ogół pomijane są takie cechy, jak geometria i skonfigurowanie powierzchni cząstek, które są szczególnie istotne, zwłaszcza w przypadku drobnych gruntów niespoistych. Jak wykazano we wcześniejszej pracy [Parylak i Zięba 2012], mikrostruktura gruntów determinuje wielkość i kształt przestrzeni porowej, decydując tym samym o zdolności utrzymania w nich wód związanych i stykowych. Ich obecność powoduje zmniejszenie objętości porów, przez którą może odbywać się swobodny przepływ wody, a więc definiuje wielkość porowatości efektywnej, warunkującej ruch wody w ośrodku gruntowym.

W ujęciu normy Eurokod 7 [PN-EN 1997-2] określenie kształtu cząstek jest elementem analizy makroskopowej gruntów gruboziarnistych, do których zaliczane są grunty charakteryzujące się wielkością ziaren od 0,063 do 63 mm, a więc od piasku drobnego do żwiru grubego [PN-EN ISO 14688-1]. Zgodnie z tą normą dla wymienionych gruntów powinny zostać określone trzy cechy kształtu – ostrość krawędzi, forma oraz charakter powierzchni. Szczegółowy opis poszczególnych charakterystyk przedstawiono w tabeli 1.

Makroskopowe definiowanie cech kształtu cząstek na podstawie kryteriów podanych w tabeli 1 jest na poziomie bardzo ogólnym, a fizycznie możliwe jest jedynie w przypadku żwirów. Dla pozostałych gruntów wyszczególnionych w normie jako gruboziarniste, jak na przykład piaski drobne, jest to niewykonalne. W tym przypadku jednak znacznie większą nieściślością od niedokładnego makroskopowego określenia geometrii i struk-

Tabela 1. Terminy określające kształt cząstek według normy PN-EN ISO 14688-1  
 Table 1. Terms describing the particle shape according to the PN-EN ISO 14688-1

Parametr – Parameter	Kształt cząstki – Particle shape
Ostrość krawędzi – stopień obtoczenia Angularity – roundness	bardzo ostrokrawędzisty – very angular
	ostrokrawędzisty – angular
	słabo ostrokrawędzisty – sub-angular
	słabo obtoczony – sub-rounded
	obtoczony – rounded
	dobrze obtoczony – well-rounded
Forma Form	sześcienne – cubic
	płaska – flat
	wydłużona – elongate
Charakter powierzchni Surface characteristics	szorstka – rough
	gładka – smooth

tury powierzchni ziaren jest całkowite pominięcie wpływu cech kształtu na właściwości gruntów. Jak wykazały badania, istnieje ścisły związek między kształtem cząstek a parametrami wytrzymałości na ścinanie [Parylak 2000, Mamok 2004, Tsomokos i Georgianu 2010], ściśliwością [Chmielewski 2006], a także przepuszczalnością gruntów [Carrier 2003, Parylak i Zięba 2012, Zięba 2013].

## MATERIAŁ BADAWCZY

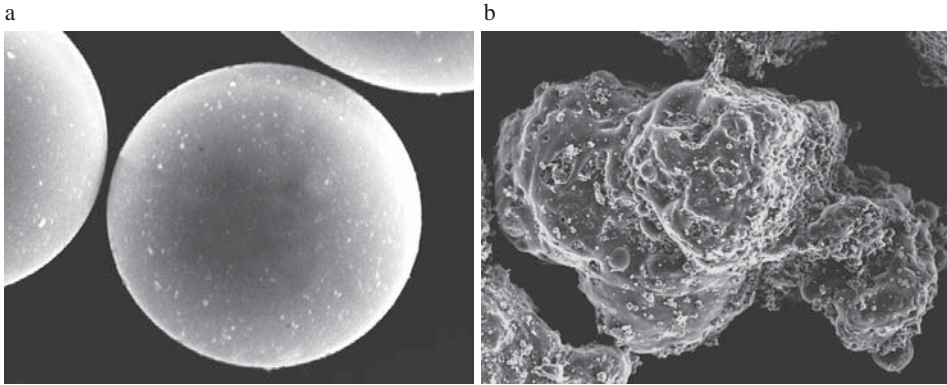
Do badań wybrano dwa niespoiste materiały gruntowe, które charakteryzowały się jednakowym, równoziarnistym uziarnieniem (tab. 2) oraz skrajnie zróżnicowanymi cechami kształtu i skonfigurowania powierzchni cząstek (rys. 1).

Tabela 2. Zestawienie cech charakteryzujących uziarnienie analizowanych gruntów [Parylak 2000]

Table 2. Presentation of grain size distribution characteristic of analysed soil [Parylak 2000]

Rodzaj gruntu Soil type	$d_{10}$ [mm]	$d_{30}$ [mm]	$d_{60}$ [mm]	$C_u$ [-]	$C_c$ [-]
Kulki szklane Glass pellets	0,021	0,034	0,071	3,4	0,78
Popiół lotny Fly ash	0,019	0,032	0,080	3,2	0,67

Analizie poddano sztuczne kulki szklane o niemal idealnej kulistości i gładkości powierzchni (rys. 1a) oraz popiół lotny z węgla kamiennego o bardzo rozbudowanej strukturze powierzchni ziaren (rys. 1b) [Parylak 2000].



Rys. 1. Cząstki analizowanych materiałów gruntowych powiększone  $\times 750$ : a – kulki szklane, b – popiół lotny

Fig. 1. Particles of the analysed soil materials in magnification  $\times 750$ : a – glass pellets, b – fly ash

W celu wyeliminowania pozostałych czynników mogących mieć wpływ na parametry przestrzeni porowej, a tym samym na wartości współczynnika filtracji uzyskane w badaniach laboratoryjnych, grunty te cechowały się zbliżonym składem mineralnym, a na etapie zagęszczania próbek były w stanie powietrznosuchym.

## METODYKA BADAŃ

### Badania wzorów empirycznych

Aby dokonać oceny przydatności wzorów empirycznych do wyznaczania współczynnika filtracji, przeprowadzono obliczenia tego parametru za pomocą czterech często stosowanych w praktyce wzorów, z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z ich drobnego uziarnienia. Uzyskane wartości porównano z wynikami badań laboratoryjnych wykonanych przy porowatościach odpowiadających zagęszczeniu  $I_D = 0,10; 0,30; 0,60; 0,90$ , jak w przypadku obliczeń.

Pierwszym zastosowanym wzorem było równanie Kozeny-Carmana wyprowadzone w 1927 roku, które pod postacią współczynnika, zwanego stałą Kozeny-Carmana ( $C_{KC}$ ), uwzględnia geometrię porów, przez co uważane jest za bardzo dokładne (wzór 1) [Lambe i Whitman 1978, Carrier 2003]. W formule tej występuje także wskaźnik porowatości ( $e$ ) oraz powierzchnia właściwa ( $S$ ), która w dużym stopniu odzwierciedla skonfigurowanie powierzchni cząstek [Head 1980]:

$$k = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{1}{C_{KC} \cdot S^2} \cdot \frac{e^3}{(1+e)} \quad (1)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik filtracji [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  
 $\gamma$  – ciężar właściwy cieczy [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  
 $\mu$  – dynamiczny współczynnik lepkości cieczy [ $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ],

$e$  – wskaźnik porowatości [-],  
 $S$  – powierzchnia właściwa [ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ],  
 $C_{KC}$  – stała Kozeny-Carmana [-].

Wartość stałej Kozeny-Carmana ( $C_{KC}$ ) wyraża iloczyn empirycznego wskaźnika zależnego od kształtu porów ( $\kappa$ ) oraz współczynnika krętości porów ( $\tau$ ). Jednak najczęściej w praktyce przyjmuje się wartość  $\kappa = 2,5$  i  $\tau = 2$ , a ich iloczyn przyjmuje się jako stałą  $C_{KC} = 5$  [Carrier 2003, Szymkiewicz i Kryczka 2011].

Kolejną weryfikowaną formułą obliczeniową był wzór Krügera, który uwzględnia zarówno porowatość ( $n$ ), jak i powierzchnię właściwą cząstek gruntowych ( $S$ ):

$$k_{10} = 13,5 \cdot \frac{n}{S^2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

Równanie to jest powszechnie używane w praktyce, a zakres jego stosowania określa norma branżowa dotycząca obliczania współczynnika filtracji gruntów niespoistych na podstawie uziarnienia i porowatości [BN-76 8950-03]. Mimo że w normie wyraźnie stwierdzono, że uzyskiwane w ten sposób wyniki są orientacyjne, to w praktyce często stanowią jedyne wartości, jakie są wyznaczane.

Zastosowane w obliczeniach wartości powierzchni właściwej ( $S$ ) analizowanych gruntów zostały przyjęte na podstawie badań Parylaka [2000] (tab. 3).

Tabela 3. Powierzchnia właściwa analizowanych gruntów [Parylak 2000]  
 Table 3. Specific surface area of the analysed soil [Parylak 2000]

Rodzaj gruntu Soil type	Powierzchnia właściwa Specific surface area [ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ]
Kulki szklane Glass pellets	0,268
Popiół lotny Fly ash	1,340

W ramach tych badań określone zostały także wartości maksymalnych i minimalnych porowatości ( $n$ ) i wskaźników porowatości ( $e$ ) – tabela 4, które były wyjściowymi cechami do określenia parametrów przyjętych do obliczeń wzorami, odpowiadających zagęszczeniu  $I_D = 0,10; 0,30; 0,60; 0,90$ .

Tabela 4. Zestawienie maksymalnych i minimalnych porowatości i wskaźników porowatości analizowanych gruntów [Parylak 2000]  
 Table 4. Presentation of maximum and minimum value of void ratio and porosity of analysed soil [Parylak 2000]

Rodzaj gruntu Soil type	$n_{\max}$ [-]	$n_{\min}$ [-]	$e_{\max}$ [-]	$e_{\min}$ [-]
Kulki szklane Glass pellets	0,396	0,254	0,654	0,340
Popiół lotny Fly ash	0,520	0,391	1,085	0,643

Ocenie poddano także równanie Slichtera, które ujmuje porowatość ogólną ( $n$ ) oraz średnicę  $d_{10}$ .

$$k_{10} = 0,078 \cdot n^{3,287} \cdot d_{10}^2 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (3)$$

W świetle literatury [Pazdro i Kozerski 1990] uzyskiwane na tej podstawie wyniki odzwierciedlają rzeczywisty charakter przepływu wody dla piasków i żwirów, których średnica miarodajna  $d_{10}$  mieści się w przedziale 0,01–5,0 mm.

Czwartym weryfikowanym wzorem było równanie USBR, na podstawie którego powstało wiele powszechnie stosowanych równań pokrewnych [Szymkiewicz i Kryczalło 2011]:

$$k_{10} = 0,0036 \cdot d_{20}^{2/3} \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (4)$$

Formuła ta ujmuje jedynie uziarnienie gruntów, a konkretnie średnicę miarodajną ( $d_{20}$ ). Równanie to znajduje zastosowanie dla gruntów, których średnica  $d_{20}$  mieści się w przedziale 0,01–2,0 mm. Według niektórych źródeł literatury stosowanie wzoru USBR pozwala na uzyskanie wyników współczynnika filtracji porównywalnych z wynikami uzyskiwanymi z badań laboratoryjnych [Hudak 2009] oraz polowych [Pazdro i Kozerski 1990].

### Badania laboratoryjne

Na potrzeby analizy wyników uzyskanych na podstawie wzorów empirycznych przeprowadzono laboratoryjne badania współczynnika filtracji, które wyraźnie odzwierciedlają rzeczywiste zdolności filtracyjne gruntów. Badania wykonano przy zagęszczeniu próbek:  $I_D = 0,1; 0,30; 0,60; 0,90$ , odpowiadającym wartościom porowatości i wskaźników porowatości uwzględnionych we wcześniejszych obliczeniach wzorami empirycznymi.

Badania przeprowadzono w aparacie ITB-ZW K2 oraz w konsolidometrze GDS przy dopływie wody od dołu oraz takich samych spadkach hydraulicznych ( $i$ ) równych odpowiednio: 0,30; 0,50; 0,80. Różnice między wartościami  $k$  uzyskane w tych aparatach przy tym samym spadku ( $i$ ) nie przekraczały 5%. Wyniki te zostały uśrednione i uznane za reprezentatywne.

### WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Wyniki badań laboratoryjnych wykazały, że mimo jednakowego uziarnienia i takich samych warunków, w jakich były wykonywane badania, uzyskano duże różnice między współczynnikami filtracji kulek szklanych i popiołu lotnego. Wyeliminowanie wpływu innych czynników pozwoliło na stwierdzenie, że wyraźne różnice przepuszczalności wynikają jedynie ze zróżnicowania cech kształtu cząstek. Wykazano, że charakteryzujący się bardziej rozbudowanym kształtem i strukturą powierzchni popiół lotny ma znacznie mniejsze wartości współczynnika filtracji niż kulki szklane. Wynika to z faktu, iż bardziej niekształtne cząstki popiołu lotnego o skonfigurowanej powierzchni utrzymują większą

ilość wody związanej w mikrozagłębieniach, niż ma to miejsce w przypadku kulek szklanych.

Porównanie tych wyników z wartościami współczynnika filtracji uzyskanego na podstawie wzorów empirycznych przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Porównanie wartości współczynnika filtracji na podstawie wzorów empirycznych z wartościami uzyskanymi na podstawie badań laboratoryjnych

Table 5. Comparison of the permeability coefficient value obtained based on empirical formulas and laboratory tests

Rodzaj gruntu Soil type	$I_D$ [-]	Współczynnik filtracji Permeability coefficient $k_{10}$				badania laboratoryjne laboratory testing [m·s <sup>-1</sup> ]
		równanie Kozeny-Carmana Kozeny-Carman formula [m·s <sup>-1</sup> ]	równanie Krügera Krüger formula [m·s <sup>-1</sup> ]	równanie Slichtera Slichter formula [m·s <sup>-1</sup> ]	równanie USBR USBR formula [m·s <sup>-1</sup> ]	
Kulki szklane Glass pellets	0,10	3,14E-06	7,20E-07	1,47E-06	3,24E-04	1,577E-05
	0,30	2,38E-06	6,74E-07	1,18E-06	3,24E-04	1,387E-05
	0,60	1,46E-06	5,97E-07	7,93E-07	3,24E-04	1,178E-05
	0,90	7,98E-07	5,10E-07	4,71E-07	3,24E-04	9,962E-06
Popiół lotny Fly ash	0,10	4,69E-07	3,83E-08	3,07E-06	3,24E-04	3,655E-06
	0,30	3,74E-07	3,66E-08	2,65E-06	3,24E-04	3,352E-06
	0,60	2,54E-07	3,38E-08	2,03E-06	3,24E-04	2,528E-06
	0,90	1,60E-07	3,05E-08	1,44E-06	3,24E-04	2,295E-06

W przypadku równania Kozeny-Carmana uzyskane współczynniki filtracji są o rząd wielkości niższe w porównaniu z wynikami badań laboratoryjnych. Z uwagi na zastosowanie dla obydwóch gruntów stałej Kozeny-Carmana  $C_{KC} = 5$  (zgodnie z zaleceniami literatury) pominięty został wpływ geometrii porów poszczególnych gruntów. Zaniżone wyniki uzyskano także w przypadku formuły Krügera i to o dwa rzędy wielkości. Interesująca okazała się natomiast ogólna tendencja zmian wielkości współczynnika filtracji otrzymanych na podstawie wzorów empirycznych uwzględniających powierzchnię właściwą. Tendencja ta jest zbliżona do rzeczywistych zdolności filtracyjnych analizowanych gruntów. Wynika to z tego, że parametr  $S$  w dużym stopniu odzwierciedla strukturę powierzchni cząstek, która wpływa na wielkość porowatości efektywnej.

Współczynniki filtracji uzyskane na podstawie równania Slichtera w porównaniu z wynikami badań laboratoryjnych były zaniżone w przypadku kulek szklanych, ale porównywalne co do rzędu wielkości dla popiołu lotnego. Jednakże zastosowanie w tym wzorze porowatości ogólnej spowodowało, że większymi wartościami  $k_{10}$  charakteryzował się popiół lotny niż kulki szklane. Uzyskano zatem tendencję odwrotną niż jest to w rzeczywistości. Zastosowana we wzorze porowatość ogólna ( $n$ ) nie uwzględnia roli wód związanych, zmniejszających przekrój porów wynikających z geometrii oraz stopnia skonfigurowania powierzchni cząstek.

Natomiast rozbieżności wyników badań laboratoryjnych z wynikami na podstawie równania USBR dowodzą, że błędne jest opieranie się jedynie na cechach uziarnienia, gdyż dla obydwu badanych gruntów, niezależnie od stopnia zagęszczenia, uzyskano taką samą wartość współczynnika filtracji.

## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz wyciągnięto następujące wnioski:

1. Grunty niespoiste o rozbudowanej geometrii i strukturze powierzchni cząstek wykazują znaczne mniejsze wartości współczynnika filtracji aniżeli grunty o regularnych kształtach i gładkiej powierzchni. Wynika to z faktu, że cechy kształtu ziaren wpływają na wartość porowatości efektywnej, decydując o przepuszczalności, co wiąże się ze zmianą zdolności utrzymywania w gruntach niespoistych określonej ilości wód związanych.

2. Wyniki obliczeń współczynnika filtracji uzyskiwane na podstawie wzorów empirycznych są niedokładne i wykazują duże zróżnicowanie, co podważa ich wiarygodność i wyklucza możliwość stosowania tej metody w dobrze pojętej praktyce inżynierskiej.

3. Za najbardziej wiarygodne spośród przedstawionych równań, mimo że również niedokładne, należy uznać uwzględniając powierzchnię właściwą ( $S$ ) równania Kozeny-Carmana i Krügera. Obliczone na tej podstawie wyniki dla poszczególnych gruntów wykazują taką samą tendencję zmienności wartości  $k_{10}$  jak wyniki badań laboratoryjnych. Jednocześnie sytuacja taka wskazuje kierunek dalszych badań, które pozwoliłyby powiązać powierzchnię właściwą z cechami kształtu ziaren.

4. Przeprowadzone badania i dokonana analiza podważają zawarte w literaturze [Pazdro i Kozerski 1990, Hudak 2009], normie branżowej [BN-76 8950-03], a przede wszystkim w normie Eurokod 7 [PN-EN 1997-2] założenia, że wzory empiryczne pozwalają uzyskać wiarygodne wartości współczynnika filtracji.

## PIŚMIENNICTWO

- Cadgergen R., 1997. Seepage, drainage and flow nets. John Wiley and Sons, New York.
- Carrier D., 2003. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. Technical notes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 129, 1054–1056.
- Chmielewski M., 2006. Badania nad wpływem cech kształtu cząstek gruntów niespoistych na wybrane parametry ściśliwości. Rozprawa doktorska. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław.
- Garcia-Bengochea I., 1978. The relation between permeability and pore size distribution of compacted clayey silts: Interim report. Joint Transportation Research Program Technical Report Sires, Indiana.
- Head K., 1980. Manual of soil laboratory testing. Vol. 1. Soil classification and compaction test. Pentech Press, London.
- Head K., Epps R., 2011. Manual of soil laboratory testing. Vol. 2. Permeability, shear strength and compressibility test. Whittles Publishing, Dunbeath Mill.
- Hudak M., 2009. Analiza porównawcza wybranych metod określania współczynnika filtracji gruntów. XV Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Bydgoszcz, 425–429.



- Lambe W., Whitman R., 1978. *Mechanika gruntów*. Tom 1 i 2. Arkady, Warszawa.
- Mamok B., 2004. Wpływ zagęszczenia i nieregularności kształtu cząstek drobnopiękistych gruntów niespoistych na wartości kąta tarcia wewnętrzznego. Rozprawa doktorska. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław.
- Parylak K., 2000. Charakterystyka kształtu cząstek drobnopiękistych gruntów niespoistych i jej znaczenie w ocenie wytrzymałości. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gliwickiej* 90, Gliwice.
- Parylak K., Zięba Z., 2012. Metoda określania parametrów przestrzeni porowej gruntów niespoistych z uwzględnieniem kształtu cząstek. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 4, 361–366.
- Pazdro Z., Kozerski B., 1990. *Hydrogeologia ogólna*. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.
- BN-76 8950-03 Budownictwo hydrotechniczne. Obliczanie współczynnika filtracji gruntów niespoistych na podstawie uziarnienia i porowatości.
- PN-EN 1997-2 Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- PN-EN ISO 14688-1 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
- Sasal M. et al., 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research* 87, 9–18.
- Szymkiewicz A., Kryczka A., 2011. Obliczanie współczynnika filtracji piasków i żwirów na podstawie krzywej uziarnienia: przegląd wzorów empirycznych. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 2, 110–121.
- Tsomokos A., Georgiannou V.N., 2010. Effect of grain shape and angularity on the undrained response of fine sands. *Canadian Geotechnical Journal* 47, 5, 539–551.
- Zięba Z., 2013. Wpływ cech kształtu cząstek drobnopiękistych gruntów niespoistych na ich wodoprzepuszczalność. Rozprawa doktorska. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław.

## THE VERIFICATION OF DETERMINING A PERMEABILITY COEFFICIENT OF NON-COHESIVE SOIL BASED ON EMPIRICAL FORMULAS INCLUDING ITS MICROSTRUCTURE

**Abstract.** The paper presents the importance of particles shape of fine-grained non-cohesive soils in water permeability process and its role according to the Eurocode 7. Methods of determining the permeability coefficient based on empirical formulas recommended by the above norm as reliable tools were particularly analysed. In order to the methods evaluation, laboratory test of two fine-grained non-cohesive soil materials were conducted. Tested grounds were characterised by the same grain size distribution and extremely diverse particle shape characteristic. Permeability coefficient calculations verifying this approach based on the formulas most often used in practice were performed. The obtained results were compared with laboratory tests conducted on soil samples which had the same value of void ratio, as used in calculations. The results have shown that using empirical formulas as the methods of permeability coefficient calculation of non-cohesive soil, which is recommended by Eurocode 7, is not a reliable way to determine this parameter, due to insufficient approach or ignoring the soil microstructure factor.

**Key words:** permeability coefficient, soil microstructure, empirical formulas