

## Wpływ struktury na skurczalność gruntów spoistych

Dorota Izdebska-Mucha<sup>1</sup>, Emilia Wójcik<sup>1</sup>



D. Izdebska-Mucha

E. Wójcik

**The influence of soil structure on clay soil shrinkage.** *Prz. Geol.*, 61: 195–202.

*Abstract.* This paper deals with the structural factors affecting shrinkage phenomena. Seventy eight soil samples were tested, including: Neogene (Mio-Pliocene) clays, glacial tills, clayey alluvial soils, bentonite, illitic clay and kaolinite. Destructured soils (remoulded samples) were compared with undisturbed soils (NNS). Analysis of shrinkage curves showed that the most hydrophilic clays and well-graded soils have the lowest void ratio and shrinkage limit. Shrinkage curves of silty and sandy soils are relatively plane with poorly differentiated shrinkage stages. For Neogene clays, shrinkage curves of remoulded samples are similar to the undisturbed ones. Both series of samples yielded similar final void ratio and shrinkage limit values. For alluvial soils and glacial tills, remoulded samples yielded a lower void ratio and higher shrinkage limit values than NNS samples. The results obtained showed that the soil fabric (natural preserved versus disturbed) does not influence shrinkage of Neogene clays while affects significantly shrinkage of alluvial soils and glacial tills. The statistical analysis revealed that there was no correlation between shrinkage limit and clay content or plastic index. A linear relationship was found between shrinkage limit and void ratio for clays as well as remoulded samples.

**Keywords:** shrinkage curve, shrinkage limit, clay soil, soil structure, void ratio



Granice konsystencji znajdują bardzo szerokie zastosowanie w geologii inżynierskiej. Służą do opisu i klasyfikacji gruntów, jak również stanowią podstawę wstępnej oceny mechanicznych

właściwości gruntu. Niezbędne są zatem identyfikacja i zrozumienie czynników oraz mechanizmów, które determinują wartości granic konsystencji (Mitchell, 1993).

Podstawowym parametrem charakteryzującym skurczalność gruntu jest granica skurczalności. Badanie skurczalności rzadko jest wykonywane na potrzeby praktyki, a spośród trzech granic Atterberga granica skurczalności jest traktowana wręcz marginalnie w badaniach geologiczno-inżynierskich. Jedynie w rozważaniach dotyczących gruntów ekspansywnych skurczalność nabiera szczególnego znaczenia. Z inżynierskiego punktu widzenia osiadanie podłoża fundamentowego w fazie skurczu następującej po fazie pęcznienia jest największym zagrożeniem dla konstrukcji. Skurcz powoduje postkonsolidacyjne osiadanie podłoża ekspansywnego, które w polskich warunkach geotechnicznych jest zasadniczą przyczyną niemal wszystkich uszkodzeń i awarii budynków (Kumor, 2006).

W artykule opisano wyniki badań granicy skurczalności typowych gruntów spoistych z różnych rejonów Polski. Analizę wpływu struktury na skurczalność gruntu przedstawiono w dwojakim rozumieniu. Z jednej strony, w myśl klasycznej gruntoznawczej definicji, pojęcie struktury obejmuje skład gruntu, febric (ang. *fabric*; wzajemny układ i rozmieszczenie cząstek stałych) oraz siły działające między cząstkami gruntowymi (Mitchell, 1993; Grabowska-Olszewska, 1998). W odniesieniu do tej definicji w pracy przeanalizowano wpływ składu granulometrycznego i mineralnego oraz wskaźnika porowatości na przebieg skurczu i uzyskane wartości granicy skurczalności. Z drugiej strony przedstawiono porównawcze wyniki badań granicy skurczalności próbek o nienaruszonej strukturze i past grunto-

wych. W tym kontekście pojęcie „struktura” służy do rozróżnienia gruntu o naturalnej/nienaruszonej strukturze oraz pasty, czyli gruntu przerobionego, o zniszczonej naturalnej strukturze (ang. *destructured*).

### TEORETYCZNE PODSTAWY PROCESU SKURCZU

Według badań Sridharana i Venkatappa Rao (1971) inicjalizacja procesu skurczu następuje na skutek działania ciśnień kapilarnych wywołanych parowaniem wody z gruntu. W miarę ewaporacji promień menisków wody w porach, w których zachodzi kontakt powietrze–woda, zmniejsza się. Meniski cofają się w głąb masy gruntowej, dopóki naprężenia rozciągające nie zostaną zrównoważone wytrzymałością gruntu na rozciąganie na poziomie mikrostrukturalnym. W tym momencie grunt osiąga granicę skurczalności.

W gruntach początkowo całkowicie nasyconych procesem skurczu rządzi równanie naprężeń efektywnych (Sridharan & Venkatappa Rao, 1971):

$$\bar{c} = \sigma_{TS} - R + A$$

gdzie:

$\bar{c}$  – naprężenia efektywne na kontakcie między cząstkami gruntowymi,

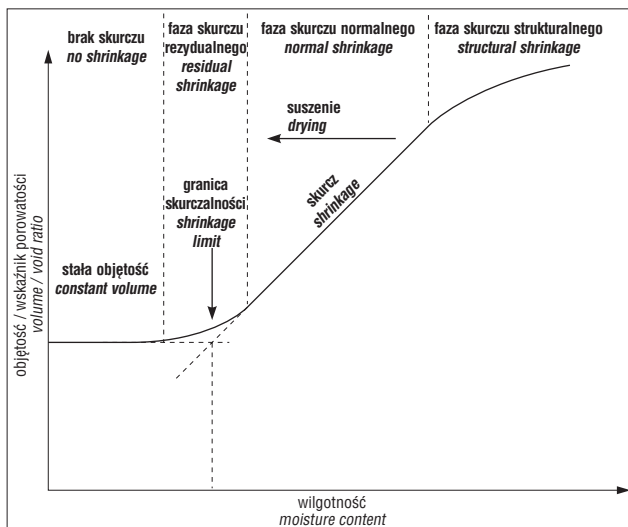
$\sigma_{TS}$  – siły napięcia powierzchniowego wody kapilarnej,

$R$  – siły odpychania elektrycznego między cząstkami gruntowymi,

$A$  – siły przyciągania elektrycznego między cząstkami gruntowymi.

Parametr  $\bar{c}$  wyraża wytrzymałość gruntu na rozciąganie, a tym samym opór stawiany zmianom objętościowym. Rośnie wraz ze wzrostem sił przyciągania i ze spadkiem sił odpychania między cząsteczkami. W miarę jak zachodzi proces skurczu, wytrzymałość gruntu na naprężenia rozciągające rośnie ze względu na coraz bliższe kontakty między cząsteczkami. Rosną również siły kapilarne,

<sup>1</sup>Institut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; dim@uw.edu.pl, wojcike@uw.edu.pl.



Ryc. 1. Krzywa skurczalności gruntu (Head, 1992) uzupełniona o fazy skurczu za Sridharanem i Venkatappą Rao (1971)

Fig. 1. Shrinkage curve (Head, 1992). Shrinkage stages added after Sridharan and Venkatappa Rao (1971)

ponieważ maleje promień krzywizny menisków. Zgodnie z powyższym równaniem proces skurczu zachodzi tak długo, jak długo naprężenia kapilarne są większe od całkowitego wewnętrznego oporu gruntu na rozciąganie, i kończy się, kiedy siły te są równe.

W procesie wysychania gruntu od stanu płynnego do zwartego można zaobserwować cztery fazy skurczu (ryc. 1). W pierwszym etapie ubytek wilgoci jest większy niż spadek objętości gruntu. Jest to faza skurczu strukturalnego, podczas której następuje usunięcie wody z dużych stabilnych porów międzyagregatowych. W drugim etapie, zwanym fazą skurczu normalnego, zmiany wilgotności i objętości gruntu są do siebie proporcjonalne. Trzecią fazę, tzw. skurcz rezydualny, charakteryzuje ponownie niższy ubytek objętości gruntu w stosunku do ubytku wody. Na tym etapie dochodzi do kontaktu cząstek, do porów dostaje się powietrze, a grunt osiąga granicę skurczalności. Ostatnia faza, reprezentowana na rycinie 1 przez linię poziomą, to brak skurczu, gdy wszystkie cząstki kontaktują się ze sobą i nie następują dalsze zmiany objętości pomimo utraty wilgoci, a jedynie grunt zmienia barwę na jaśniejszą, co jest spowodowane wejściem powietrza do porów (Sridharan & Venkatappa Rao, 1971).

Groenevelt i Grant (2004) badali przebieg zmian objętości gruntu w fazie skurczu rezydualnego, czyli od momentu wejścia powietrza do porów. Autorzy wykazali, że w pewnych gruntach skurcz może przebiegać dwuetapowo i w fazie skurczu rezydualnego może nastąpić dodatkowy (wtórny) skurcz (ang. *secondary shrinkage*), który na krzywej skurczu zaznacza się w postaci garbu (np. krzywa skurczu ilu na ryc. 2). W wyniku tego zjawiska grunt osiąga niższą granicę skurczalności. W standardowej interpretacji krzywej skurczu efekt ten nie jest uwzględniany.

Na podstawie krzywej skurczalności można prognozować zmiany objętości gruntu. Metodę szacowania pęcznienia nieobciążonego gruntu na podstawie zależności wilgotności i wskaźnika porowatości zaproponowali Miller i in. (1995). Wskaźnik CLOD ( $C_w$ ) – parametr charakterystyczny dla każdego rodzaju gruntu – jest powszechnie stosowany w praktyce geotechnicznej. Wyraża on nachy-

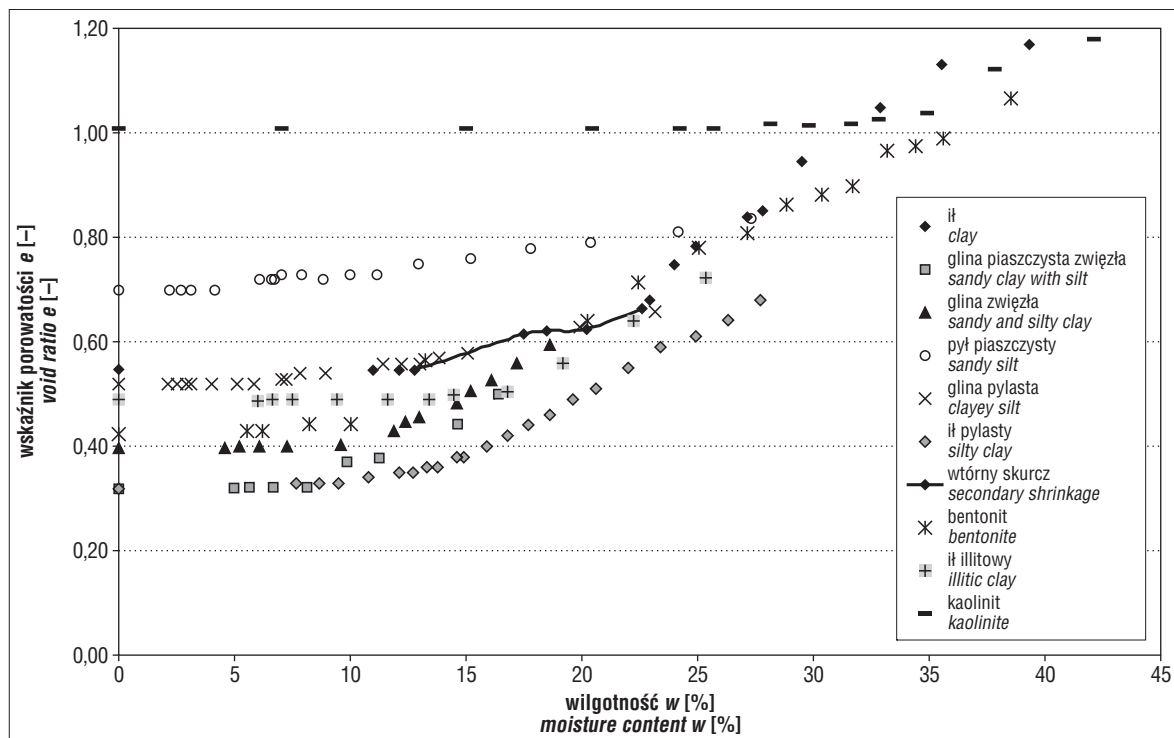
lenie do poziomu prostoliniowego odcinka krzywej skurczu odpowiadającego fazie skurczu normalnego, w której zmiany wilgotności i objętości gruntu są do siebie proporcjonalne.

## GRUNTY TESTOWE I ZASTOSOWANE METODY BADAWCZE

Badania granicy skurczalności wykonano dla typów gruntów o zróżnicowanej spoistości, a także o różnej genezie. Analizę przeprowadzono dla neogeńskich (mio-pliocen-skich) ilów serii poznańskiej, glin lodowcowych oraz mał, które powszechnie występują na terenie Polski i stanowią podłoże budowlane wielu obiektów. Badane grunty pochodzą głównie z terenu Warszawy, gdzie w związku z prowadzeniem różnych inwestycji budowlanych, a także prac naukowych istniała możliwość pobrania próbek. Ponadto badaniami objęto grunty spoiste z rejonów Mszczonowa oraz Płocka. W celu poznania i lepszego zrozumienia czynników wpływających na zachowanie się gruntów w procesie skurczu badania granicy skurczalności wykonano również dla ilów monomineralnych: bentonitu z Wyoming (Na-montmorillonit), ilu illitowego z Bukowej Góry i kaolinu z Sedlec.

Badania granicy skurczalności ( $w_s$ ) przeprowadzono metodą eksperymentalną według brytyjskiej normy (British Standard 1377:1990) na 78 próbkach gruntu. Szczegółowy opis metodyki badań granicy skurczalności zamieszczono w pracy Izdebskiej-Muchy (2003). Z uwagi na szkodliwość rtęci oraz restrykcyjne wymagania BHP w odniesieniu do stanowiska pracy z rtęcią, w laboratorium Zakładu Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego do pomiarów gęstości i objętości wykorzystuje się obecnie piknometr quasi-cieczowy Geopyc 1360 firmy Micromeritics. Pomiar objętości w piknometrze quasi-cieczowym wykonuje się w środowisku preparatu DryFlo (tzw. suchej cieczy), składającego się z drobnych szklanych kuleczek o różnej wielkości z dodatkiem grafitowego lubrykanta. Dzięki temu preparat wykazuje dużą „płynność”, dokładnie dopasowuje się i otacza powierzchnię próbki, nie wchodząc w pory o średnicy poniżej 25  $\mu\text{m}$ . Jest to badanie nieniszczące próbki, którą można dzięki temu poddać wielokrotnym pomiarom w procesie suszenia.

Dodatkowo program badań obejmował też oznaczenia porównawcze na gruntach naturalnych (NNS) i na pastach gruntowych, które przeprowadzono dla 14 próbek. W analizie uwzględniono zatem różną strukturę gruntu. Struktura w gruncie naturalnym jest wynikiem fizycznych i chemicznych warunków, jakie panowały w trakcie sedymentacji, konsolidacji, późniejszego starzenia oraz odprężenia. Struktura jest źródłem informacji o historii gruntu. Obejmuje wszystkie cechy gruntu, które powodują, że ma on inne właściwości mechaniczne niż wykonana z niego pasta gruntowa, czyli modelowy materiał pozbawiony cech będących wynikiem historii geologicznej. W praktyce badań naukowych jest znane podejście polegające na analizie parametrów gruntów naturalnych i porównanie ich z parametrami past gruntowych. Ma ono na celu rozdzielenie tej części własności gruntu, za którą jest odpowiedzialny sam materiał w znaczeniu kompozycji mineralogiczno-granulometrycznej (własności inherentne, inaczej wrodzone), od tej będącej wynikiem szeroko pojętej historii gruntu i nabytym przez to wzmocnieniem strukturalnym (Burland, 1990).



Ryc. 2. Krzywe skurczalności różnych typów gruntów spoistych

Fig. 2. Shrinkage curves for various types of clay soils

Tab. 1. Skład granulometryczny i wartości granicy skurczalności gruntów spoistych przedstawionych na rycinie 2

Table 1. Particle size distribution and shrinkage limit of soils presented in Figure 2

Nazwa gruntu(symbol) Soil type (symbol)	Zawartość frakcji żwirowej Gravel content $f_z$ [%]	Zawartość frakcji piaskowej Sand content $f_p$ [%]	Zawartość frakcji pyłowej Silt content $f_\pi$ [%]	Zawartość frakcji ilowej Clay content $f_i$ [%]	Granica skurczalności Shrinkage limit $w_s$ [%]
Il (I) Clay (I)	0	1	14	85	17,0
Glina piaszczysta zwięzła ( $G_{pz}$ ) Sandy clay with silt ( $G_{pz}$ )	1	52	23	25	7,7
Glina zwięzła ( $G_z$ ) Sandy and silty clay ( $G_z$ )	0	40	35	25	10,6
Pył piaszczysty ( $\Pi_p$ ) Sandy silt ( $\Pi_p$ )	0	45	46	9	6,8
Glina pylasta ( $G_\pi$ ) Clayey silt ( $G_\pi$ )	0	9	78	13	8,5
Il pylasty ( $I_\pi$ ) Silty clay ( $I_\pi$ )	0	13	57	30	12,1
Bentonit (I) Bentonite (I)	0	0	0	100	8,5
Il illitowy (I) Illitic clay (I)	0	6	34	60	16,5
Kaolinit (I) Kaolinite (I)	0	0	32	68	33

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Na rycinie 2 przedstawiono krzywe skurczalności sześciu naturalnych gruntów spoistych o zróżnicowanym składzie granulometrycznym: iltu, gliny piaszczystej zwięzłej, gliny zwięzłej, pyłu piaszczystego, gliny pylastej i iltu pylastego, oraz trzech iltów monomineralnych: bentonitu (Na-montmorillonitu), iltu illitowego i kaolinitu. Charakterystykę uziarnienia wszystkich gruntów podano w tabeli 1. Porównanie krzywych pozwala zaobserwować wiele prawidłowości

w przebiegu skurczu i w osiąganych wartościach granicy skurczalności w odniesieniu do składu mineralnego i granulometrycznego gruntu:

1. Grunty pylaste i piaszczyste o niskiej zawartości frakcji ilowej, takie jak pył piaszczysty i glina pylasta, charakteryzują się płaskim przebiegiem krzywej skurczu. Granice między poszczególnymi fazami skurczu są niewyraźne i trudno jest wyznaczyć granicę skurczalności.

2. Z porównania krzywych bentonitu, iltu illitowego i kaolinitu wyraźnie wynika, że im bardziej hydrofilny

minerał, tym dłuższa jest faza skurczu normalnego, a krótsza faza braku skurczu, jak również że grunt osiąga niższe wartości wskaźnika porowatości oraz granicy skurczalności. Podobny do bentonitu przebieg skurczu wykazała próbka iltu charakteryzującego się wysoką zawartością frakcji iltowej (85%) i przewagą beidellitu w składzie mineralnym.

3. Grunty różnoziarniste, charakteryzujące się stosunkowo zbliżoną zawartością frakcji piaskowej, pyłowej i iltowej (np. glina piaszczysta zwięzła, glina zwięzła, ilt pylasty), osiągają niższe wartości wskaźnika porowatości i granicy skurczalności niż grunty o bardziej jednorodnym uziarnieniu (np. ilt, ilt monomineralny). Sridharan i Prakash (1998) stwierdzili, że zasadniczą rolę w kształtowaniu zakresu zmian objętości odgrywa różnorodność uziarnienia. Autorzy wykazali, że niższe wartości wskaźnika porowatości uzyskują grunty o zróżnicowanym składzie granulometrycznym, sprzyjającym optymalnemu upakowaniu ziarn i cząstek. W gruntach drobnoziarnistych podczas procesu skurczu następuje wypełnianie większych porów drobniejszą frakcją, co daje maksymalne zagęszczenie gruntu.

Na rycinach 3 i 4 przedstawiono wyniki badań porównawczych próbek NNS i past gruntowych. Aby zachować czytelność danych, na rycinie 3 zamieszczono po jednym przykładzie krzywych skurczu dla każdego z analizowanych typów genetycznych gruntu: glin lodowcowych, mad oraz iltów neogeńskich. Przedstawione krzywe są reprezentatywne dla całego zbioru danych uzyskanego dla danego typu gruntu. Analiza porównawcza par krzywych (pasta i próbka NNS) pozwala wyciągnąć pewne wnioski:

1. Krzywe skurczu próbek NNS i past dla mad oraz glin lodowcowych mają wyraźnie różny przebieg – w przypadku past nachylenie krzywych w fazie skurczu normalnego jest zdecydowanie większe niż w przypadku próbek NNS. Grunt o naruszonej strukturze osiąga niższy wskaźnik porowatości. Według Zahna i in. (2007) większe nachylenie krzywych odpowiadających pastom wynika z faktu, że charakteryzują się one niższą gęstością objętościową szkieletu gruntowego niż próbki naturalne, przez co wykazują niższą wytrzymałość na skurcz. Struktura gruntu przerobionego jest bardziej jednolita, a przez to mniej podatna na powstawanie spękań w procesie wysychania. Ostateczna wartość wskaźnika porowatości past jest zatem niższa niż w próbkach naturalnych, bardziej podatnych na powstawanie spękań w trakcie suszenia.

2. Krzywe skurczu próbek NNS i past dla iltów neogeńskich mają bardzo zbliżony przebieg. Obie serie próbek osiągają podobną wartość wskaźnika porowatości. Nachylenie krzywych w fazie skurczu normalnego jest stosunkowo podobne, choć również nieco większe dla past.

Na rycinie 4 zestawiono wartości granicy skurczalności past i próbek NNS. Stwierdzono, że w zbiorze glin lodowcowych oraz mad wartości  $w_s$  past są na ogół wyższe niż próbek NNS, zbyt mała liczba przeanalizowanych próbek nie pozwala jednak na statystycznie istotne ilościowe oszacowanie różnic. Natomiast w zbiorze iltów neogeńskich wartości  $w_s$  dla obu serii są zbliżone. Ponadto można zaobserwować największy rozrzut różnic wartości  $w_s$  dla mad, a najmniejszy dla iltów. Mady, z uwagi na ich genezę, są typem gruntów na ogół o warstwowanej, niejednorodnej w makroskali strukturze. Zróżnicowanie i anizotropia struktury próbek NNS mad może być przyczyną anizotro-

pii skurczu i w konsekwencji zaobserwowanego rozrzutu wartości.

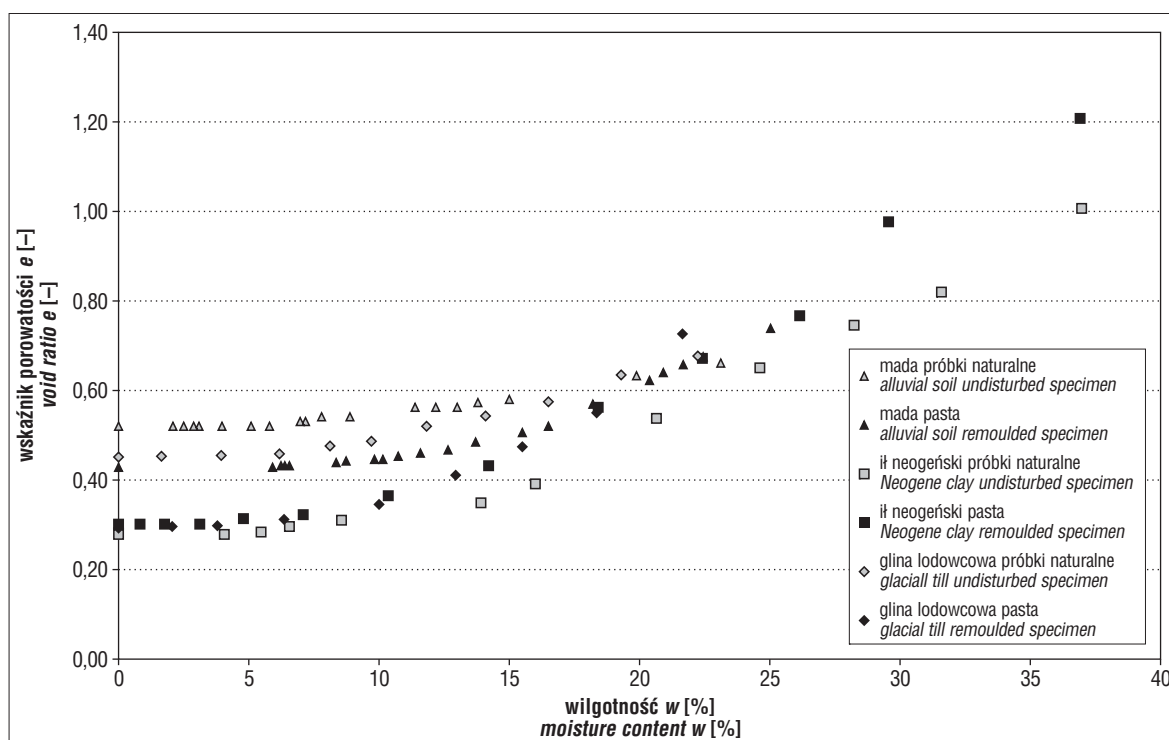
Uzyskane wyniki nasuwają wniosek, że w przypadku iltów neogeńskich zniszczenie naturalnej struktury gruntu nie wpływa w istotny sposób na jego skurczalność, ponieważ przebieg krzywych skurczu oraz wartości wskaźnika porowatości i granicy skurczalności past i próbek o nienaruszonej strukturze są zbliżone. Sugeruje to, że badania skurczu iltów neogeńskich prowadzone na próbkach o naruszonej strukturze są miarodajne i można odnosić je do warunków naturalnych panujących w podłożu gruntowym. Natomiast w przypadku mad i glin lodowcowych wiarygodne badania granicy skurczalności powinny być każdorazowo prowadzone na reprezentatywnych próbkach o nienaruszonej strukturze.

W praktyce geologiczno-inżynierskiej dąży się do znalezienia zależności empirycznych między parametrami gruntu, które pozwoliłyby na szybkie oszacowanie szukanego parametru na podstawie innych indeksowych właściwości gruntu. W pracy przeanalizowano zależności funkcyjne między wartością granicy skurczalności a parametrami wyrażającymi strukturalne cechy gruntu, kształtujące proces jego skurczu.

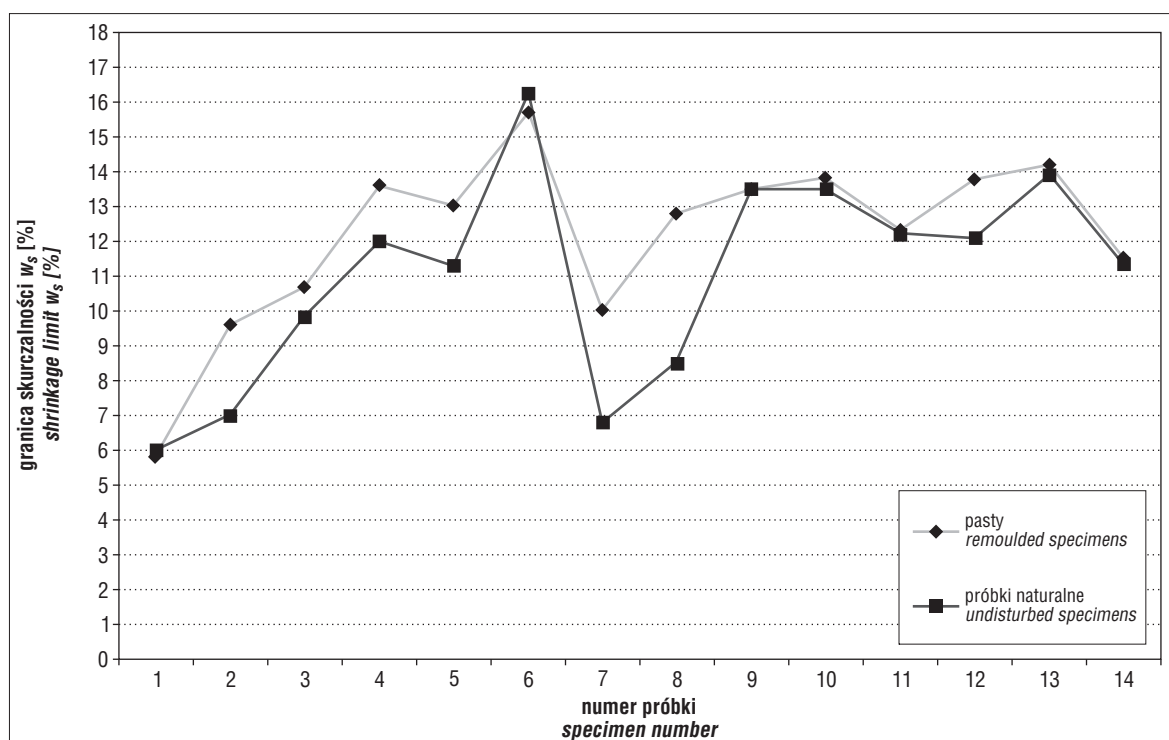
Parametrami wyrażającymi skład granulometryczny i mineralny gruntu są bez wątpienia zawartość frakcji iltowej i wskaźnik plastyczności. Jednak, jak dowiodły badania, parametry te nie wykazują statystycznie istotnej korelacji z wartością granicy skurczalności (ryc. 5), co zostało opisane wcześniej przez Sridharana i Prakasha (1998) i co potwierdzają również wcześniejsze badania autorek (Izdebska-Mucha & Wójcik, 2011). Z jednej strony może wynikać to ze złożoności czynników, które, działając symultanicznie, determinują proces skurczu. Z drugiej strony być może wskazuje to na konieczność znalezienia parametrów, które trafniej odzwierciedlą wpływ uziarnienia i składu mineralnego na skurcz gruntu. Zawartość frakcji iltowej oraz wskaźnik plastyczności nie mogą zatem być wykorzystane do oszacowania wartości granicy skurczalności gruntu drogą prostej jednoczynnikowej korelacji.

Parametrem geologiczno-inżynierskim charakteryzującym składową febricę struktury gruntu jest wskaźnik porowatości. Na podstawie wyników badań granicy skurczalności i wyliczeń wskaźnika porowatości opracowano zależność dla wszystkich przebadanych próbek. Wyniki wskazują na brak związku liniowego między granicą skurczalności i wskaźnikiem porowatości (ryc. 6). Dalsza analiza zbioru danych dowodzi istotnej zależności obu parametrów w podzbiorze past (ryc. 7). Współczynnik korelacji  $R$  dla tej grupy wynosi 0,78. Niskie wartości współczynnika korelacji odpowiadającego zbiorowi próbek NNS wskazują, że istnieje dodatkowy, poza mineralogiczno-granulometrycznym, czynnik kształtujący wartość granicy skurczalności wyrażony strukturą. Ponieważ badane grunty są zróżnicowane zarówno pod względem granulometrycznym, jak i genetycznym i charakteryzują się odmienną historią geologiczną, podjęto próbę przeanalizowania powyższego zbioru danych w podziale na typy genetyczne. Na rycinie 8 przedstawiono zależność pomiędzy wskaźnikami porowatości a granicą skurczalności w grupie iltów neogeńskich, glin lodowcowych i mad. Na podstawie analizy stwierdzono, że najwyższy współczynnik korelacji  $R$ , wynoszący 0,75, ma grupa iltów. Dla zbioru glin współczynnik ten wynosi 0,58, zaś w zbiorze mad nie stwierdza się zależności między rozpa-





Ryc. 3. Krzywe skurczalności próbek o naruszonej (past) i nienaruszonej strukturze  
 Fig. 3. Shrinkage curves for remoulded and undisturbed specimens



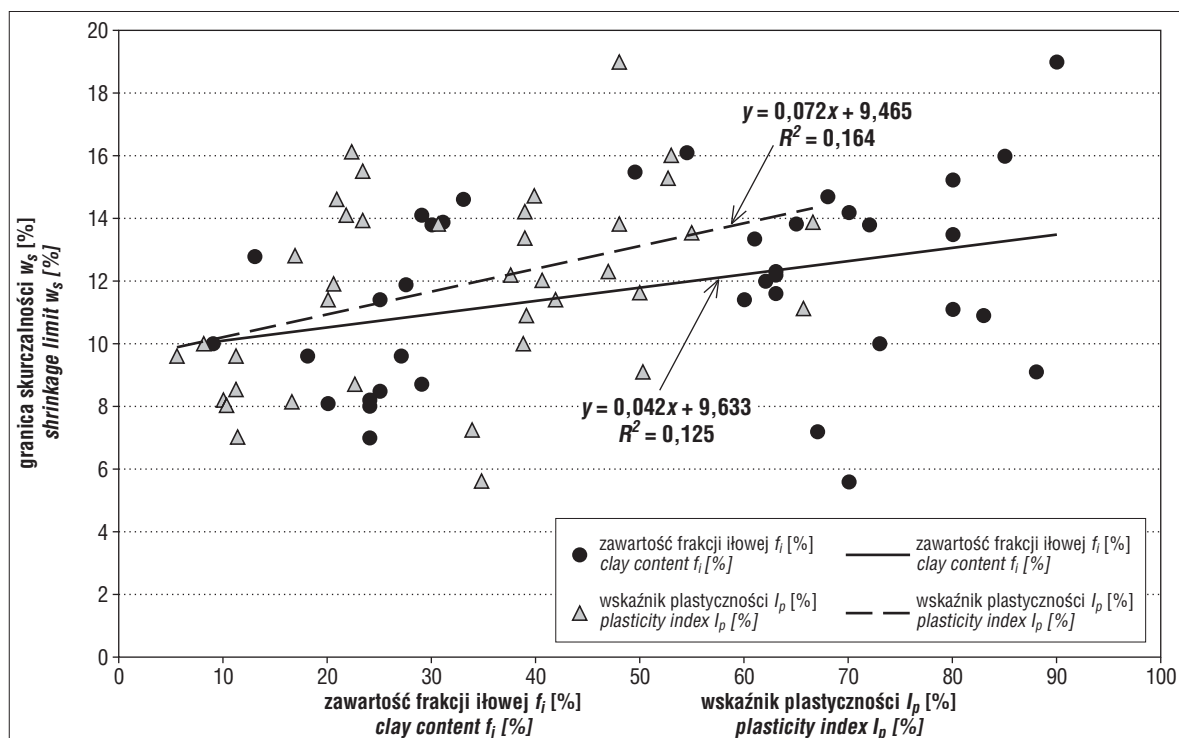
Ryc. 4. Porównanie wartości granicy skurczalności ( $w_s$ ) próbek naturalnych i próbek o naruszonej strukturze (past)  
 Fig. 4. Comparison of shrinkage limit ( $w_s$ ) for undisturbed and remoulded specimens

trywanymi parametrami. Potwierdza to wniosek, że w przypadku iłw neogeńskich wartości wskaźnika porowatości i granicy skurczalności zarówno past, jak i próbek o nienaruszonej strukturze są zbliżone. W zbiorze glin lodowcowych korelacja jest słabsza, ponieważ istnieją różnice w wartościach wskaźnika porowatości uzyskanego dla różnych jakościowo próbek. W zbiorze mad przyczyny braku

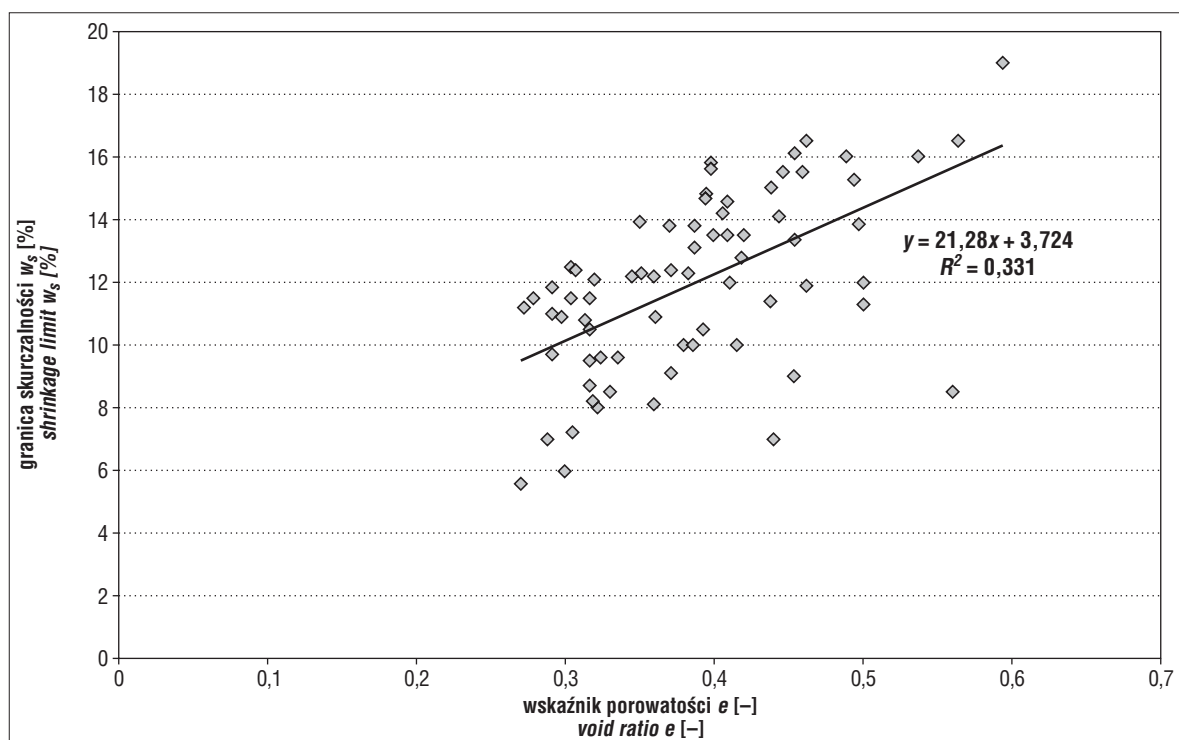
korelacji można upatrywać w anizotropii struktury tych stosunkowo młodych, nieskonsolidowanych osadów.

#### PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule zaprezentowano wyniki badań skurczalności iłw neogeńskich, glin lodowcowych, mad oraz iłw



Ryc. 5. Zależność granicy skurczalności ( $w_s$ ) od zawartości frakcji ilowej ( $f_i$ ) i wskaźnika plastyczności ( $I_p$ )  
 Fig. 5. Variation of shrinkage limit ( $w_s$ ) and clay content ( $f_i$ )/plasticity index ( $I_p$ )

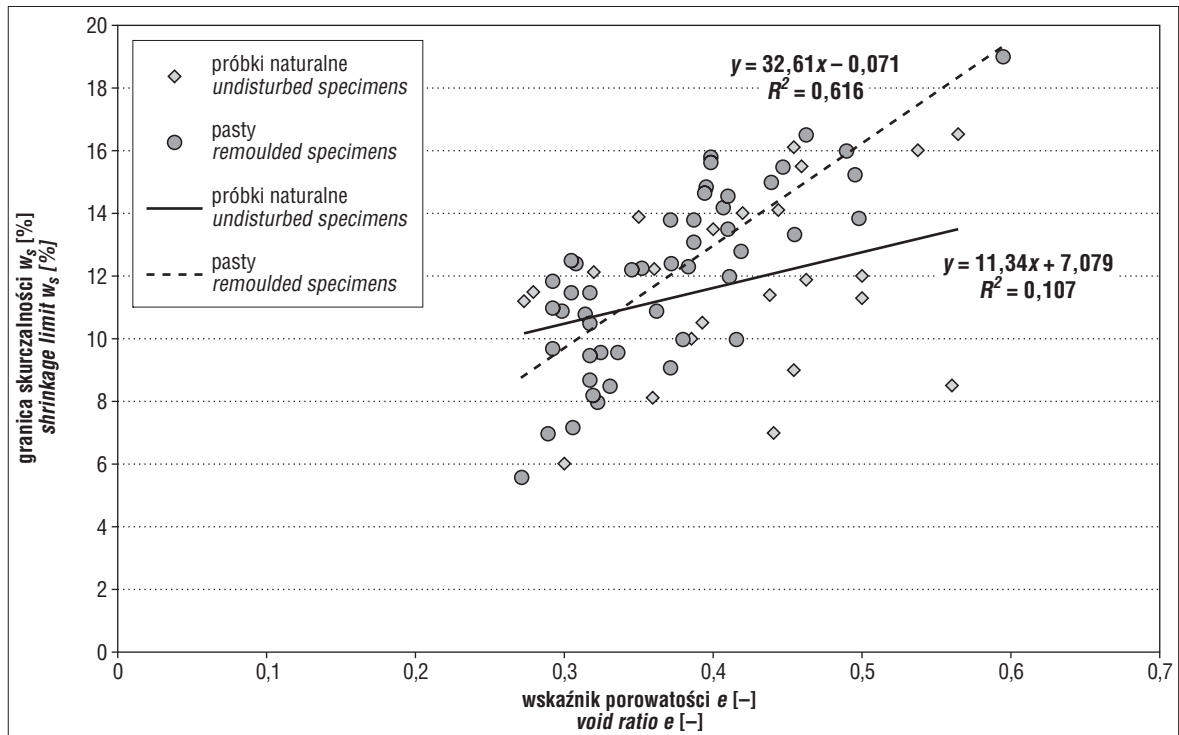


Ryc. 6. Zależność granicy skurczalności ( $w_s$ ) od wskaźnika porowatości ( $e$ )  
 Fig. 6. Variation of shrinkage limit ( $w_s$ ) and void ratio ( $e$ )

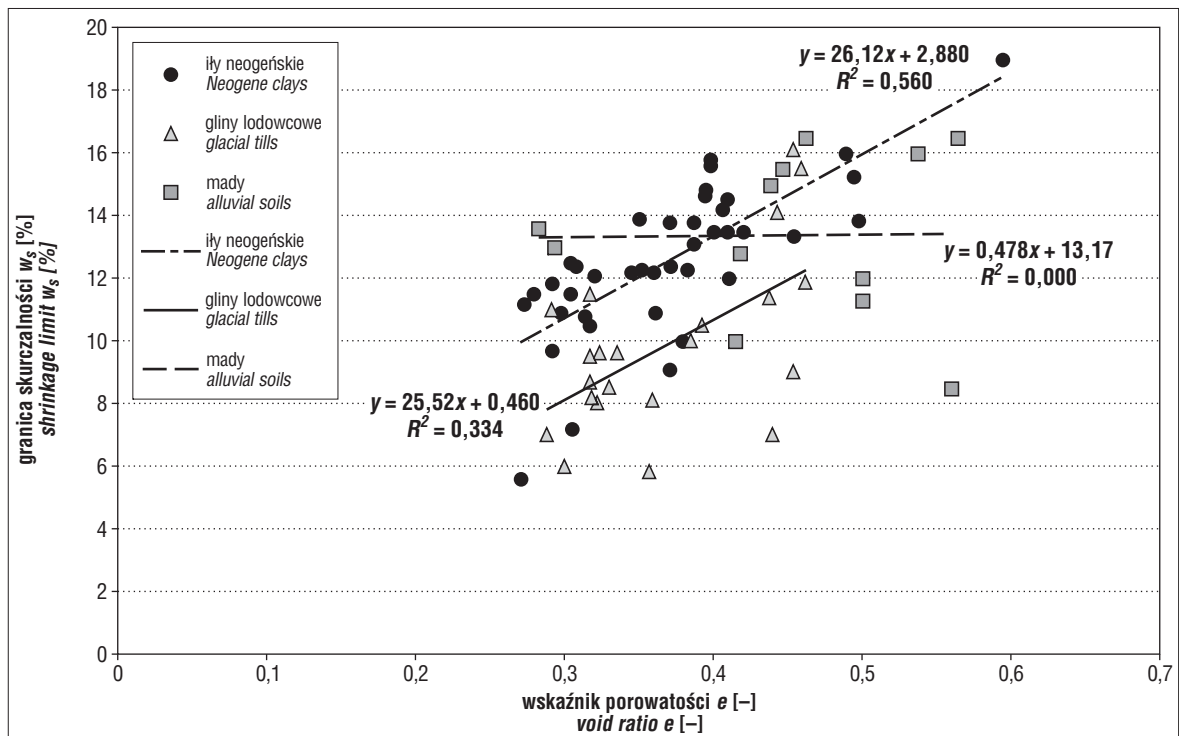
monomineralnych – bentonitu, iltu illitowego i kaolinitu. Dobór materiału badawczego pozwolił na przeprowadzenie analizy wpływu składu granulometrycznego i mineralnego na przebieg skurczu oraz na analizę korelacji zawartości frakcji ilowej, wskaźnika plastyczności i wskaźnika porowatości z wartością granicy skurczalności. Ponadto w pracy przedstawiono porównawcze badania granicy

skurczalności próbek o nienaruszonej strukturze i past gruntowych.

Analiza krzywych skurczu różnych typów gruntów spoistych pozwoliła stwierdzić, że grunty piaszczyste i pyłaste charakteryzują się płaskim kształtem krzywej skurczu, co stwarza trudności interpretacyjne przy wyznaczaniu faz skurczu i granicy skurczalności. Grunty różnoziarniste



Ryc. 7. Zależność granicy skurczalności ( $w_s$ ) od wskaźnika porowatości ( $e$ ) dla próbek NNS i past  
 Fig. 7. Variation of shrinkage limit ( $w_s$ ) and void ratio ( $e$ ) for undisturbed (NNS) and remoulded specimens



Ryc. 8. Zależność granicy skurczalności ( $w_s$ ) od wskaźnika porowatości ( $e$ ) dla różnych typów genetycznych gruntów spoistych  
 Fig. 8. Correlation between shrinkage limit ( $w_s$ ) and void ratio ( $e$ ) for various genetic types of clay soils

osiągają niższe wartości wskaźnika porowatości i granicy skurczalności niż grunty o jednorodnym uziarnieniu. Z porównania krzywych ilów monomineralnych wynika, że im bardziej hydrofilny minerał, tym dłuższa jest faza skurczu normalnego, a krótsza faza braku skurczu, oraz że

grunt osiąga niższe wartości wskaźnika porowatości i granicy skurczalności.

Badania porównawcze gruntów o naruszonej i nienaruszonej strukturze pozwoliły zaobserwować, że w przypadku mąd i glin lodowcowych wartości granicy skurczalności

są wyższe dla past niż dla próbek NNS. Natomiast w zbiorze iłów neogeńskich obie serie próbek osiągają podobną wartość granicy skurczalności. Sugeruje to, że badania skurczu iłów neogeńskich prowadzone na pastach gruntowych można odnosić do warunków naturalnych w podłożu gruntowym, natomiast w przypadku mad i glin lodowcowych badania powinny być prowadzone na próbkach NNS.

Stwierdzono brak statystycznie istotnej korelacji granicy skurczalności z zawartością frakcji iłowej i ze wskaźnikiem plastyczności, a zatem parametry te nie mogą służyć do jednoczynnikowej predykcji granicy skurczalności gruntu.

Analiza zależności granicy skurczalności od wskaźnika porowatości wykazała, że istnieje bardzo wysoka korelacja między tymi parametrami zarówno w zbiorze próbek o naruszonej strukturze (past), jak i w zbiorze iłów neogeńskich. Niska wartość współczynnika korelacji dla próbek NNS oraz dla zbioru mad i glin lodowcowych ponownie wskazuje na istotny wpływ naturalnej struktury gruntu na proces skurczu tych typów gruntu.

Z uwagi na ilość przebadanych próbek praca stanowi stosunkowo dobrze udokumentowane studium w zakresie badań skurczu iłów neogeńskich, natomiast planowane są dokładniejsze badania glin lodowcowych, jak również mad w celu weryfikacji postawionych hipotez.

#### LITERATURA

BURLAND J.B. 1990 – On the compressibility and shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40: 329–378.

- British Standard** 1377:1990 – Part 2. Methods of testing soils for civil engineering purposes. British Standards Institution, London.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. (red.) 1998 – *Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych*. PWN, Warszawa.
- GROENEVELT P.H. & GRANT C.D. 2004 – Analysis of soil shrinkage data. *Soil Till. Res.*, 79: 71–77.
- HEAD K.H. 1992 – *Manual of soil laboratory testing*. T. 1. Soil classification and compaction tests. Pentech Press, London, s. 388.
- IZDEBSKA-MUCHA D. 2003 – Polska a brytyjska metodyka badań skurczalności gruntów spoistych. [W:] *Materiały konferencyjne. 45 lat geotechniki w Łodzi. Geotechnika w polskim budownictwie. Łódź–Arturówek, 24–25 kwietnia 2003 r.* Kat. Geotech. Budow. Inż. Politech. Łódzkiej, Łódź: 63–78.
- IZDEBSKA-MUCHA D. & WÓJCIK E. 2011 – Analiza parametrów skurczalności gruntów spoistych według różnych norm. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 321–328.
- KUMOR M.K. 2006 – Badanie fazy skurcz–pęcznienie iltu jako możliwość przewidywania przemieszczeń podłoża ekspansywnego. *Zesz. Nauk. Politech. Białostoc., Budownictwo*, 28: 179–189.
- MILLER D.J., DURKEE D.B., CHAO K.C. & NELSON J.D. 1995 – Simplified heave prediction for expansive soils. [W:] *Alonso E.E. & Delage P. (red.) Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*. Paris, France, September 1995. Balkema, Rotterdam: 891–898.
- MITCHELL J.K. 1993 – *Fundamentals of soil behavior*. Wiley, New York, s. 436.
- SRIDHARAN A. & PRAKASH K. 1998 – Mechanism controlling the shrinkage limit of soils. *Geotech. Test. J.*, 21: 240–250.
- SRIDHARAN A. & VENKATAPPA RAO G. 1971 – Effective stress theory of shrinkage phenomena. *Can. Geotech. J.*, 8: 503–513.
- ZAHN L., CHEN P. & NG C.W.W. 2007 – Effect of suction change on water content and total volume of an expansive clay. *J. Zhejiang Univ., Sci. A*, 8: 699–706.

Praca wpłynęła do redakcji 29.06.2011 r.

Po recenzji akceptowano do druku 17.10.2012 r.