

## **Ewaluacja i porównanie badań granicy skurczalności i plastyczności z wykorzystaniem metod statystycznych**

**Dr Dorota Izdebska-Mucha, dr Emilia Wójcik  
Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii**

Najważniejszą cechą odróżniającą grunty ekspansywne od innych gruntów jest ich specyficzna reakcja na działanie wody i przesuszanie, wyrażona zdolnością do zmian objętości pod wpływem wahań wilgotności oraz wrażliwość na działanie temperatur. Pęcznienie i skurcz gruntów ilastych jest poważnym problemem inżynierskim, choć mechanizmy regulujące te procesy są całkowicie różne [4, 25]. Kumor [15, 16, 17, 18] dowodzi, że właściwości ekspansywne podłoża budowlanego wymagają odpowiednich rozwiązań posadowienia i usztywnień konstrukcji. Jeż [12], Jeż J, Jeż T. [13, 14] zwracają uwagę, że ekspansywność jest nie samą cechą materiałową gruntu, ale zjawiskiem wynikającym z zaistnienia różnorodnych czynników w środowisku gruntowym podatnym na zjawisko ekspansji.

Do oceny ekspansywnych właściwości gruntów zaproponowano wiele metod bezpośrednich i pośrednich opartych na

parametrach fizycznych i mechanicznych. W klasyfikacjach jakościowych gruntów spoistych, po wprowadzeniu do praktyki inżynierskiej granic Atteberga, wykorzystuje się między innymi granicę płynności i granicę skurczalności. Klasyfikacje gruntów ekspansywnych szczegółowo omawia Niedzielski [20], Sridharan, Prakash [25]. Ponadto, parametry te są stosowane przy ocenie gruntów do budowy mineralnych barier izolacyjnych [7, 28].

Przedmiotem niniejszej pracy jest wielostronna analiza porównawcza i ocena metod badań granicy skurczalności oraz granicy płynności. Są to wskaźnikowe parametry materiałowe gruntów, standardowo wyznaczane w badaniach geotechnicznych podłoża gruntowego i powszechnie stosowane w klasyfikacjach gruntów ekspansywnych. W pracy wykorzystano wyniki badań prowadzonych przez autorki na przestrzeni kilku ostatnich lat. Badane grunty obejmują szeroki zakres zarówno

granulometryczny, od gruntów mało do bardzo spoistych, jak i genetyczny: ropy mio-plioceniczne, gliny lodowcowe, mady, ropy monomineralne (kaolinit z Sedlec, montmorillonit z Wyoming, illit z Bukowej Góry).

## GRANICA SKURCZALNOŚCI

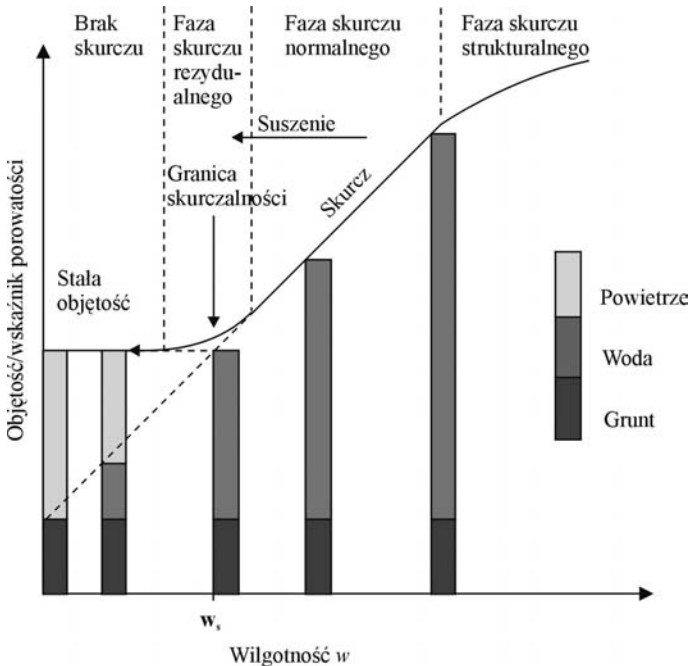
### Metodyka badań

Analizie poddano wyniki badań granicy skurczalności  $w_s$  przeprowadzonych metodami eksperymentalnymi oraz obliczeniowymi według wzorów korelacyjnych.

Badania laboratoryjne wykonano trzema metodami:

- wg Polskiej Normy PN-88/B-04481,
- wg Brytyjskiej Normy BS1377: Part2: 1990: 6.3
- metodą bryłową (ang. „*CLOD*” test method) opracowaną przez Hamberga w 1985, opisaną przez Garbulewskiego [5, 6].

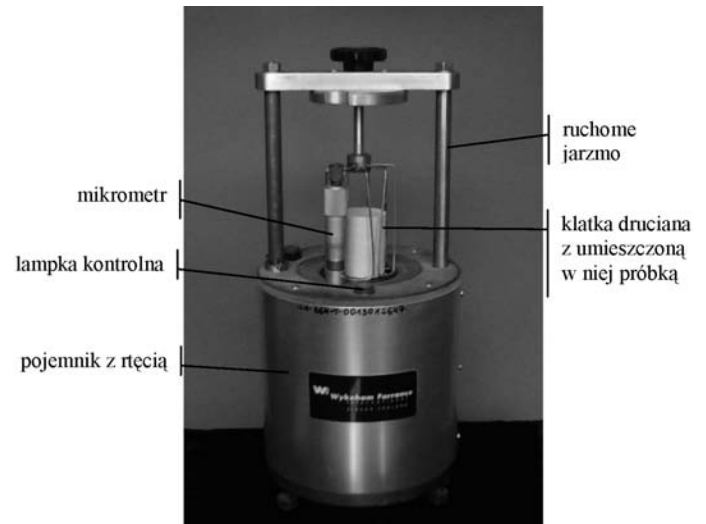
Badania granicy skurczalności według normy BS oraz metodą bryłową są analogiczne i odwołują się wprost do definicji granicy skurczalności według Casagrande’a. Jest to wilgotność, przy której grunt pomimo dalszego suszenia nie zmniejsza swojej objętości. Procedura badania granicy skurczalności według obu tych metod polega zatem na rejestracji zmian objętości (wskaźnika porowatości) wraz ze spadkiem masy (wilgotności) próbki w trakcie powolnego jej wysychania na powietrzu, a następnie po wysuszeniu w 105-110°C. Pary tych danych nanosi się na układ współrzędnych z wartościami objętości (lub wskaźnika porowatości) na osi rzędnych i wilgotności na osi odciętych. Punkt przecięcia linii prostych przybliżających fazę skurczu normalnego oraz fazę zaniku skurczu wyznacza wilgotność granicy skurczalności (rys. 1).



Rys. 1. Krzywa skurczalności gruntu (Head [8], uzupełniona o fazy skurczu za Sridharan, Venkatappa Rao [26])

Różnica pomiędzy procedurami obu metod tkwi w sposobie pomiaru objętości próbki gruntu. Jest to zarazem kluczowy problem techniczny w badaniach granicy skurczalności.

Zgodnie z normą BS pomiary objętości próbek gruntu przeprowadzono przy użyciu aparatu rtęciowego WF 2/756 (Wykeham Farrance, UK) (rys. 2). Szczegółowy opis metodyki badań w tym aparacie przedstawiono w pracy Izdebska-Mucha [9]. Ze względu na szkodliwość rtęci oraz restrykcyjne wymagania BHP w odniesieniu do stanowiska pracy z rtęcią, zaleca się odchodzić od jej stosowania w badaniach laboratoryjnych. W laboratorium Zakładu Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii UW wykorzystuje się obecnie piknometr quasi cieczowy Geopyc 1360 (Micromeritics, USA) (rys. 3) do pomiarów gęstości i objętości próbek gruntu. Część prezentowanych w niniejszej pracy badań, przeprowadzono z wykorzystaniem tego aparatu. Pomiary 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



Rys. 2. Aparat rtęciowy WF 2/756 do badania granicy skurczalności (Wykeham Farrance, UK)



Rys. 3. Piknometr quasi cieczowy Geopyc 1360 (Micromeritics, USA)

wykazuje dużą „płynność”, dokładnie dopasowuje się i otacza powierzchnię próbki, nie wchodząc w pory o średnicy poniżej 25 μm. Jest to badanie nie niszczące próbki, którą można poddać wielokrotnym pomiarom w procesie suszenia.

W metodzie bryłowej próbki gruntu pokrywa się płynną żywicą, która działa jak wiotka membrana, dostosowując się podczas wysychania gruntu do jego kształtu i zabezpieczając naturalną jego strukturę. W zetknięciu z wodą żywica jest przez krótki okres czasu nieprzepuszczalna, ale pozwala na stopniowe wydostawanie się z gruntu pary wodnej. Objętość próbek określano, ważąc je w wodzie destylowanej, na podstawie prawa Archimedesasa.

Przebieg badań granicy skurczalności według PN-88/B-04481 jest odmienny w stosunku do opisanych wyżej metod, a jednocześnie jest mniej czasochłonny. Badanie opiera się na wyznaczeniu gęstości objętościowej szkieletu gruntowego  $\rho_d$  gruntu wysuszonego w 105 ÷ 110°C, gęstości właściwej szkieletu gruntowego  $\rho_s$  i obliczeniu wartości  $w_s$  według wzoru:

$$w_s = \left( \frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

gdzie:

- $w_s$  – granica skurczalności [%]
- $\rho_w$  – gęstość wody w porach gruntu (przyjmowana jako 1,000 [Mg/m<sup>3</sup>])
- $\rho_s$  – gęstość właściwa szkieletu gruntowego [Mg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_d$  – gęstość objętościowa szkieletu gruntowego [Mg/m<sup>3</sup>].

Wartości gęstości objętościowej szkieletu gruntowego próbek wysuszonych w 105 ÷ 110°C, pomierzone w trakcie badań

według normy brytyjskiej, przyjęto do obliczeń granicy skurczalności według PN-88/B-04481.

W praktyce geologiczno-inżynierskiej dąży się do znajdowania zależności empirycznych pomiędzy parametrami gruntu. Zależności te pozwoliłyby na szybkie oszacowanie szukanego parametru, na podstawie innych indeksowych właściwości gruntu. W niniejszym artykule wyniki badań eksperymentalnych granicy skurczalności porównano z wartościami obliczonymi według dwóch wzorów empirycznych:

- wzór Krabbego z 1958 roku (za Schultze, Muhs [23])

$$w_s = w_L - 1,25I_p \quad (2)$$

gdzie:

- $w_s$  – wilgotność granicy skurczalności [%],
- $w_L$  – wilgotność granicy płynności [%],
- $I_p$  – wskaźnik plastyczności [%].

- wzór opracowany w Instytucie Techniki Budowlanej (ITB), przedstawiony przez Wysokińskiego i in. [28]:

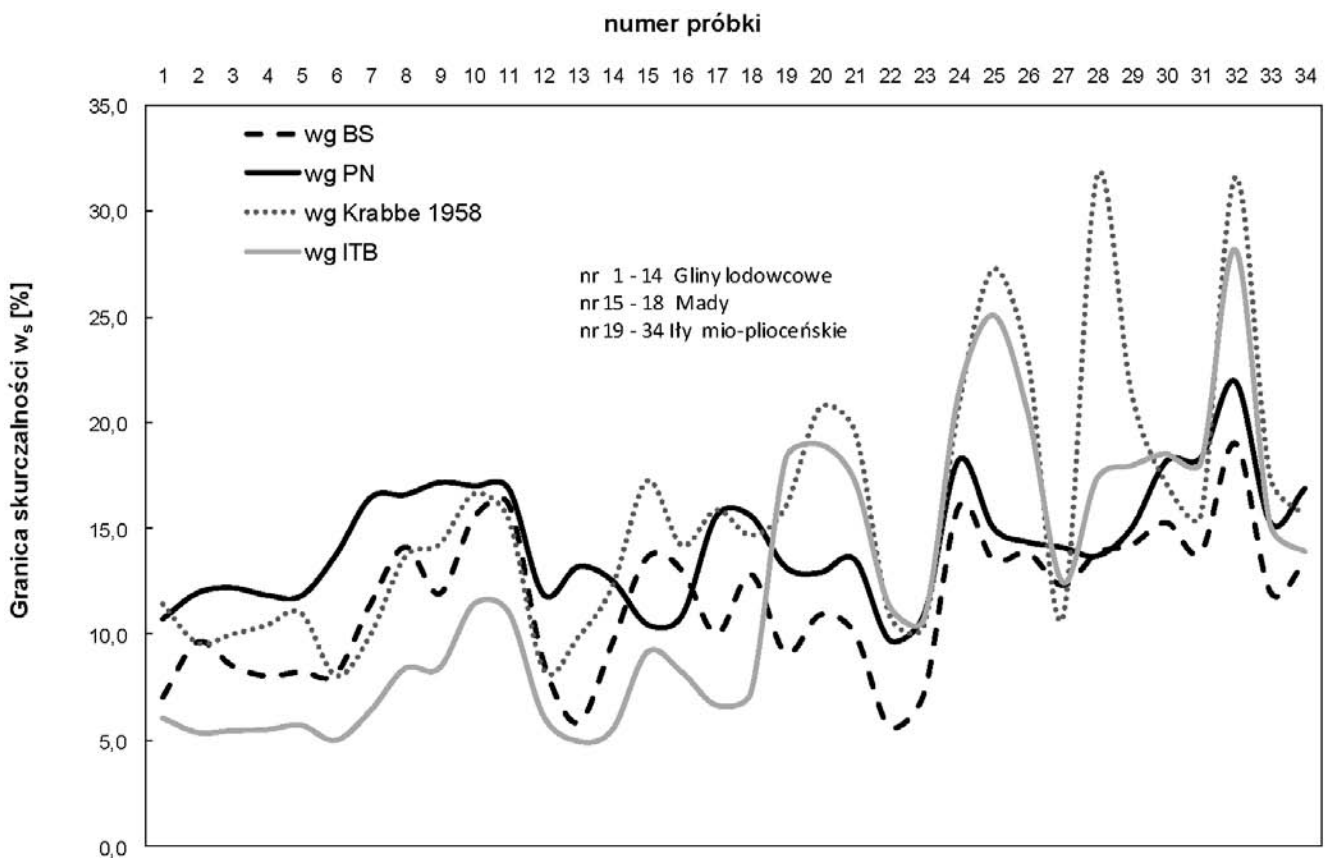
$$w_s = 0,34 \cdot w_p \cdot (1 + f_i) \quad (3)$$

gdzie:

- $w_s$  – wilgotność granicy skurczalności [%],
- $w_p$  – wilgotność granicy plastyczności [%],
- $f_i$  – zawartość frakcji ilowej [%].

## Wyniki badań

Analizę granicy skurczalności przeprowadzono dla gruntów o zróżnicowanej spoiwości i genezie: glin lodowcowych, mad



Rys. 4. Porównanie wartości granicy skurczalności  $w_s$  według metod doświadczalnych i wzorów korelacyjnych

oraz ilów mio-pleioceńskich, które powszechnie występują na terenie Polski. Łącznie przebadano 34 próbki gruntów (w tym 14 próbek glin lodowcowych, 4 próbki mad i 16 próbek ilów mio-pleioceńskich).

Wartości  $w_s$  dla poszczególnych próbek wyznaczone za pomocą czterech metod przedstawiono na rys. 4. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że wartości granicy skurczalności określone według [3] są niższe niż według [22]. W grupie glin lodowcowych różnice wahają się w zakresie od 0,8 do 7,4%, w grupie mad tendencja jest rozbieżna, natomiast w analizowanym zbiorze ilów różnica ta jest najmniejsza i wynosi od 0,6 do 4,5%. Analogiczną tendencję rozbieżności między tymi metodami stwierdzono również w pracy Izdebskiej-Muchy [9].

Uzyskane rozbieżności w wartościach granicy skurczalności według różnych metod mogą dawać różną klasę ekspansywności gruntu według znanych w literaturze klasyfikacji. Im wyższa wartość granicy skurczalności, tym niższy stopień ekspansywności gruntu, a zatem ocena ekspansywności podłoża gruntowego na podstawie  $w_s$  oznaczonej według [3] zapewnia większy margines bezpieczeństwa, ponieważ zakłada się w niej wyższą ekspansywność i mniej korzystne warunki posadowienia.

Wartości granicy skurczalności obliczone z wzorów korelacyjnych Krabbego oraz według ITB, na ogół istotnie odbiegają i nie wykazują jednolitej tendencji zróżnicowania w stosunku do wartości uzyskanych według metod eksperymentalnych. Podjęto próbę poprawienia powyższych modeli na podstawie zbioru danych zgromadzonych przez autorki. W celu znalezienia zależności granicy skurczalności (wartości wyznaczone eksperymentalnie według brytyjskiej normy) od granicy plastyczności i zawartości frakcji ilowej oraz granicy płynności i wskaźnika plastyczności, przeprowadzono analizę regresji wielorakiej metodą najmniejszych kwadratów, z wykorzystaniem programu Statistica. Otrzymano równania postaci:

$$w_s = 0,31 \cdot w_L - 0,35I_p + 5,62 \pm 2,42, R^2 = 0,482; w_s \text{ wg BS} \quad (4)$$

$$w_s = 0,33 \cdot w_p - 0,04f_i + 5,74 \pm 2,36, R^2 = 0,506; w_s \text{ wg BS} \quad (5)$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że oba modele pozwalają wyjaśnić zaledwie około 50% zmienności oryginalnej zmiennej zależnej  $w_s$ . W modelu (5) zawartość frakcji ilowej jest zmienną nieistotną, ponieważ niska wartość współczynnika stojąca przy tym parametrze wskazuje na słabą zależność pomiędzy  $f_i$  a  $w_s$ . Niskie wartości  $R^2$  wskazują, że zmienność granicy skurczalności nie może być objaśniana przez modele oparte na rozważanych zmiennych.

W pracach Izdebskiej-Muchy, Wójcik [10, 11] autorki stwierdziły brak silnych korelacji granicy skurczalności z frakcją ilową, granicą plastyczności i płynności. Podobne wnioski przedstawili Sridharan, Prakash [24]. W tym świetle nie jest więc zaskakujący brak zgodności wyników granicy skurczalności oznaczonych empirycznie z wynikami obliczonymi z wzorów korelacyjnych oraz niski stopień korelacji do wyznaczonych modeli statystycznych.

W celu oceny wpływu struktury gruntu na wartość granicy skurczalności przeprowadzono badania porównawcze na próbkach preparowanych (pastach) oraz na próbkach o nienaruszo-

nej strukturze (NNS). Pomiary na próbkach NNS wykonano metodą bryłową. Badania przeprowadzono dla 14 próbek gruntów. Na rys. 5 przedstawiono porównanie uzyskanych wyników. Ich analiza pozwala stwierdzić, że wartości granicy skurczalności próbek NNS są nieco niższe niż past (wyjątek próbka nr 1 i 6). W glinach różnica wynosi od 0,8 do 2,6%, dla mad od 1,6 do 4,3%, podczas gdy w grupie ilów mio-pleioceńskich rozbieżności są najmniejsze i wynoszą od 0 do 1,7%.

## GRANICA PŁYNNOŚCI

### Metodyka badań

Wartość granicy płynności  $w_L$  dostarcza informacji o stanie gruntu spoistego, również stosuje się w klasyfikacjach gruntów (ekspansywność, ocena gruntów jako barier izolacyjnych). Do oznaczenia granicy płynności stosuje się dwie grupy metod: z wykorzystaniem aparatu Casagrande'a lub penetrometru stożkowego. W pracy przedstawiono analizę porównawczą wyników badań, przeprowadzonych według następujących metod:

1. metoda Casagrande'a według [22],
2. jednopunktowa metoda Casagrande'a według [1],
3. metoda penetrometru stożkowego (Ele, UK) według [3],
4. jednopunktowa metoda penetrometru stożkowego (Ele, UK) według [3],
5. metoda penetrometru stożkowego konstrukcji ITB według [22].

Klasyczne wielopunktowe metody oznaczania granicy płynności (metoda 1, 3, 5) są pracochłonne i czasochłonne. Wymagają przygotowania pięciu past o zróżnicowanej wilgotności. Kluczowym do uzyskania właściwego wyniku jest czas, w którym dochodzi do ujednoczenia wilgoci w paście. Jest to szczególnie istotne w przypadku ilów – wskazane jest, aby wyrobiona pasta „leżakowała” przez 24 godziny przed właściwym badaniem. Duże znaczenie ma również doświadczenie laboranta w ocenie wyniku oraz precyzja wykonania badania zgodnie z procedurą.

Z zastosowaniem zarówno aparatu Casagrande'a, jak i penetrometru stożkowego można wyznaczyć wartość granicy płynności tzw. metodą jednopunktową (metody 2, 4). Procedury badania według jednopunktowej metody Casagrande'a oraz penetrometru stożkowego są analogiczne. Wartość granicy płynności oblicza się z wzoru:

$$LL = w_n \cdot k \quad (6)$$

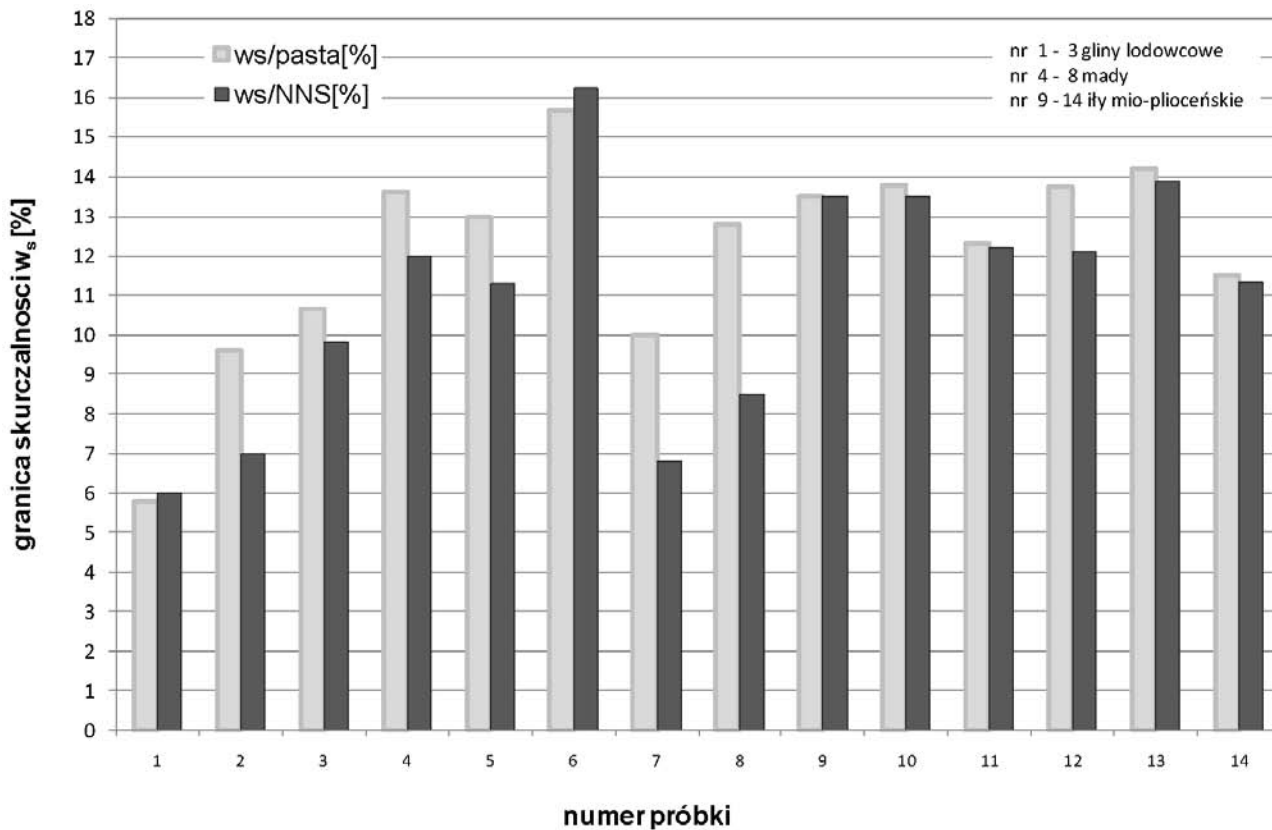
gdzie:

$LL$  – granica płynności ( $w_L$ )

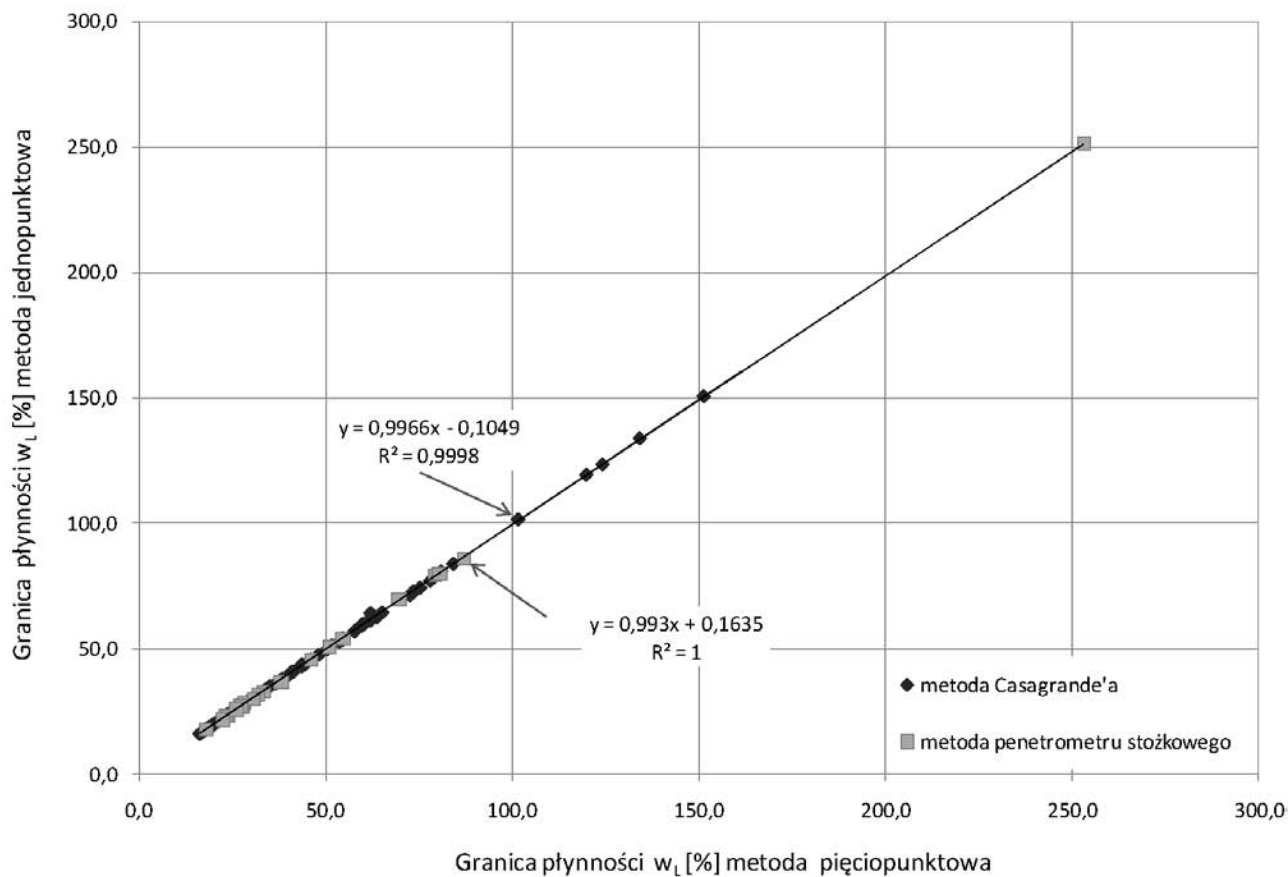
$w_n$  – wilgotność pasty gruntowej, przy której bruzda w miseczce aparatu Casagrande'a zesłała się na długości 1 cm i wysokości 1 mm przy liczbie uderzeń pomiędzy 20 a 30 (według [1]) lub  $w_n$  to wilgotność pasty gruntowej, przy której stożek zanurzył się w paście gruntowej na głębokość pomiędzy 15 a 25 mm (według [3])

$k$  – współczynnik liczbowy odczytany z normy, zależny od wilgotności pasty gruntowej oraz odpowiednio liczby uderzeń miseczki o podstawę w aparacie Casagrande'a lub głębokości zanurzenia stożka.

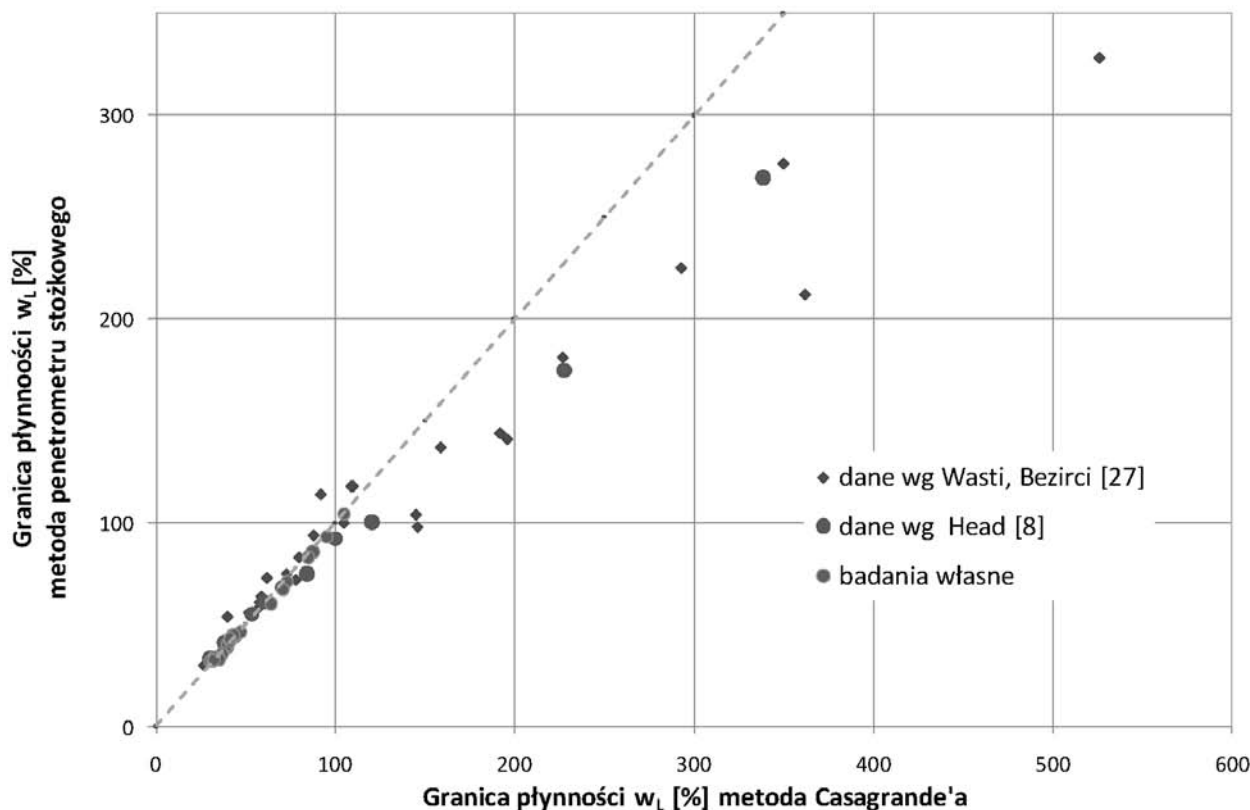
Krótką procedurą i czas wykonania oraz niewielką ilością gruntu potrzebna do przeprowadzenia pomiaru to istotne zalety metod jednopunktowych.



Rys. 5. Porównanie wartości granicy skurczalności  $w_s$  próbek naturalnych (NNS) i preparowanych (past)



Rys. 6. Porównanie wyników badań granicy płynności  $w_l$  według pełnych (pięciopunktowych) i skróconych (jednopunktowych) metod: Casagrande'a oraz penetrometru stożkowego



Rys. 7. Porównanie wyników oznaczania granicy płynności metodą Casagrande'a i metodą penetrometru stożkowego

## Wyniki badań

Uproszczone metody oznaczenia granicy płynności, na podstawie tylko jednego oznaczenia wilgotności pasty gruntowej, zweryfikowano na podstawie obszernych badań gruntów spoistych z rejonu Polski. Łącznie badaniom poddano 230 próbek gruntów o szerokim zakresie wartości granicy płynności (16 do 250%). Na rys. 6 przedstawiono korelację wyników badań uzyskanych na podstawie 5 oznaczeń pasty gruntowej o różnych wilgotnościach, a badaniem opartym o jeden pomiar. Stwierdzono, że w odniesieniu zarówno do metody Casagrande'a, jak i penetrometru stożkowego, istnieje statystyczna równość pomiędzy wartościami  $w_L$  uzyskanymi metodą jedno- i wielopunktową (rys. 6). Podobne wnioski w metodzie Casagrande'a przedstawiono w Biuletynie Geotechnicznym Geoteko [2].

Przedstawione wyniki badań, oparte na dużej próbie statystycznej, uzasadniają możliwość stosowania metod jednopunktowych w praktyce geologiczno-geotechnicznej.

Zgodnie z europejską specyfikacją techniczną [21] do badań granicy płynności zaleca się stosować metodę penetrometru stożkowego. W specyfikacji podaje się, że ze względu na sposób prowadzenia badania i czynnik subiektywnej oceny wyniku przez badacza, wartości uzyskane metodą Casagrande'a są zawyżone. Head [8], Wasti, Bezirci [27] przedstawili analizę korelacji wyników uzyskanych metodą Casagrande'a oraz metodą penetrometru stożkowego (rys. 7). W analizie wykazano zgodność obu metod w zakresie granicy płynności do 100%. Powyżej tej wartości metodą penetrometru stożkowego uzyskuje się wartości niższe niż metodą Casagrande'a. Według Łukasika

[19] rozważane metody dają zgodne wyniki w zakresie wartości  $w_L$  do 50%. Powyżej tej wartości autor stwierdził rozbieżność między wynikami, uzyskując jednakże wysoki współczynnik korelacji (0,977) w analizowanym zbiorze danych w zakresie  $w_L$  20 ÷ 140%. Zależność uzyskana przez autorki dla 24 próbek gruntów spoistych (iłów, iłów pylastych i gliny zwięzłej) o wartości  $w_L$  do 105%, potwierdza również zgodność metody Casagrande'a i penetrometru stożkowego w badanym zakresie (rys. 7).

W iłach monomineralnych: bentonitu, iłu illitowego i kaolinitu przeprowadzono porównawcze pomiary granicy płynności metodą penetrometru stożkowego konstrukcji ITB według [21] oraz penetrometru stożkowego firmy Ele (UK) według [3]. Rezultaty badań obiema metodami przedstawiono w tabl. 1. Stwierdzono, że w metodach tych uzyskuje się rozbieżne wyniki, przy czym różnice są tym większe, im bardziej hydrofilny jest grunt. Wyniki pomiarów przeprowadzonych zgodnie z normą polską są wyższe niż według normy brytyjskiej.

Tabl. 1. Wartości granicy płynności iłów monomineralnych wyznaczone metodą penetrometru stożkowego wg normy polskiej i brytyjskiej

Rodzaj gruntu	$w_L$ [%] według [22]	$w_L$ [%] według [3]
bentonit	888 ±14	257 ±9
ił illitowy	67 ±1,5	46 ±0,3
kaolinit	69 ±2,0	51 ±0,8

## WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że:

1. Wartości granicy skurczalności według [3] są niższe niż według [22], a różnica wynosi  $0,6 \div 7,4\%$ .
2. Wartości granicy skurczalności obliczone z wzorów korelacyjnych Krabbego oraz według ITB istotnie różnią się i nie wykazują jednolitej tendencji zróżnicowania w stosunku do wyników uzyskanych metodami laboratoryjnymi.
3. Statystyczną analizą zależności granicy skurczalności od granicy płynności, granicy plastyczności, wskaźnika plastyczności oraz zawartości frakcji ilowej wykazano, że modele oparte na tych zmiennych niezależnych wykazują niski stopień korelacji i nie mogą być stosowane do predykcji granicy skurczalności.
4. Wartości granicy skurczalności pomierzone w próbkach NNS są niższe niż w pastach o  $0 \div 4,3\%$ .
5. Analizą porównawczą jedno- i wielopunktowych oznaczeń granicy płynności metodą Casagrande'a i metodą penetrometru stożkowego wykazano, że wyniki uzyskane metodami uproszczonymi są równe wartościom uzyskanym metodą pełną (pięciopunktową), co uzasadnia możliwość stosowania metod jednopunktowych w praktyce geologiczno-geotechnicznej.
6. Istnieje zgodność wyników badań granicy płynności metodą Casagrande'a i metodą penetrometru stożkowego według [3] w gruntach charakteryzujących się wartością  $w_L$  w zakresie do około 100%.
7. Wartości granicy płynności oznaczone metodą penetrometru stożkowego konstrukcji ITB według [22] są wyższe niż wartości oznaczone za pomocą penetrometru stożkowego firmy Ele według [3]. Różnice są tym większe, im bardziej hydrofilny jest grunt.

## LITERATURA

1. ASTM D 4318-98 Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils.
2. Biuletyn Geotechniczny Geoteko, nr 2, 2011, 44-45.
3. BS1377: Part 2: Methods of testing soils for civil engineering purposes. British Standards Institution, London, 1990.
4. Chen F. H.: Foundations on expansive soils. Elsevier, Amsterdam 1975.
5. Garbulewski K.: Ocena ekspansywności gruntów na podstawie charakterystyk skurczalności. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2000, 136-140.
6. Garbulewski K.: Dobór i badania gruntowych uszczelnień składowisk odpadów komunalnych. Wydawnictwo SGGW. Warszawa 2000.
7. Garbulewski K., Żakowicz S.: Skurcz gruntu – zjawisko groźne w uszczelnieniach mineralnych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2007, 86-91.

8. Head K. H.: Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 1: Soil classification and compaction tests. Pentech Press, London, 1992.
9. Izdebska-Mucha D.: Polska a brytyjska norma badań skurczalności gruntów spoistych. [W:] Materiały konferencyjne „45 lat geotechniki w Łodzi, Geotechnika w polskim budownictwie” Łódź - Arturówek 24-25 kwietnia 2003 r., 2003, 63-78.
10. Izdebska-Mucha D., Wójcik E.: Analiza parametrów skurczalności gruntów spoistych według różnych norm. Biuletyn PIG, 446, 2: 2011, 321-327.
11. Izdebska-Mucha D., Wójcik E.: Testing shrinkage factors – comparison of methods and correlation with index properties of soils (praca przygotowana do publikacji)
12. Jeż J.: Geotechnika – awarie osoblwe. Warstwy, dachy, ściany, 4: 2008, 87-89.
13. Jeż J., Jeż T.: O awariach budynków posadowionych na łąkach poznańskich. Inżynieria i Budownictwo, 62, nr 3/2006, 135-137.
14. Jeż J., Jeż T.: Stereotypy w ocenie sytuacji geotechnicznej obiektu budowlanego. Inżynieria i Budownictwo, nr 6/2006, 315-317.
15. Kumor M. K.: Awarie budynków posadowionych na ekspansywnych łąkach trzeciorzędowych w Bydgoszczy. Przegląd Budowlany, nr 11/1990, 471-476.
16. Kumor M. K.: Geotechniczna charakterystyka łąłw trzeciorzędowych serii poznańskiej jako podłoża budowlanego. Iły poznańskie. Praktyczne Aspekty Budownictwa na Gruntach Ekspansywnych, Bydgoszcz, 1994, 1-18.
17. Kumor M. K.: Wybrane problemy skurczu łąłw ekspansywnych rejonu Bydgoszczy. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Budownictwo, 111: 2007, 247-254.
18. Kumor M. K.: Selected geotechnical problems of expansive clays in the area of Poland. Architecture Civil Engineering Environment, 1, 4, 2008, 75-92.
19. Łukasik S.: Kalibracja penetrometru stożkowego do wyznaczania granicy płynności. 50 lat geotechniki w ITB, Warszawa, 1995, 231-238.
20. Niedzielski A.: Czynniki kształtujące ciśnienie pęcznienia oraz swobodne pęcznienie łąłw poznańskich i warwowych. Roczniki Akademii Rolniczej, Rozprawy naukowe, Zeszyt 238. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, Poznań 1993.
21. PKN-CEN ISO/TS 17892-12 Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 12: Oznaczanie granic Atterberga.
22. PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
23. Schultze E., Muhs H.: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Springer-Verlag. Berlin/Heidelberg/New York, 1967.
24. Sridharan, A. and Prakash K.: Mechanism Controlling the Shrinkage Limit of Soils, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 21, No. 3, 1998 240-250.
25. Sridharan A. and Prakash K.: Classification procedures for expansive soils, Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng, 143, Oct., 2000 235-240.
26. Sridharan A., Venkatappa Rao G.: Effective stress theory of shrinkage phenomena. Can. Geotech. Journ., Vol. 8, no. 4, 1971, 503-513.
27. Wasti Y., Bezirci M. H.: Determination of the consistency limits of soils by the fall cone test, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 23: 1986, 241-246.
28. Wysokiński L., Majer E., Łuczak-Wilamowska B., Drągowski, A.: Zasady oceny przydatności gruntów spoistych Polski do budowy mineralnych barier izolacyjnych, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2007.