

WPLYW METODYKI OZNACZANIA GRANIC ATTERBERGA NA UZYSKIWANE WARTOŚCI STOPNIA PLASTYCZNOŚCI

Krystyna JAŚKIEWICZ*, Małgorzata WSZĘDYRÓWNY-NAST

Zakład Geotechniki i Fundamentowania, Instytut Techniki Budowlanej, ul. Ksawerów 21, 02-610 Warszawa

Streszczenie: Jedną z podstawowych metod charakterystyki (a także klasyfikacji) gruntów spoistych (drobnoziarnistych) jest ustalenie ich granic Atterberga. Artykuł charakteryzuje krótko metodę oznaczania granicy płynności metodą penetrometru stożkowego – zgodnie z zaleceniami PN-EN 1997-2:2009 (Eurokod 7) i PKN-CEN ISO/TS 17892-12:2009 (w pracy oznaczano jako ST 12). Przeanalizowano wyniki oznaczeń stopnia plastyczności uzyskane metodą penetrometru stożkowego według normy PN-88/B-04481 oraz ST12 dla trzech rodzajów gruntów: glin piaszczystych (clSa, sasiCl), glin piaszczystych zwięzłych (clSa, sasiCl) oraz ilów (Cl, saciCl, saCl). Zakres przeprowadzonych badań pozwolił na określenie, w jakim stopniu zmiana metody oraz sposobu interpretacji wyników wpływa na uzyskiwane wartości stopnia plastyczności gruntów. Wyznaczono zależności funkcyjne pomiędzy stopniem plastyczności oznaczonym zgodnie z metodyką opisaną w ST 12 i stopniem plastyczności oznaczonym zgodnie z PN-88/B-04481.

Słowa kluczowe: granica płynności, penetrometr stożkowy, konsystencja, stopień plastyczności, grunt drobnoziarnisty, Eurokod 7.

1. Wprowadzenie

W 2010 roku został wprowadzony do praktyki geotechnicznej w Polsce Eurokod 7 składający się z dwóch części: PN-EN-1997-1 *Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne* dotyczącej zasad ogólnych oraz PN-EN-1997-2 *Projektowanie geotechniczne – Część 2: Badania podłoża gruntowego* dotyczącej rozpoznania i badań podłoża budowlanego. Norma PN-EN-1997-2 zawiera informacje w zakresie powszechnie stosowanych metod polowych i laboratoryjnych wraz z załącznikami informacyjnymi dotyczącymi możliwych metodologii i interpretacji. Integralną częścią Eurokodu 7 są Specyfikacje Techniczne opisujące szczegółowo procedury badawcze danej metody. W zakresie badań laboratoryjnych są to specyfikacje PKN-CEN ISO/TS 17892: 1 do 12. Jedną z nich PKN-CEN ISO/TS 17892-12:2009 *Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 12: Oznaczenie granic Atterberga* dotyczy oznaczania granic Atterberga, które umożliwiają określenie stanu, w jakim znajduje się grunt, bądź – stosując pojęcie z PN-EN ISO 14688-2:2006 *Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2: Zasady klasyfikowania* – jego konsystencję (tab. 1).

Tab. 1. Porównanie podziałów gruntów drobnoziarnistych ze względu na stopień plastyczności i wskaźnik konsystencji

Stan gruntu	PN-86/B-02480	PN-EN ISO 14688-2:2006	
	Stopień plastyczności I_L	Konsystencja	Wskaźnik konsystencji I_c
płynny	>1,00	bardzo miękko-plastyczna	<0,25
miękko-plastyczny	0,50-1,00	miękko-plastyczna	0,25-0,50
plastyczny	0,25-0,50	plastyczna	0,50-0,75
twardo-plastyczny	0,00-0,25	twardo-plastyczna	0,75-1,00
półzwały	<0,00	zwarta	>1,00

Oznaczenie granicy płynności po raz pierwszy zdefiniowanej przez Atterberga w 1911 roku (Myślińska, 2010) a następnie uściślonej do celów inżynierskich przez Cassagrande'a (1932, 1958) jest jednym z najczęściej wykonywanych badań podstawowych służącym do klasyfikacji gruntów drobnoziarnistych (spoistych).

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: k.jaskiewicz@itb.pl

Wiele parametrów geotechnicznych gruntów, takich jak: wytrzymałość na ścinanie bez odpływu, ściśliwość, przepuszczalność, pęcznienie, powierzchnia właściwa, jest bezpośrednio skorelowanych lub wyznaczanych w oparciu o wartość granicy płynności.

Do oznaczenia granicy płynności stosowane są dwie metody: metoda Cassagrande'a i metoda penetrometru stożkowego (opadającego stożka z ang. *fall cone*) oryginalnie zaproponowana przez Geotechnical Commission of the Swedish State Railways (GCSSR) pomiędzy 1914 a 1922 rokiem (Hansbo, 1957). W zaleceniach PN-EN 1997-2 oraz Specyfikacji Technicznej PKN-CEN ISO/TS 17892-12 (oznaczonej w pracy jako ST 12) metoda penetrometru stożkowego została uznana za dającą bardziej wiarygodne wyniki, zwłaszcza dla gruntów o niskiej wartości wskaźnika plastyczności I_p . Metoda Cassagrande'a oznaczania granicy płynności została uznana za alternatywną w stosunku do metody penetrometru stożkowego z uwagi na bardziej subiektywną ocenę uzyskiwania wyników.

Penetrometr stożkowy jest urządzeniem, które daje względnie precyzyjne informacje na temat konsystencji gruntów drobnoziarnistych. Pomiar granicy płynności jest procesem mechanicznym i możliwość wystąpienia błędu podczas pomiaru jest nieznacząca. Metalowy stożek o określonej masie i kącie wierzchołkowym opuszczany jest na powierzchnię gruntu a następnie zwalniany, po czym zagłębia się w grunt pod własnym ciężarem. Badanie polega na uzyskaniu zależności zagłębienia stożka od wilgotności pasty gruntowej. Relacja ta jest liniowa. Wynik ustala się na podstawie interpolacji, między co najmniej czterema punktami. Granica płynności uzyskana tą metodą definiowana jest jako wilgotność, która odpowiada zagłębieniu stożka na określonej głębokości. Głębokość penetracji zależy od masy stożka i jego kąta wierzchołkowego.

Metoda ta została uznana za metodę normową w wielu krajach. W tabeli 2 przedstawiono porównanie stożków stosowanych w różnych krajach wraz z wartością zagłębienia odpowiadającą granicy płynności. GCSSR jako wartość granicy płynności zdefiniowało wilgotność pasty gruntowej, przy której zagłębienie stożka o masie 60 g i kącie stożkowym 60° wynosi 10 mm. Według Karlssona (1977) wartość ta jest odpowiednikiem granicy

płynności oznaczonej metodą Cassagrande'a, jednakże w porównaniu do niej jest niezależna od użytego urządzenia i operatora (Sowers i in., 1959; Sherwood i Rylec, 1970). Brytyjski (BS 1377: Part 2:1990 *Methods of Tests for Soils for Civil Engineering Purposes: Classification Tests*), francuski (NF P94-052.1:1995 *Limite de liquidité au cône de pénétration*) oraz polski stożek (PN-88/B-04481 *Grunty budowlane. Badanie próbek gruntu*) mają taką samą masę (80 g) i ten sam kąt wierzchołkowy (30°), ale zagłębienie odpowiadające granicy płynności jest inne.

Zgodnie z dotychczas stosowaną w Polsce normą PN-81/B-04481 wartość granicy płynności obliczana była ze wzoru:

$$w_L = 0,0043w_{18}^2 + 0,8873w_{18} + 3,62 \quad [\%] \quad (1)$$

gdzie w_{18} oznacza wilgotność pasty gruntowej przy zanurzeniu stożka na głębokość 18 mm.

Wprowadzona w 2009 roku ST 12 zgodna z Eurokodem 7 dopuszcza do stosowania dwa rodzaje stożków: brytyjski 30°/80 g/20 mm oraz szwedzki 60°/60 g/10 mm. Badania wykazały, że oba typy stożków dają identyczne wyniki (Farrell, 1997).

W artykule przeanalizowano, w jakim stopniu zmiana sposobu interpretacji wyników granicy płynności zgodnie z Eurokodem 7 w stosunku do zapisów PN-88/B-04481 wpływa na uzyskiwane wartości stopnia plastyczności oraz konsystencję gruntów.

2. Metodyka badań porównawczych

Badania wykonano na próbkach gruntów drobnoziarnistych (spoiстых) pochodzących z obszaru Polski. Łącznie badaniom poddano 231 próbek gruntu zróżnicowanych pod względem parametrów fizycznych oraz środowiska depozycji.

Dla każdej próbki wykonano oznaczenie granicy płynności metodą penetrometru stożkowego według PN-88/B-04481 oraz według ST 12 przy użyciu stożka 30°/80 g. Z gruntów przygotowywane były pasty. Według ST 12 oznaczenie granicy płynności wykonuje się dla gruntów przechodzących przez sito 0,4 mm a więc zawierających tylko frakcję iłową, pyłową i część frakcji

Tab. 2. Zestawienie parametrów stożków stosowanych w różnych krajach

Metoda badania według norm krajowych i Eurokodu	Kąt wierzchołkowy (°)	Masa stożka (g)	Głębokość penetracji odpowiadająca granicy płynności (mm)
Szwecja (Karlsson, 1977)	60	60	10,0
Francja (NF P94-052.1)	30	80	17,0
Wielka Brytania (BS 1377:Part 2:1990)	30	80	20,0
Polska (PN-88/B-04481)	30	80	18,0 (+ wzór przeliczeniowy)
Eurokod 7 (PKN-CEN ISO/TS 17892-12)	30	80	20,0
	60	60	10,0

piasku średniego (piasek średni 0,2-0,63 mm). Wymaganie to praktycznie zawęża możliwość wykonywania tego oznaczenia tylko do określanych gruntów drobnoziarnistych. Ponieważ proponowane przez ST12 procedury usuwania na mokro frakcji powyżej 0,4 mm są trudne do wykonania a uzyskana w ten sposób próbka gruntu nie odpowiada właściwościami próbce naturalnej, autorki nie zastosowały tej procedury w przeprowadzonych badaniach. Czas pomiędzy dodaniem wody do pasty gruntowej a wykonaniem odczytu zagłębienia stożka wynosił w każdym przypadku minimum pół godziny.

Oznaczenie granicy plastyczności wykonano metodą wałeczkowania zgodnie z PN-88/B-04481. Metoda ta nieznacznie różni się od procedury przedstawionej w ST 12 (wałeczkowanie przeprowadza się na dłoni, a nie na płytce).

Na podstawie uzyskanych wartości wilgotności granicy płynności w_L granicy plastyczności w_p oraz wilgotności naturalnej w obliczony został stopień plastyczności I_L :

$$I_L = \frac{w - w_L}{w_L - w_p} \quad (2)$$

Ponadto zakres przeprowadzonych prac obejmował wykonanie oznaczenia składu granulometrycznego metodą analizy areometrycznej w celu określenia procentowej zawartości poszczególnych frakcji, jak i określenia rodzaju badanego gruntu. Nazwę poszczególnych gruntów określono zgodnie z PN-86/B-0248 *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*, jak i według PN-EN ISO 14688-2.

Poniżej przedstawione zostały wyniki badań dla glin piaszczystych (cISa, sasiCl) – 121 próbek, glin piaszczystych zwięzłych (cISa, sasiCl) – 54 próbki oraz ilów (Cl, sasiCl, saCl) – 56 próbek. Szczegółowe dane dotyczące badanych próbek (uśrednione zawartości frakcji uziarnienia oraz zakresy uzyskanych wartości granic konsystencji) przedstawiono w tabeli 3.

3. Wyniki badań

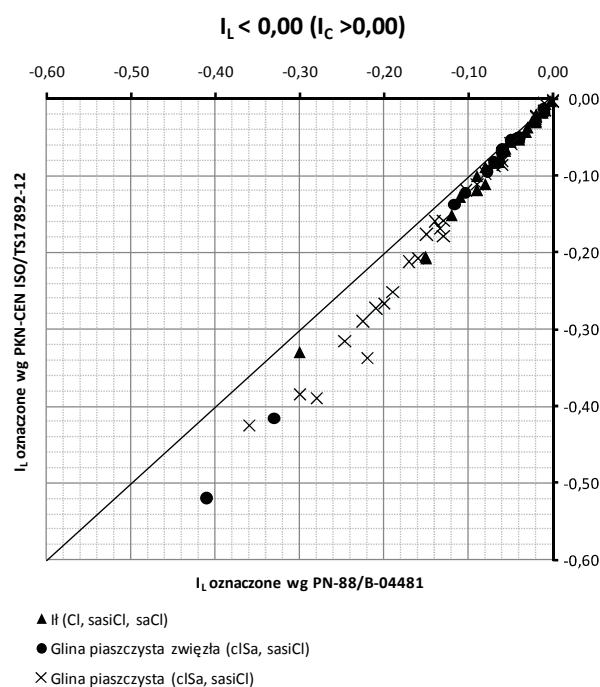
Na podstawie przeprowadzonych oznaczeń granicy płynności metodą według PN-88/B-04481 oraz metodą

opisaną w ST 12, dokonano porównania wartości stopnia plastyczności dla 3 stanów gruntu: półzwartego, twaroplastycznego oraz plastycznego. Analizy przeprowadzono w obrębie każdej z trzech grup gruntów.

Próbki gruntów w stanie półzwartym/zwartym

Wykonano ogółem 57 badań na próbkach, dla których wartość stopnia plastyczności $I_L < 0$ (wskaźnik konsystencji $I_C > 1$).

Analiza stopnia plastyczności I_L wykazała zróżnicowanie jego wartości w zależności od przyjętej metody wykonywania badania. Dla wszystkich analizowanych próbek stopień plastyczności oznaczony zgodnie ze ST 12 nie zmienił się lub odnotował zwiększenie w stosunku do wartości stopnia plastyczności określonego według PN-88/B-0441. Rysunek 1 pokazuje wyniki uzyskane dla gruntów w stanie półzwartym w zależności od rodzaju gruntu. Różnica wartości I_L wyniosła od 0,00 do 0,12, jednak nie spowodowała ona zmiany opisu stanu gruntu dla żadnej z badanych próbek. Tendencja była niezmienna dla wszystkich przebadanych rodzajów gruntu.



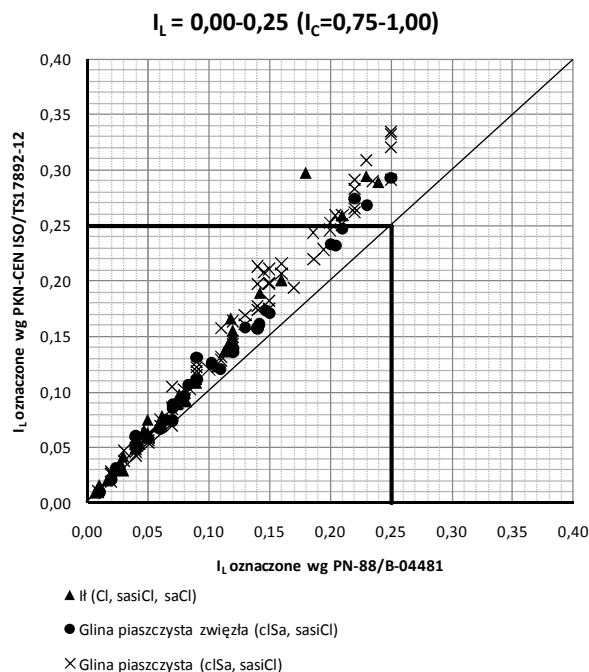
Rys. 1. Zależność pomiędzy stopniem plastyczności według PN-88/B-04481 oraz według PKN-CEN ISO/TS 17892-12 dla gruntów w stanie półzwartym/zwartym

Tab. 3. Charakterystyka badanych gruntów

Liczba oznaczeń	Rodzaj gruntu według PN-88/B-04481	Symbol gruntu według PN-EN ISO 14688-2	Uśredniona zawartość frakcji [%]				Wilgotność [%]	Uśredniona wartość granicy plastyczności [%]
			f_{z+k}	f_p	f_π	f_i		
121	Gлина piaszczysta	cISa, sasiCl	4	64	18	14	8,7–27,5	12,9
54	Gлина piaszczysta zwięzła	cISa, sasiCl	2	58	18	22	8,5–25,0	13,0
56	Ił	Cl, sasiCl, saCl	0	8	34	58	10,3–44,4	24,7

Próbki gruntów w stanie twardoplastycznym

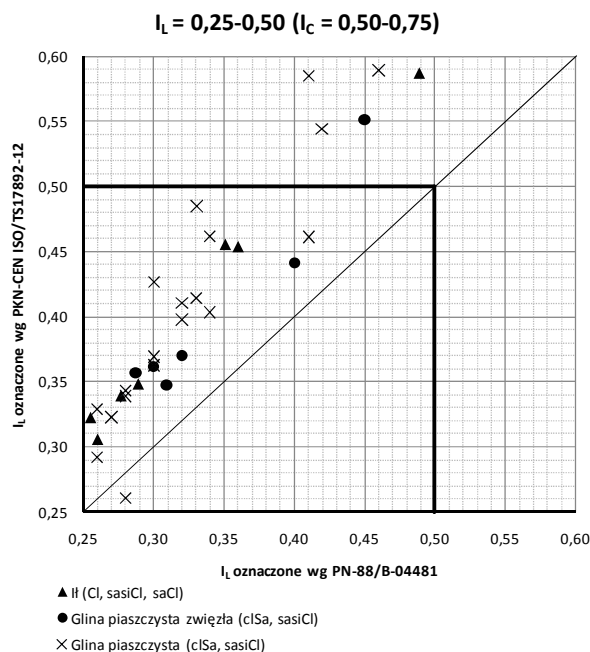
Przeprowadzono 92 badania, z których uzyskana wartość stopnia plastyczności kształtowała się w przedziale od 0,00 do 0,25 (wskaźnik konsystencji $I_C = 0,75-1,0$) (rys. 2). Maksymalna różnica pomiędzy stopniem plastyczności uzyskanym zgodnie z ST 12 i PN-88/B-04481 wyniosła 0,12 dla iłu. Wartości średnie różnic dla wszystkich rodzajów gruntów mieściły się w zakresie 0,01-0,05. Nowa interpretacja granicy płynności spowodowała w większości przypadków wzrost wartości stopnia plastyczności, powodując w niektórych przypadkach zmianę oceny stanu gruntu – ze stanu twardoplastycznego w plastyczny.



Rys. 2. Zależność pomiędzy stopniem plastyczności według PN-88/B-04481 oraz według PKN-CEN ISO/TS 17892-12 dla gruntów w stanie twardoplastycznym

Próbki gruntów w stanie plastycznym

Analizując grunty występujące w stanie plastycznym (39 próbek) czyli $I_L = 0,25-0,50$ (wskaźnik konsystencji $I_C = 0,50-0,75$) stwierdzono, że tendencja zmian stopnia plastyczności i w tym przypadku została utrzymana. Wartości parametru stopnia plastyczności zmieniały się nieznacznie, średnio o stałą wartość około 0,06-0,07 (rys. 3).



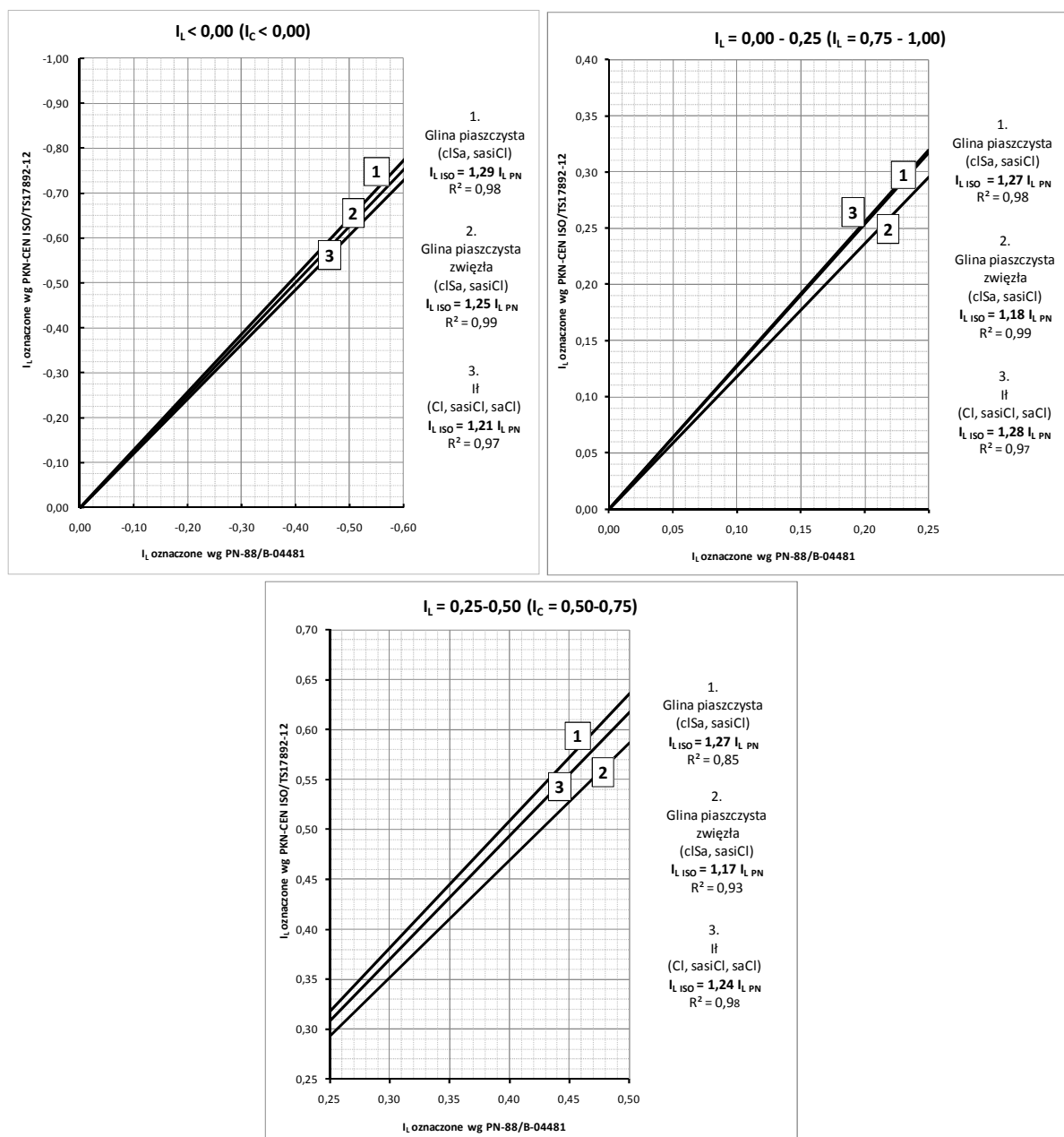
Rys. 3. Zależność pomiędzy stopniem plastyczności według PN-88/B-04481 oraz według PKN-CEN ISO/TS 17892-12 dla gruntów w stanie plastycznym

Na podstawie wykonanych badań, podjęto próbę wyznaczenia zależności statystycznych pomiędzy stopniem plastyczności oznaczonym zgodnie z metodyką opisaną w ST 12 (I_{LISO}) a stopniem plastyczności oznaczonym zgodnie z PN-88/B-04481 (I_{LPN}), przedstawionych na rysunku 4. Do wyznaczenia równań zastosowano metodę najmniejszych kwadratów. Stwierdzono istnienie zależności liniowych o wysokim współczynniku korelacji ($R_2 = 0,97-0,99$) dla wszystkich analizowanych rodzajów gruntów w stanie półwartym i twardoplastycznym. Równie wysoki współczynnik korelacji uzyskano dla glin piaszczystych zwięzłych i iłów w stanie plastycznym ($R_2 = 0,93-0,98$).

4. Podsumowanie

Ogółem przebadano 231 próbek gruntu (121 próbek gruntu gliny piaszczystej, 54 próbki gliny piaszczystej zwięzłej oraz 56 próbek iłu). Przeprowadzone badania wykazały ogólną tendencję wzrostową wartości stopnia plastyczności uzyskanego na podstawie określenia granicy płynności według PKN-CEN ISO/TS 17892-12 w stosunku do normy PN-88/B-04481. Zmiana metodyki interpretacji granicy płynności spowodowała zmianę opisu konsystencji niektórych próbek gruntów w kierunku bardziej plastycznej. W tabeli 4 pokazano procentowy stosunek zmian opisu stanu gruntu spowodowany interpretacją granicy płynności według ST 12 oraz procent, o jaki średnio wzrosła wartość stopnia plastyczności w obrębie każdej z analizowanych grup gruntów.

Analiza stopnia plastyczności I_L wykazała różnicowanie jego wartości w zależności od przyjętej metody wykonywania badania. Dla wszystkich



Rys. 4. Zależności statystyczne pomiędzy stopniem plastyczności oznaczonym zgodnie z metodyką opisaną w ST 12 ($I_{L ISO}$) a stopniem plastyczności oznaczonym zgodnie z PN-88/B-04481 ($I_{L PN}$)

Tab. 4. Analiza zmian wartości stopnia plastyczności spowodowanych zmianą metodyki oznaczania granic Atterberga

Rodzaj gruntu	Stan gruntu według PN-88/B-0441 [-]	Wartość o jaką średnio wzrosła wartość I_L (po oznaczeniu w_L metodą według ST 12) [-]	Procent o jaki średnio wzrosła wartość I_L (po oznaczeniu w_L metodą według ST 12) [%]	Procent jaki stanowią próbki, dla których zmienił się opis stanu gruntu [%]
Gлина пiaszczysta (cISa, sasiCl)	półzwały	0,04	28	0
	twardoplastyczny	0,03	27	19
	plastyczny	0,09	26	20
Gлина пiaszczysta zwięzła (cISa, sasiCl)	półzwały	0,02	23	0
	twardoplastyczny	0,02	22	9
	plastyczny	0,06	18	17
И (Cl, sasiCl, saCl)	półzwały	0,02	30	0
	twardoplastyczny	0,02	26	9
	plastyczny	0,08	24	12

analizowanych próbek wartość stopnia plastyczności oznaczonego zgodnie z ST 12 był większy w prównaniu do wartości stopnia plastyczności określonego według PN-88/B-0441 (tab. 4).

Stwierdzono, że gruntem najbardziej podatnym na zmianę stanu jest glina piaszczysta – 15% przebadanych próbek zmieniło konsystencję, a najmniej podatnym ił oraz glina piaszczysta zwięzła, około 7% przebadanych próbek. Wskazuje to, że im większa jest zawartość frakcji iłowej w gruncie, tym grunt jest mniej podatny na zmianę wartości stopnia plastyczności.

Największy procent zmiany stanu gruntów zaobserwowano w obrębie próbek z przedziału $I_L = 0,25-0,50$ (plastycznych) – od 12% dla iłu do 20% dla gliny piaszczystej, najmniejszy dla próbek w stanie półzwałym – brak zmiany stanu dla wszystkich wykonanych oznaczeń.

Stwierdzono zależność liniową o wysokim współczynniku korelacji $R_2 = 0,97-0,99$ pomiędzy stopniem plastyczności oznaczonym obiema metodami ST 12 ($I_{L\ ISO}$) i PN-88/B-04481 ($I_{L\ PN}$), w przypadku wszystkich rodzajów gruntów w stanie półzwałym i twardoplastycznym. W przypadku glin piaszczystych zwięzłych i iłów w stanie plastycznym współczynnik korelacji wyniósł $R_2 = 0,93-0,98$.

Przedstawione nomogramy mogą mieć zastosowanie do przeliczenia stanów gruntów (przy wykonywaniu dokumentacji) w celu ich ujednoczenia, w przypadku korzystania z archiwalnych opracowań, w których badania wykonane zostały zgodnie z PN-88/B-04481.

Literatura

- Casagrande A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, Vol. 13, No. 8, 121-136.
- Casagrande A. (1958). Notes on the design of the liquid limit device. *Geotechnique*, Vol. 8, No. 1, 84-91.
- Farrell E. (1997). Fall cone study. *Ground Engineering*, Vol. 30, No. 1, 33-36.
- Hansbo S. (1957). A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall cone test. *Proceedings of the Royal Swedish Geotechnical Institute*, Stockholm, No. 14, 7-48.
- Karlsson R. (1977). (in cooperation with the Laboratory Committee of the Swedish Geotechnical Society) Consistency limits. Documents D6.
- Myslińska E. (2010). Laboratoryjne badania gruntów i gleb. *Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego*, Warszawa.
- Sherwood P. T., Ryley M. D. (1970). An investigation for a cone-penetrometer method for the determination of the liquid limit. *Geotechnique*, Vol. 20, No. 2, 203-208.
- Sowers G. F., Vesic A., Grandolfi M. (1959). Penetration test for liquid limit. *American Society for Testing and Materials*, Special Technical Publication No. 254, 216-224.

EFFECT OF METHODOLOGY ON DETERMINING THE ATTERBERG LIMITS FOR LIQUIDITY INDEX

Abstract: The paper presents methodology for the determination of liquid limit by fall cone test in accordance with the recommendations of PN- EN 1997-2:2009 (Eurocode 7) and PKN-CEN ISO / TS 17892-12:2009 (in article defined as ST 12). The results of liquidity index obtained by fall cone test according to PN-88/B-04481 and ST 12 were analyzed for the three types of soil: sandy clays (clSa, sasiCl), coherent sandy clays (clSa, sasiCl) and clays (Cl, saciCl, saCl). The scope of the study made it possible to determine how the change of the method and interpretation of the results affects the values of liquidity index. The statistical dependencies between the liquidity index marked as ST 12 ($I_{L\ ISO}$) and liquidity index marked as PN-88/B-04481 ($I_{L\ PN}$) were shown.