

PROPOZYCJA OBIEKTYWIZACJI MAKROSKOPOWEJ OCENY KONSYSTENCJI PENETROMETREM TŁOCZKOWYM

Edyta Majer, Paweł Pietrzykowski

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa

Streszczenie. W trakcie dokumentowania badań podłoża na potrzeby budowy odcinka autostrady A1 wykonano ponad 300 pomiarów metodą penetrometru tłoczkowego na zróżnicowanych litogenetycznie próbkach z rdzeni kategorii A klasy jakości 1. Wytrzymałość na jednoosiowe wciskanie zweryfikowano badaniami laboratoryjnymi wilgotności naturalnej (w_n), granicy plastyczności (w_p) i granicy płynności (w_L), na podstawie których określono stopień plastyczności (I_L) i wskaźnik konsystencji (I_C). Otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej i odniesiono do dotychczas publikowanych zależności między stopniem plastyczności a wytrzymałością na jednoosiowe wciskanie (q_u). Efektem pracy jest propozycja nowej zależności pozwalającej na szybką wskaźnikową ocenę stopnia plastyczności w celu obliczenia wskaźnika konsystencji.

Słowa kluczowe: penetrometr tłoczkowy, penetrometr wciskowy, stopień plastyczności, wskaźnik konsystencji

WSTĘP

Metodą makroskopową w badaniach podłoża określa się rodzaj gruntu, jego stan i niektóre cechy fizyczne. Z założenia taką ocenę wykonuje się bez pomocy dodatkowych przyrządów, polegając tylko na subiektywnym oszacowaniu wielkości ziaren, ich procentowej zawartości oraz na obserwacji zachowania się badanej próbki pod wpływem wody lub w wyniku jej ściskania, wstrząsania, waleczkowania itd. Według Wysokińskiego [2007], w odróżnieniu od wielu innych klasyfikacji, powiązane z Eurokodem 7 [PN-EN 1997-2:2009] normy PN-EN ISO 14688-1:2006 i PN-EN ISO 14688-2:2006 klasyfikują grunt wyłącznie makroskopowo. Tak określona nazwa gruntu nie wymaga sprawdzenia badaniami laboratoryjnymi. W punkcie NA.1 normy PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012 podany jest jednak przykład możliwej klasyfikacji gruntów opartej tylko na uziarnieniu

Adres do korespondencji – Corresponding author: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Laboratorium Analiz Geologiczno-Inżynierskich, ul. Jagiellońska 76, 03-301 Warszawa, e-mail: edyta.majer@pgi.gov.pl

z wykorzystaniem procentowej zawartości poszczególnych frakcji. Stosowalność nazewnictwa wynikającego z normy PN-EN ISO 14688-1:2006 jest zatem sprawą dyskusyjną, podnoszoną już w artykułach m.in. przez Gołębiowską [2011]. Inne niż uziarnienie cechy gruntu mogą być łatwiej weryfikowane w laboratorium na próbkach o różnych kategoriach i klasach jakości. Za każdym razem takie badanie obiektywizuje makroskopową ocenę obserwatora, lecz zajmuje więcej czasu i wymaga nie zawsze dostępnego sprzętu laboratoryjnego. Przy analizie makroskopowej gruntów drobnoziarnistych i organicznych, według punktu NA.1 normy PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012, należy podać wynik oznaczenia ich plastyczności (mała lub duża). Norma PN-EN ISO 14688-2:2006 w punkcie 4.4 na podstawie badań laboratoryjnych zaleca klasyfikowanie gruntów drobnoziarnistych z zastosowaniem terminów: nieplastyczny, mało plastyczny, średnio plastyczny i bardzo plastyczny. Sposób makroskopowego oznaczania konsystencji został zaproponowany w normie PN-EN ISO 14688-1:2006 w punkcie 5.14 – od miękkoplastycznej do bardzo zwartej. Dla pyłów i ilów laboratoryjnie można także oznaczyć konsystencję – od zwartej do bardzo miękkoplastycznej, według tablicy 6 normy PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012. Praktyka dokumentacyjna pokazuje jednak, że badania laboratoryjne granic konsystencji, jeśli są w ogóle wykonywane, to w niewielkiej liczbie, a profile gruntowe w modelu geologicznym ograniczone są do jakościowej oceny plastyczności na podstawie terenowych badań makroskopowych. Różny poziom doświadczenia dokumentatorów i ich subiektywne oceny powodują, że otrzymywane wyniki są często znacznie rozbieżne z parametrami zweryfikowanymi w laboratorium. Autorzy uważają, że niektóre badania uznawane za uzupełniające mogą być przydatne w trakcie dokumentowania badań podłoża gruntowego. Dodatkowym atutem zaproponowanego rozwiązania będzie obiektywizacja badania konsystencji gruntów spoistych.

METODYKA BADAŃ

Przykładem urządzeń uzupełniających badania makroskopowe były, według normy PN-B-04481:1988, penetrometr tłoczkowy (wciskowy – PP) i ścinarka obrotowa. Jako proste i użyteczne narzędzie służyły one ogólnej ocenie właściwości wytrzymałościowych gruntów, z zastrzeżeniem, że uzyskane wartości z metody PP nie mogą być podstawą do obliczeń według normy PN-B-03020:1981 [PN-B-04481:1988]. Penetrometry różnej produkcji pozwalały odczytać bezpośrednio wartość spójności gruntu $c = c_u$, przy założeniu wartości kąta tarcia wewnętrznego $\varphi = 0^\circ$ lub na podstawie przeliczenia granicznej siły wciskania (Q_f), według zależności: $c = Q_f/2$, lub innych, zależnych od producenta urządzenia. Aktualność tych pomiarów została utrzymana w normie PN-EN ISO 14688-2:2006 w uwadze, w punkcie 5.3, w rozdziale „Inne kryteria przydatne w klasyfikowaniu gruntów”. Na wartości parametrów wytrzymałościowych bezpośrednio przełożenie ma plastyczność (zwięzłość) gruntów w połączeniu z wilgotnością, co liczbowo opisuje się stopniem plastyczności (I_L) lub wskaźnikiem konsystencji (I_C), pozostającym w zależności ze stopniem plastyczności zgodnej ze wzorem: $I_C = 1 - I_L$. Norma PN-EN ISO 14688-1:2006 w punkcie 5.8 ograniczyła oznaczanie makroskopowe plastyczności do waleczkowania na gładkiej powierzchni z uwagą, że mała plastyczność wskazuje na dużą zawartość pyłu, podczas gdy duża plastyczność odpowiada dużej zawartości łu.

Powyższe oceny mają charakter subiektywny. Parametry wytrzymałościowe c i φ , określone urządzeniami kieszonkowymi, nie są wskazane w projektowaniu, jednak stosowność penetrometru tłoczkowego wciąż jest przydatna do oceny stopnia plastyczności (I_L). Przykładem są specyfikacje istotnych warunków zamówienia, które w odpowiednich punktach dotyczących zakresu badań w ramach dokumentacji geologiczno-inżynierskich (np. na potrzeby projektu siedziby Muzeum Historii Polski, w rejonie Jazdów – Trasa Łazienkowska w Warszawie, maj 2013 r.) przywołują badania penetrometrem tłoczkowym. W normach, instrukcjach i podręcznikach penetrometr tłoczkowy na stałe wszedł w użycie po wydaniu opracowania „Penetrometr wciskowy PW-1. Tymczasowa instrukcja obsługi” przez Ośrodek Badawczo Rozwojowy Techniki Geologicznej (OBRTG) w 1977 roku, gdzie umieszczono nomogram dla stopnia plastyczności (I_L) w funkcji wartości wytrzymałości na jednoosiowe wciskanie (q_u) – rysunek 1. Pierwszym takim polskim opracowaniem był jednak artykuł Piotrowskiego [1971], który opisywał podobnie działające urządzenie do pomiaru głębokości wpedu końcówki i jej korelacji na podstawie nomogramu ze stopniem plastyczności z dostateczną dokładnością dla praktycznych potrzeb. Penetrometr tłoczkowy opisał także Piaskowski [1974], który za producentem „Soiltest” podał, że skala urządzenia, przy założeniu $\varphi = 0^\circ$, odpowiada wytrzymałości na ściskanie próbek, czyli podwójnej wartości spójności gruntu. Przedstawione wyniki na podstawie pomiarów penetrometrem zostały skorelowane z pomiarami wytrzymałości na ścinanie metodą stożka. Pierwsze zależności badań penetrometrem tłoczkowym i parametrami stanu gruntu podaje „Instrukcja wykonywania badań wytrzymałości na ścinanie przyrządami kieszonkowymi” [Kłosiński 1974]. Jej autor określił orientacyjne wartości stopnia plastyczności gruntów spoistych normalnie konsolidowanych i gruntów spoistych przekonsolidowanych dla odpowiadających im odczytów wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie gruntów określonych penetrometrem tłoczkowym na próbkach o naturalnej strukturze NNS lub próbkach z sondy cylindrycznej SPT (tab. 1 i 2).

Tabela 1. Orientacyjne wartości stopnia plastyczności gruntów spoistych normalnie konsolidowanych

Table 1. Evaluation of liquidity index of normally consolidated cohesive soils

Konsystencja gruntu Consistency of soil	Stopień plastyczności Liquidity index I_L [-]	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie Unconfined compression strength q_u [kPa]
Bardzo miękka – Extremely soft	> 0,75	< 25
Miękkoplastyczna – Very soft	0,75–0,50	25–50
Plastyczna – Soft	0,50–0,25	50–100
Twardoplastyczna – Firm	0,25–0	100–200
Półzwarda – Stiff	< 0	200–400
Zwarty – Very stiff	< 0	> 400

Źródło: Na podstawie Kłosińskiego [1974].

Source: By Kłosiński [1974].

Tabela 2. Orientacyjne wartości stopnia plastyczności gruntów spoistych przekonsolidowanych
 Table 2. Evaluation of liquidity index of overconsolidated cohesive soils

Konsystencja gruntu Consistency of soil	Stopień plastyczności Liquidity index I_L [-]	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie Unconfined compression strength q_u [kPa]
Twardoplastyczna – Firm	0,25–0	200–400
Półzwarda – Stiff	< 0	400–600
Zwarty – Very stiff	< 0	> 600

Źródło: Na podstawie Kłosińskiego [1974].

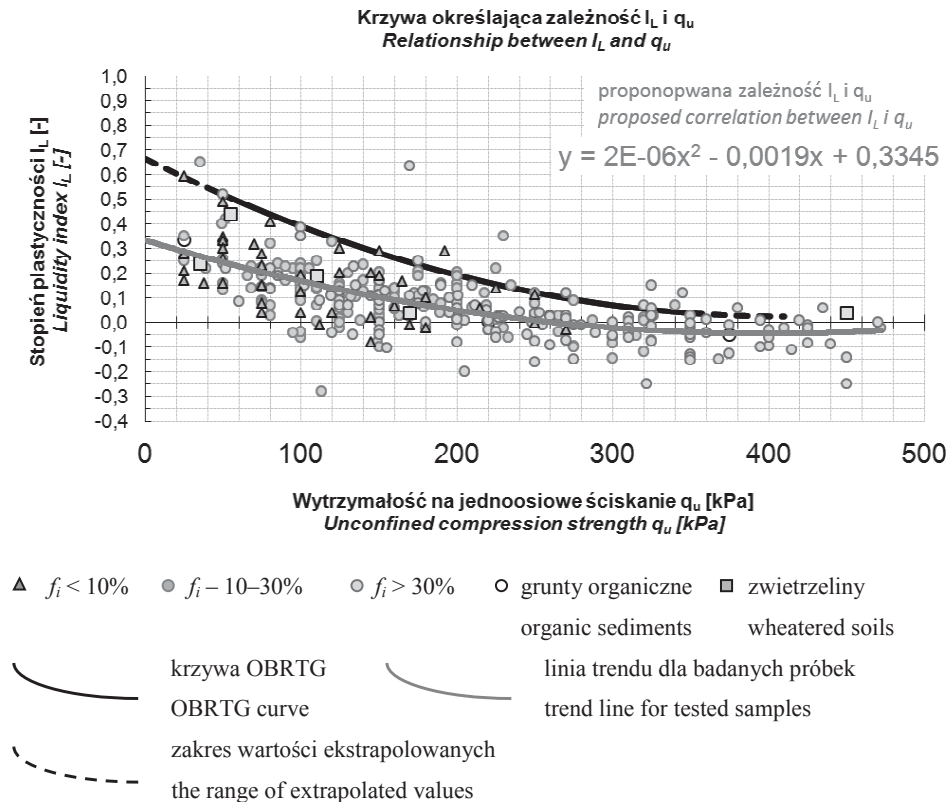
Source: By Kłosiński [1974].

Nomogramu OBRTG nie przywołano w odpowiednich punktach normy PN-B-04481:1988, dotyczących zasad i zastosowania pomiarów przy badaniach penetrometrem tłoczkowym, ale wyniki stopnia plastyczności (I_L), otrzymane na jego podstawie, z powodzeniem stosowano w opracowaniach dokumentacyjnych jako parametry wiodące.

MATERIAŁ BADAWCZY I WYNIKI

Przywołanie penetrometru tłoczkowego w powiązanej z Eurokodem 7, cz. 2, normie PN-EN ISO 14688-2:2006 pozwoliło autorom na wykorzystanie urządzenia w pracach dokumentacyjnych dla autostrady A1 na rdzeniach wiertniczych odpowiadających próbkom kategorii A, pierwszej klasy jakości. Wyniki obliczeń stopnia plastyczności (I_L) na podstawie oznaczeń wilgotności naturalnej, granic plastyczności i granic płynności metodą penetrometru stożkowego 333 próbek zestawiono z pomiarami wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, określone za pomocą końcówki penetrometru tłoczkowego, wykonanymi na próbkach rdzeniowych gruntów. Badania wykonano zgodnie z normami: PKN-CEN ISO/TS 17892-1:2009, PN-EN ISO 14688-1:2006 i PKN-CEN ISO/TS 17892-6:2009. Materiał badawczy stanowiły piaski gliniaste i gliny zlodowceń południowopolskich, przekonsolidowane iły triasowe i iły batońskie, pyły i gliny pylaste dolin rzecznych, zwierzeliny skał węglanowych i klastycznych oraz grunty organiczne. Największy udział stanowił materiał gliniasty o zawartości frakcji iłowej $f_i = 10$ –30% (46%) i iły o zawartości frakcji iłowej $f_i > 30\%$ (39%). Otrzymane wyniki zestawiono z krzywą określającą zależność stopnia plastyczności (I_L) z wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie określoną za pomocą wciskania końcówki penetrometru według OBRTG (rys. 1)

Na podstawie 333 pomiarów wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (q_u), określonej za pomocą wciskania końcówki penetrometru, zaobserwowano różnicę w stosunku do równania zaproponowanego w OBRTG (rys. 1) oraz zbliżone wartości w przedziale 100–200 kPa do wyników otrzymanych przez Kłosińskiego [1974] (tab. 1). W analizie regresji zdecydowano się na funkcję wielomianową drugiego stopnia w celach porównawczych z funkcją zaproponowaną 35 lat temu przez OBRTG. Przy takim założeniu siła



Rys. 1. Krzywa i równanie określające zależność stopnia plastyczności (I_L) i wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (q_u) badanych gruntów na tle krzywej OBRTG [1977]*

Fig. 1. Relationship with equation between liquidity index (I_L) and unconfined compression strength (q_u) of tested soils with the curve from OBRTG [1977]

zależności wyrażona kwadratem korelacji iloczynu momentów Pearsona wyniosła $R^2 = 0,4527$. Ze względu na zakres posiadanych pomiarów q_u oraz ekstremum funkcji wykładniczej opisującej zależność między q_u i I_L autorzy na tym etapie proponują ograniczenie zakresu oznaczalności od 20 do 350 kPa.

PODSUMOWANIE

Zaproponowana krzywa jest dobrym przybliżeniem analizowanych zależności, a w miarę przyrostu liczby danych będzie aktualizowana. Przy analizie danych bardzo przydatne okazały się archiwalne opracowania. Zależność OBRTG, opisana krzywą i wzorem, stanowi cenny materiał porównawczy, wynikające zaś z ówczesnej nomenklatury wydzielenia konsystencji i odpowiadające im przedziały analizowane przez Kłosińskiego [1974] są podobne do zaproponowanych w najnowszej poprawce do norm klasyfikacyjnych PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012. Szczegółne podobieństwo widać

w określeniu konsystencji dla gruntów charakteryzujących się stopniem plastyczności $I_L > 0,75$ – bardzo miękka ($I_C < 0,25$ – bardzo miękkoplastyczna), która nie była używana przez około 25 lat praktyki dokumentacyjnej.

Do oceny konsystencji na podstawie penetrometru tłoczkowego nie ma wyraźnych wskazań w obowiązujących normach klasyfikacyjnych ani w powiązanim z nimi Eurokodzie 7, ale przydatność tej metody wydaje się być wciąż aktualna. Słowo „plastyczność” w normach jest odnoszone zarówno do zwięzłości [PN-EN ISO 14688-1:2006, pkt 5.8] jak i do oceny konsystencji: miękkoplastyczny, plastyczny, twaroplastyczny, zwarty i bardzo zwarty [PN-EN ISO 14688-1:2006, pkt 5.14]. Norma PN-EN ISO 14688-2:2006 w punkcie 4.4 na podstawie laboratoryjnych badań granic Atterberga zaleca klasyfikowanie gruntów drobnoziarnistych jako: nieplastyczne, mało plastyczne, średnio plastyczne i bardzo plastyczne. Poprawiona w PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012 tabela do określania konsystencji na podstawie wskaźnika konsystencji (I_C), niezależna od wydzielenia plastyczności z punktu 4.4, rozróżnia konsystencje: bardzo miękkoplastyczną, miękkoplastyczną, plastyczną, twaroplastyczną i zwartą, co nie jest w pełni zgodne zarówno z punktem 4.4 poprawianej normy, jak i z punktem 5.14 normy PN-EN ISO 14688-1:2006. Brak precyzyjności powoduje zaobserwowane przez autorów w ramach doświadczeń rozbieżności w klasyfikacji i ocenie badanych gruntów pod względem oceny ich plastyczności. Dodatkowo subiektywna ocena zachowania się gruntów w trakcie ich formowania, naciskania, wałeczkowania itp. powoduje, że ocena plastyczności gruntu nie jest prawidłowa. Przywrócenie oceny stopnia plastyczności (I_L) na podstawie pomiarów penetrometrem tłoczkowym i jego przeliczenie na wskaźnik konsystencji (I_C) wpasowuje się w nomenklaturę norm klasyfikacyjnych PN-EN ISO 14688-1 i 2:2006. Jego oszacowanie i odniesienie do konsystencji w PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012 zobiektywizuje pomiary i rozwiąże problem nomenklatury. Zdaniem autorów, nie należy zastępować makroskopowej metody oceny konsystencji gruntu badaniem penetrometrem, lecz powinno się ją wykorzystywać jako ich uzupełnienie. Autorzy z powodzeniem stosują badania penetrometrem tłoczkowym jako wskaźnikowy pomiar i obiektywną ocenę plastyczności w opracowaniach dokumentacyjnych.

PIŚMIENNICTWO

- Gołębiewska A., 2011. Uwagi krytyczne do klasyfikacji gruntów według normy PN-EN ISO 14688:2006. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego 446:289-296.
- Kłosiński B., 1974. Instrukcja wykonywania badań wytrzymałości na ścinanie przyrządami kieszonkowymi. Geoprojekt, Przedsiębiorstwo Geologiczno-Fizjograficzne i Geodezyjne Budownictwa, Dział Studiów i Postępu Technicznego, Warszawa.
- OBRTG – Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Techniki Geologicznej, 1977. Penetrometr wciskowy PW-1. Tymczasowa instrukcja obsługi. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Piaskowski A., 1974. Proste przyrządy do oznaczania mechanicznych własności gruntów. Inżynieria i Budownictwo 6, 265–270.
- Piotrowski M., 1971. Przyrząd mechaniczny do oznaczania stanu gruntu. Przegląd Geologiczny 6, 296–297.
- PKN-CEN ISO/TS 17892-1:2009 Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 1 – Oznaczanie wilgotności.

- PKN-CEN ISO/TS 17892-6:2009 Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Część 6 – Badanie penetrometrem stożkowym.
- PN-B-04481:1988 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
- PN-EN ISO 14688-1:2006 Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 1 – Oznaczenie i opis.
- PN-EN ISO 14688-2:2006 Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2 – Zasady klasyfikowania.
- PN-EN ISO 14688-2:2006/Ap2:2012 Badania geotechniczne. Oznaczenie i klasyfikowanie gruntów. Część 2 – Zasady klasyfikowania.
- Wysokiński L., 2007. Komentarz do nowych norm klasyfikacji gruntów. Instrukcje. Wytyczne. Poradniki. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.

VALIDATION PROPOSAL OF MACROSCOPIC ANALYSIS OF SOILS' CONSISTENCY BY POCKET PENETROMETER

Abstract. More than 300 pocket penetrometr tests were done on core barrel samples in the course of research the ground for the construction of A1 motorway in Poland. Compressive strength of soil was verified by laboratory tests of water content (w_n), plasticity limit (w_p) and liquidity limit (w_L), which were used for determination of liquidity index (I_L) and consistency index (I_C). The results were processed statistically and related to previously published correlations between liquidity index (I_L) and compressive strength (Q_f). The result of work is a new proposal of correlation enabling rapid estimation of the liquidity and consistency indexes.

Key words: pocket penetrometer, liquidity index, consistency index

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.07.2013