

ANALIZA ZMIAN DYSTRYBUCJI PORÓW POD WPLYWEM CYKLICZNEGO ZAMRAŻANIA- -ROZMRAŻANIA W WYBRANYCH GRUNTACH SPOISTYCH

Katarzyna Kurpias-Warianek

Politechnika Świętokrzyska

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki analizy istotności wpływu cyklicznego zamrażania-rozmrażania (ZR) oraz rodzaju systemu zamrażania na zmiany dystrybucji porów dla gruntów spoistych wybranych przy zastosowaniu wieloczynnikowej analizy wariancji. Na podstawie ilościowej analizy fotogramów SEM przeprowadzono analizę dystrybucji wielkości porów w wybranych reprezentatywnych próbkach 5 spoistych gruntów niemrożonych, poddanych jednemu cyklowi zamrażania w systemach otwartym i zamkniętym. W celach porównawczych zdefiniowano dwa parametry charakteryzujące otrzymane krzywe dystrybucji porów KDP: wskaźnik nierównomierności rozkładu (β) i wskaźnik podobieństwa krzywych KDP (ϵ).

Słowa kluczowe: cykliczne zamrażanie-rozmrażanie, parametry mikrostruktury, dystrybucja porów, wskaźnik nierównomierności rozkładu, wskaźnik podobieństwa krzywych

WSTĘP

Wśród wielu problemów „geotechniki mrozowej”, analizowanych w ciągu kilkadziesiąt lat przez licznych autorów, należy wymienić niezwykle istotny wpływ cyklicznego zamrażania i rozmrażania na zmiany parametrów mikrostruktury i właściwości geotechnicznych [Skarżyńska 1969, Chamberlain 1980, Kumor 1989, Baykal i Türe 1998, Asare i in. 1999, Viklander i Eigenbrod 2000, Sulkava i Huhta 2003, Chen i in. 2004, Dietzel 2005, Sjursen i in. 2005].

Analiza wyników dotychczasowych badań nad wpływem cyklicznego zamrażania-rozmrażania (ZR) na zmiany mikrostruktury świadczy o tym, że dochodzi tu m.in. do zmiany wielkości porów. Zjawisko to było sygnalizowane przez innych badaczy, zajmujących się wpływem cyklicznego ZR na właściwości gruntów budowlanych [Nagasawa i Umeda 1985, Yong i Boonsinuk 1985, Kujala i Laurinen 1989, Hohmann-Porebska

Adres do korespondencji – Corresponding author’s: Katarzyna Kurpias-Warianek, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce (e-mail: kkurpias@tu.kielce.pl)

2002]. W literaturze brak jednak prób systematycznego opisu opartego na kompleksowej analizie ilościowej. Możliwości, jakie daje numeryczna analiza obrazu NIA (Numerical Image Analysis), pozwalają na podjęcie próby prześledzenia wpływu cyklicznego ZR na rozkład (dystrybucję) rozmiarów porów w próbkach gruntów [Kozłowski i Kurpias-Warianek 2009]. Należy przypuszczać, że to właśnie zmiany dystrybucji wielkości porów stoją za obserwowanymi zmianami właściwości fizycznych i mechanicznych, a w szczególności takich parametrów, jak współczynnik filtracji, moduł ściśliwości i wskaźniki charakteryzujące wysadzinowość mrozową. Ponadto zmiana wielkości porów wpływa na zmianę właściwości kapilarnych gruntu, a tym samym – na zasadzie sprzężenia zwrotnego – determinując dalszy przebieg zmian na skutek cyklicznego ZR w kolejnych cyklach.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy wpływu cyklicznego zamrażania-rozmrażania (ZR) na zmiany rozkładu porów gruntów zamrażanych w systemie zamkniętym i otwartym. Specyficzny charakter eksperymentu wykonywanego w systemie zamkniętym wyklucza możliwość jakichkolwiek zmian wilgotności próbek podczas badań. Procesom zachodzącym w takim układzie musi towarzyszyć redystrybucja wody wewnątrz próbki przy jednoczesnym zachowaniu stałej średniej wilgotności, a głównymi czynnikami powodującymi zmiany wartości parametrów byłyby procesy towarzyszące zmianom mikrostruktury. Ponieważ ewentualne przemiany mikrostruktury gruntów w procesie przemrażania gruntu zależą od intensywności przemiany wody w lód i indukowanych w ten sposób naprężeń, zatem należałoby przypuszczać, że zamrażanie w systemie otwartym (z możliwym dopływem wody od dołu) wpłynie w istotny sposób na otrzymane wyniki w porównaniu z systemem zamkniętym. Jednak, jak zauważa Skarżyńska [1969], zarówno badania w systemie otwartym, jak i zamkniętym mogą odnosić się do rzeczywistych warunków w podłożu gruntowym. System otwarty modeluje sytuację z wysoko położonym zwierciadłem wody gruntowej, natomiast system zamknięty dotyczy profilu z nisko położonym zwierciadłem lub sztucznie spowodowanym brakiem możliwości dopływu wody do strefy przemrażania.

MATERIAŁY I METODYKA

Wyjściowym materiałem do badań było pięć naturalnych gruntów spoistych pochodzących z terenu województwa świętokrzyskiego. Głębokość wydobywania próbek gruntów wynikała z przyjęcia założenia, aby badane materiały nie były wcześniej narażone na działanie procesów naturalnego zamrażania. W związku z powyższym grunty oznaczone w pracy numerami 1, 2, 3, 4 i 5 wydobyto ze specjalnie wykonanych wykopów z głębokości około 3,0–7,0 m poniżej poziomu terenu. Taka głębokość wydobywania gruntów gwarantowała, że materiał badawczy znajdował się poza zasięgiem strefy przemrażania [PN-81/B-03020]. Dodatkowo założono, że wydobyte grunty mają należeć do grupy gruntów wysadzinowych, charakteryzujących się dużą zawartością frakcji pyłowej i ilowej. Wartości początkowych parametrów gruntów przedstawiono w tabeli 1.

W przypadku próbek zamrażanych w systemie zamkniętym do badań użyto cylindrów o wewnętrznej średnicy 65 mm i wysokości 220 mm, ograniczonych od dołu dnem. Specjalnie zaprojektowane stanowisko badawcze, zainstalowane wewnątrz komory Gröland, pozwoliło na stworzenie warunków odpowiadających otwartemu systemowi gruntowo-

Tabela 1. Właściwości początkowe badanych gruntów
Table 1. Initial soil properties

Grunt Soil	Granica	Granica	Wskaźnik	Stopień	Powierzchnia	Frakcje				
	plastyczności	plynności	plastyczności	plastyczności	właściwa	[%]				
	w_p [%]	w_L [%]	I_p [%]	I_L [%]	S [m ² ·g ⁻¹]	Fractions				
	Plasticity limit	Liquid limit	Plasticity index	Plasticity degree	Specific area	f_k	f_z	f_p	f_π	f_i
1	17,1	42,3	25,2	0,18	63,8	0	1	51	31	17
2	14,2	32,5	18,3	0,22	60,8	0	1	51	34	14
3	10,2	48,8	36,6	0,52	157,9	0	0	35	47	18
4	14,8	28,9	14,1	0,35	57,1	0	3	55	29	13
5	10,8	26,4	15,6	0,83	49,8	0	1	57	30	12

-wodnemu. Dla celów eksperymentów przeprowadzanych w systemie otwartym w komorze chłodniczej zamontowana została pozioma przegroda z materiału izolacyjnego w postaci warstwy styropianu o odpowiedniej grubości. Pojemniki na próbki gruntów w postaci stalowych pierścieni, o wymiarach identycznych jak dla cylindrów używanych do badań w systemie zamkniętym, umieszczano w odpowiednio dopasowanych otworach w warstwie styropianu. Wobec tego zamrażanie następowało tylko od góry, analogicznie jak w warunkach naturalnych. Podciąganie wody od dołu było możliwe na skutek osadzenia dolnej części cylindrów na ceramicznych filtrach zanurzonych w termostatowanych pojemnikach z wodą. Średnia temperatura wody podczas mrożenia utrzymywana była na poziomie +5°C. Stały poziom wody gwarantowało zamontowanie zaworu pływakowego, który regulował dopływ wody ze zbiornika, znajdującego się na zewnątrz komory. W każdym cyklu ZR temperatura mrożenia wynosiła -25°C, a odmrażania +20°C. Zarówno etapy zamrażania (Z), jak i rozmrażania (R) trwały po 24 h.

Dodatkowo metodą elektronowej mikroskopii skaningowej SEM wykonano fotografie próbek gruntów niemrożonych oraz poddanych jednemu cyklowi ZR w systemach otwartym i zamkniętym. Fotografie te posłużyły następnie do określenia parametrów przestrzeni porowej i opisu dystrybucji porów w próbkach gruntu.

WYNIKI I ANALIZA

Analizę krzywych dystrybucji porów przeprowadzono dla reprezentatywnych próbek z każdej grupy wyodrębnionej przez kombinację zmiennych grupujących grunt i system. Próbkę wybierano, stosując kryterium najmniejszej odchyłki między wartościami współczynnika filtracji otrzymanymi metodą analityczną i na drodze badań bezpośrednich w edometrze.

Dla tak wybranych próbek określono kumulacyjną krzywą dystrybucji wielkości porów (KDP), określoną jako wykres procentowej zawartości porów o danym promieniu zastępczym wraz ze wszystkimi porami o promieniach mniejszych:

$$KDP = \{x, y : y = f(r \leq x)\} \quad (1)$$

gdzie $f(r \leq x)$ – procentowa zawartość frakcji porów o promieniach mniejszych lub równych odciętej punktu na krzywej KDP.

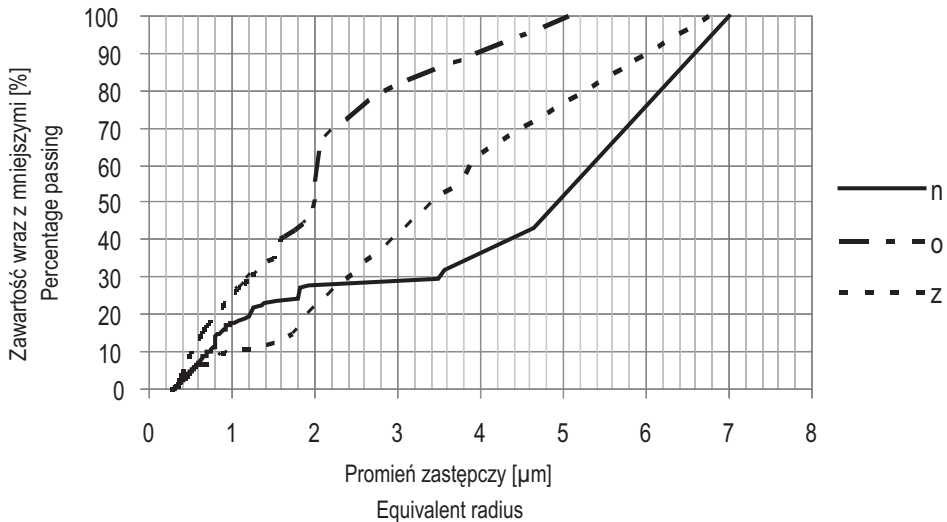
Jako promień zastępczy poru przyjęto dwukrotność promienia hydraulicznego ($R_{h,i}$), określonego według poniższego równania:

$$R_{h,i} = \frac{A_i}{U_i} \quad (2)$$

gdzie: A_i – pole przekroju i -tego poru [μm^2],
 U_i – obwód i -tego poru [μm].

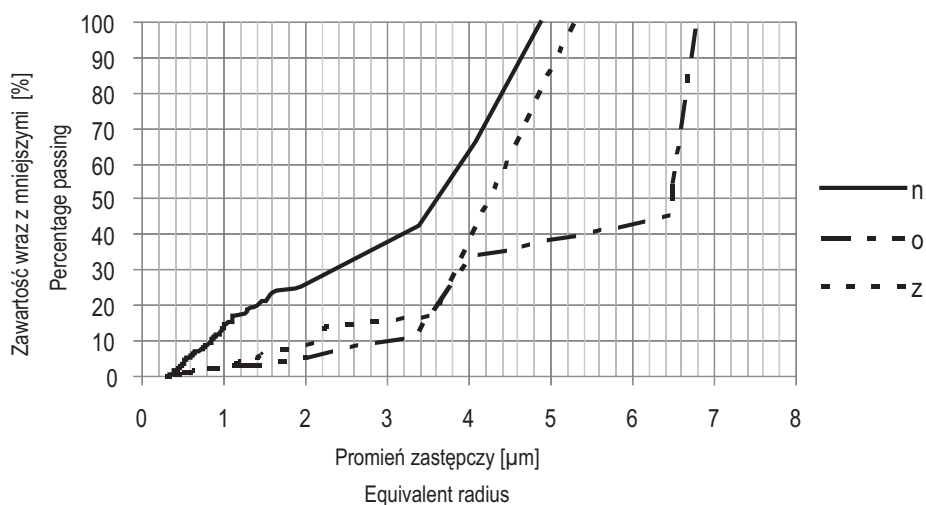
Tym samym promień zastępczy poru o hipotetycznym kształcie idealnego okręgu jest równy promieniowi tego okręgu.

Na rysunkach 1–5 przedstawiono krzywe dystrybucji porów dla poszczególnych gruntów – w każdym przypadku dla gruntu niemrożonego, zamrażanego w układzie otwartym oraz zamrażanego w układzie zamkniętym.



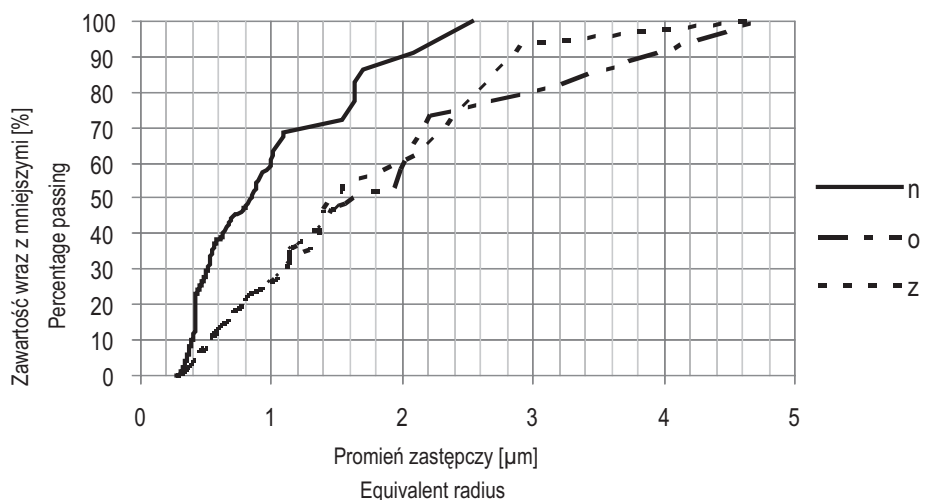
Rys. 1. Krzywe rozkładu wielkości porów dla gruntu 1 (n – grunt niemrożony, o – grunt po jednym cyklu ZR w systemie otwartym, z – grunt po jednym cyklu ZR w systemie zamkniętym)

Fig. 1. Pore-size distribution curves of soil 1 (n – unfrozen, o – after 1 cycle of freezing-thawing in an open system, z – after 1 cycle of freezing-thawing in a closed system)



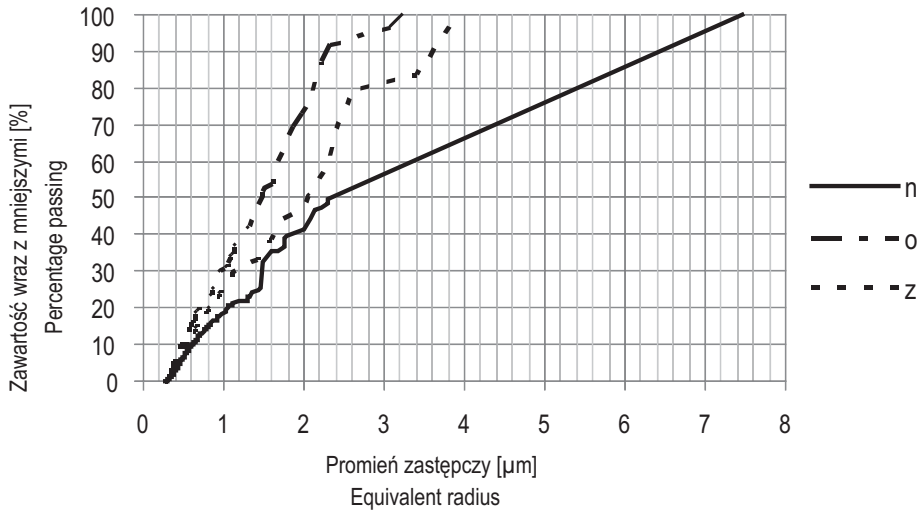
Rys. 2. Krzywe rozkładu wielkości porów dla gruntu 2 (n – grunt niemrożony, o – grunt po jednym cyklu ZR w systemie otwartym, z – grunt po jednym cyklu ZR w systemie zamkniętym)

Fig. 2. Pore-size distribution curves of soil 2 (n – unfrozen, o – after 1 cycle of freezing-thawing in an open system, z – after 1 cycle of freezing-thawing in a closed system)



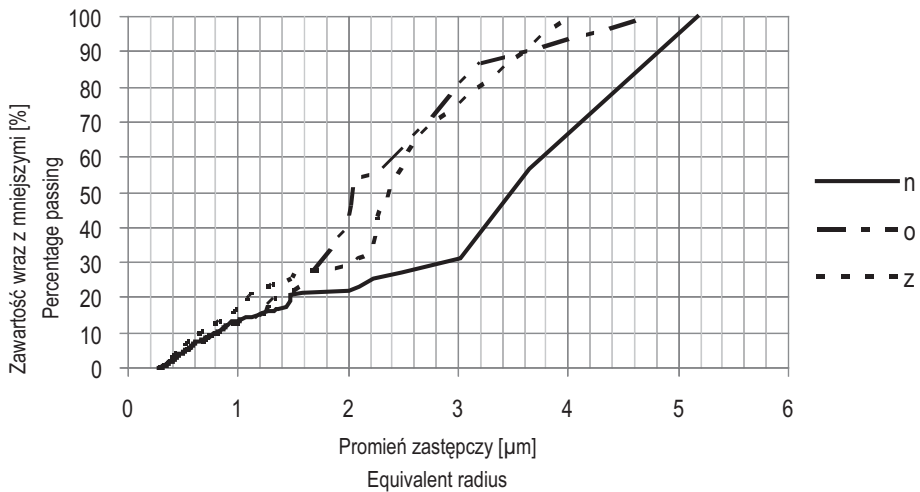
Rys. 3. Krzywe rozkładu wielkości porów dla gruntu 3 (n – grunt niemrożony, o – grunt po jednym cyklu ZR w systemie otwartym, z – grunt po jednym cyklu ZR w systemie zamkniętym)

Fig. 3. Pore-size distribution curves of soil 3 (n – unfrozen, o – after 1 cycle of freezing-thawing in an open system, z – after 1 cycle of freezing-thawing in a closed system)



Rys. 4. Krzywe rozkładu wielkości porów dla gruntu 4 (n – grunt niemrożony, o – grunt po jednym cyklu ZR w systemie otwartym, z – grunt po jednym cyklu ZR w systemie zamkniętym)

Fig. 4. Pore-size distribution curves of soil 4 (n – unfrozen, o – after 1 cycle of freezing-thawing in an open system, z – after 1 cycle of freezing-thawing in a closed system)



Rys. 5. Krzywe rozkładu wielkości porów dla gruntu 5 (n – grunt niemrożony, o – grunt po jednym cyklu ZR w systemie otwartym, z – grunt po jednym cyklu ZR w systemie zamkniętym)

Fig. 5. Pore-size distribution curves of soil 5 (n – unfrozen, o – after 1 cycle of freezing-thawing in an open system, z – after 1 cycle of freezing-thawing in a closed system)

Już pobieżna analiza otrzymanych krzywych skłania do wniosku, że cykliczne ZR w istotnym stopniu modyfikuje rozkład wymiarów porów. W celu bardziej precyzyjnego określenia natury i rozmiaru tych zmian zdefiniowano dwa parametry liczbowe. Pierwszy z nich to wskaźnik nierównomierności rozkładu (β) zdefiniowany przez analogię do znanego w gruntoznawstwie inżynierskim wskaźnika różnoziarnistości jako:

$$\beta = \frac{r_{60}}{r_{10}} \tag{3}$$

gdzie: r_{60} – zastępczy promień porów, odpowiadający 60% na krzywej KDP [μm^2],
 r_{10} – zastępczy promień porów, odpowiadający 10% na krzywej KDP [μm^2].

Mniejsza wartość wskaźnika β oznacza bardziej strome położenie krzywej KDP, a tym samym mniejsze zróżnicowanie wymiarów porów.

Typowym zachowaniem układu woda-grunt jest spadek wskaźnika nierównomierności (ujednoczenie rozkładu) na skutek cyklicznego ZR (tab. 2). W czterech z pięciu badanych gruntów nastąpiło zmniejszenie wartości wskaźników β w stosunku do wartości pierwotnej (grunt niemrożony). Największe ujednoczenie rozkładu następuje po zamrażaniu w systemie otwartym (grunty 1, 4 i 5). W czterech gruntach (grunty 1, 2, 4 i 5) wartości wskaźników β uzyskane po jednym cyklu ZR w dwóch systemach zamrażania są do siebie zbliżone, jednak wykazują znaczące różnice w porównaniu z wartościami charakteryzującymi grunt niemrożony. Najbardziej spoisty w badanej grupie grunt 3 (ił) wykazywał odmienne zachowanie; w jego przypadku wartość wskaźnika nierównomierności rozkładu zwiększyła się na skutek cyklicznego ZR, przy czym różnice między systemami zamrażania wydają się mało istotne.

Tabela 2. Wartości wskaźnika nierównomierności rozkładu (β)

Table 2. Values of inequality of distribution index (β)

Grunt Soil	Wskaźnik nierównomierności rozkładu (β) dla systemu zamrażania Inequality of distribution index depending on the system		
	n – grunt niemrożony unfrozen	o – system otwarty open system	z – system zamknięty closed system
1	7,6	3,9	4,1
2	4,7	2,2	2,0
3	2,6	3,9	3,6
4	5,6	3,6	4,5
5	4,8	2,9	3,9
Średnia Mean	5,1	3,3	3,6

Drugi z analizowanych parametrów, nazwany wskaźnikiem podobieństwa krzywych KDP (ε), został zdefiniowany jako:

$$\varepsilon_{j,k} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 (f_j(i) - f_k(i))^2}{7}} \tag{4}$$

gdzie indeksy j, k – jeden z trzech systemów zamrażania (n, o, z).

Tak więc współczynnik ε odpowiada średniemu odchyleniu procentowych zawartości frakcji odczytanych z dwóch krzywych KDP kolejno dla $r = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ i $7 \mu\text{m}$. Wartości te zostały ograniczone do takiego zbioru, ponieważ w żadnym z gruntów nie stwierdzono występowania porów o promieniach zastępczych $8 \mu\text{m}$ i większych. Oczywiście wskaźnik podobieństwa obliczony dla $j = k$ byłby równy zero. Im większa wartość tego wskaźnika, tym bardziej różnią się między sobą dwie porównywane krzywe rozkładu porów KDP. Warto zauważyć, że teoretycznym kresem górnym zbioru wartości tak zdefiniowanego wskaźnika podobieństwa jest liczba 100. Otrzymane wartości wskaźnika podobieństwa przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości wskaźnika podobieństwa krzywych rozkładu wielkości porów (ε)
Table 3. Values of similarity index of pore-size distribution curves (ε)

Grunt Soil	Wskaźnik podobieństwa (ε) dla krzywych Similarity index of pore-size distribution curves (ε)		
	$\varepsilon_{n,o}$	$\varepsilon_{n,z}$	$\varepsilon_{o,z}$
1	13,6	5,4	9,4
2	13,8	6,0	10,7
3	5,4	4,3	2,1
4	9,7	7,4	4,3
5	8,3	8,0	2,0
Średnia Mean	10,2	6,2	5,7

W przypadku wszystkich pięciu gruntów największa wartość wskaźnika podobieństwa (czyli największa różnica między krzywymi) dotyczy porównania krzywych uzyskanych dla gruntu niemrożonego i zamrażanego w systemie otwartym.

W przypadku trzech gruntów (grunty 3, 4 i 5) różnice między krzywymi KDP gruntów zamrażanych w układach otwartym i zamkniętym są mniejsze niż między gruntem niemrożonym i zamrażanym w układzie zamkniętym.

Powyższe obserwacje prowadzą do wniosku, że cykliczne zamrażanie prowadzi do znaczącej modyfikacji dystrybucji porów, niezależnie od systemu zamrażania, jednak wpływ zamrażania w układzie otwartym jest mocniejszy.

Dodatkowo obliczono zawartości trzech frakcji porów (tab. 4):

$f_{<2}$ – procentowa zawartość porów o promieniach zastępczych mniejszych lub równych $2 \mu\text{m}$,

f_{2-4} – procentowa zawartość porów o promieniach zastępczych w przedziale $2 < r \leq 4 \mu\text{m}$,

$f_{>4}$ – procentowa zawartość porów o promieniach zastępczych większych niż $4 \mu\text{m}$.

Na podstawie procentowych zawartości trzech frakcji porów zestawionych w tabeli 4 można wnioskować, że w większości przypadków (grunty 1, 4 i 5 oraz średnia) zmianę frakcji najdrobniejszych porów opisuje ciąg $f_{<2,o} > f_{<2,n} > f_{<2,z}$, czyli następował wzrost ilości najmniejszych porów po zamrażaniu w układzie otwartym i spadek – po zamrażaniu w układzie zamkniętym. Jednak w gruntach 2 i 3 prawidłowość ta uległa odwróceniu: $f_{<2,n} > f_{<2,z} > f_{<2,o}$, czyli na skutek cyklicznego ZR nastąpił znaczny spadek frakcji najdrobniejszych porów, nieco większy w systemie otwartym.

Tabela 4. Procentowa zawartość trzech frakcji porów w zależności od systemu zamrażania (n – grunt niemrożony, o – system otwarty, z – system zamknięty)

Table 4. The percentage of three fractions of pores depending on the system freezing (n – unfrozen soil, o – open system, z – closed system)

Grunt Soil	System zamrażania System freezing	$f_{<2}$ [%]	f_{2-4} [%]	$f_{>4}$ [%]
1	n	27,9	7,6	64,5
	o	47,0	43,2	9,8
	z	22,0	40,6	37,4
2	n	25,7	38,1	36,2
	o	5,1	28,3	66,6
	z	8,7	29,4	61,9
3	n	89,9	10,1	0,0
	o	58,8	33,0	8,2
	z	60,6	37,0	2,4
4	n	41,5	24,8	33,7
	o	73,0	27,0	0,0
	z	46,5	53,5	0,0
5	n	22,0	44,8	33,2
	o	40,2	53,3	6,5
	z	29,0	71,0	0,0
Średnia Mean	n	41,4	25,1	33,5
	o	44,8	37,0	18,2
	z	33,4	46,3	20,3

Wydaje się, że w systemach woda-grunt występują dwa różne typy reakcji dystrybucji porów na cykliczne ZR. Pierwsza z nich (typ A – grunty 1, 4 i 5) charakteryzuje spadek frakcji dużych porów, niezależnie od systemu zamrażania, oraz wzrost frakcji drobnych porów, jeśli zamrażanie następuje w systemie otwartym. Druga (typ B – grunty 2 i 3) wykazuje spadek frakcji drobnych porów z równoczesnym wzrostem frakcji porów największych, niezależnie od systemu zamrażania.

WNIOSKI

1. Na podstawie ilościowej analizy fotogramów SEM przeprowadzono analizę dystrybucji wielkości porów w wybranych reprezentatywnych próbkach gruntów niemrożonych, poddanych jednemu cyklowi zamrażania w systemach otwartym i zamkniętym. W celach porównawczych zdefiniowano dwa parametry charakteryzujące otrzymane krzywe dystrybucji porów (KDP): wskaźnik nierównomierności rozkładu (β) i wskaźnik podobieństwa krzywych KDP (ϵ).

2. Typowym zachowaniem układu woda-grunt jest spadek wskaźnika nierównomierności (ujednoczenie rozkładu) na skutek cyklicznego ZR, przy czym największe ujednoczenie rozkładu następuje po zamrażaniu w układzie otwartym. Takie zachowanie wydaje się jednak dotyczyć jedynie gruntów średnio spoistych i spoistych zwięzłych. Najbardziej spoisty w badanej grupie grunt 3 (il) wykazywał odmienne zachowanie. W jego przypadku wartość wskaźnika nierównomierności rozkładu zwiększyła się na skutek cyklicznego ZR, przy czym różnice między systemami zamrażania wydają się mało istotne.

3. W przypadku wszystkich pięciu gruntów największa wartość wskaźnika podobieństwa (ϵ), czyli największa różnica między krzywymi, dotyczyła porównania krzywych uzyskanych dla gruntu niemrożonego i zamrażanego w systemie otwartym.

4. Cykliczne zamrażanie prowadzi do znaczącej modyfikacji dystrybucji porów, niezależnie od systemu zamrażania, jednak wpływ zamrażania w układzie otwartym jest mocniejszy.

5. W większości przypadków (grunty 1, 4, 5 oraz średnia) zaobserwowano zmianę zawartości frakcji najdrobniejszych porów ($< 2 \mu\text{m}$) przy równoczesnym zwiększeniu zawartości frakcji porów największych ($> 4 \mu\text{m}$), jednak w gruntach 2 i 3 prawidłowość ta uległa odwróceniu. Wydaje się, że w systemach woda-grunt występują dwa różne typy reakcji dystrybucji porów na cykliczne ZR. Typ A (grunty 1, 4 i 5) charakteryzuje spadek frakcji dużych porów, niezależnie od systemu zamrażania, oraz wzrost frakcji drobnych porów, jeśli zamrażanie następuje w systemie otwartym. Typ B (grunty 2 i 3) wykazuje spadek frakcji drobnych porów z równoczesnym wzrostem frakcji porów największych, niezależnie od systemu zamrażania.

6. Obserwowane dla gruntów niemrożonych bardzo wysokie korelacje między wartościami odpowiednich frakcji porów i parametrami charakteryzującymi plastyczność ulegają znaczącej redukcji na skutek cyklicznego ZR. Szczególnie drastyczny spadek korelacji dotyczy otwartego systemu zamrażania. Tak więc przemiany struktury dotyczą w różnym stopniu powierzchni właściwej (łączenie lub rozpad agregatów) i przestrzeni porowej (dzielenie starych porów i powstawanie nowych na skutek zwiększania się kryształów lodu). W efekcie dochodzi do powstania nowego typu mikrostruktury, w którym typ pierwotnej zależności między parametrami strukturalnymi ulega modyfikacji.

PIŚMIENNICTWO

- Asare S.N., Rudra R.P., Dickinson W.T., Wall, G.J., 1999. Effect of freeze-thaw cycle on the parameters of the Green and Ampt infiltration equation. *Canadian Agricultural Engineering* 73, 265–274.
- Baykal G., Türe E., 1998. The effect of freeze-thaw cycles on the performance of compacted clay. *Contaminated and Derelict Land*, London.
- Chamberlain E.J., 1980. Overconsolidation effects of ground freezing. *Proc. 2nd ISGF, Trondheim*, I, 325–337.

- Chen T.C., Yeung M.R., Mori N., 2004. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action. *Cold Regions Science and Technology* 38, 127–136.
- Dietzel M., 2005. Impact of cyclic freezing on precipitation of silica in Me–SiO₂–H₂O systems and geochemical implications for cryosoils and sediments. *Chemical Geology* 216, 79–88.
- Hohmann-Porebska M., 2002. Microfabric effects in frozen clays in relation to geotechnical parameters. *Applied Clay Science* 21, 77–87.
- Kozłowski T., Kurpias-Warianek K., 2009. Zastosowanie skaningowej mikroskopii elektronowej SEM do analizy współczynnika filtracji i parametrów opisujących mikrostrukturę gruntów spoistych. XV Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej, Bydgoszcz, 431–438.
- Kujala K., Laurinen K., 1989. Freeze-thaw effects on thaw settlement and pore pressure. Frost in Geotechnical Engineering, Technical Research Centre of Finland.
- Kumor M.K., 1989. Zmiana mikrostruktury ilów monomineralnych i ilu plioceńskiego pod wpływem cyklicznego przemrażania i odmrażania. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz.
- Nagasawa T., Umeda Y., 1985. Effects of freeze-thaw process on soil structure. Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing, Japan II, 219–224.
- PN-81/B-03020 Grunty budowlane. Posadowienia bezpośrednio budowli. Obliczenia statystyczne i projektowanie.
- Sjursen H., Michelsen A., Holmstrup M., 2005. Effects of freeze-thaw cycles on microarthropods and nutrient availability in a sub-Arctic soil. *Applied Soil Ecology* 28, 79–93.
- Skarżyńska K., 1969. Wpływ procesu zamarzania na niektóre właściwości fizykomechaniczne gruntów spoistych. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Rolniczej. Rozprawy 18, Kraków.
- Sulkava P., Huhta V., 2003. Effects of hard frost and freeze-thaw cycles on decomposer communities and N mineralisation in boreal forest soil. *Applied Soil Ecology* 22, 225–239.
- Viklander P., Eigenbrod D., 2000. Stone movements and permeability changes in till caused by freezing and thawing. *Cold Regions Science and Technology* 31, 151–162.
- Yong R.N., Boonsinuk P., 1985. Alteration of soil behavior after cyclic freezing and thawing. In: Ground Freezing. Fourth International Symposium on Ground Freezing, Sapporo.

ANALYSIS OF PORE-SIZE DISTRIBUTION UNDER THE INFLUENCE OF CYCLIC FREEZE-THAW IN SELECTED COHESIVE SOILS

Abstract. The frost action in soils, in cold regions practically impossible to eliminate, and the complex structure of the soil medium determine a complicated nature of the problem. This problem still remains unclear for many reasons. First of all, the results presented in literature are partially incomparable. Such parameters of the experiments as the number of freeze-thaw cycles, the value of negative temperatures, the duration of freezing and thawing in each cycle and, of course, properties of soils used as the material, were different in all cases. Besides, the very important thing is to distinguish between the experiments carried in close and open systems. The latter, allowing the free water to be drawn upward from the water table to the freezing zone, better imitates the natural conditions. There are no evidences to what extent the cyclic freezing and thawing modify the microstructure and the pore-size distribution. This article presents the results of the significance of the impact of cyclic freezing-thawing and freezing the type of system

to changes in the distribution of pores for the selected soils using multivariate analysis of variance. On the basis of quantitative analysis of SEM photographs, the analysis of pore-size distribution in selected representative samples of five unfrozen cohesive soils subjected to one cycle of freezing in the open and closed systems. For comparative purposes, defined by two parameters characterizing the pore distribution curves obtained KDP: inequality of distribution index (β) and similarity index of pore-size distribution curves (ϵ).

Key words: cyclic freezing-thawing, soil microstructure, parameters of microstructure, distribution of pores, inequality of distribution index, index of curves similarity

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 18.04.2011