

Porównanie wyników badania sondą krzyżakową i penetrometrem tłoczkowym jako przykład lokalnych zależności korelacyjnych

Comparison of the results of field vane tests and pocket penetrometer tests as an example of local correlations

Tomasz Bardel

¹„Geogrunt” PPUP sp. z o.o., ul. Zagumnie 49a, 33-100 Tarnów, Poland

Artykuł oryginalny

Abstrakt

Badania polowe i laboratoryjne gruntów dostarczają dużą ilość danych, jednak większość z nich stanowią parametry pomierzone, które z wykorzystaniem różnych wzorów i korelacji przelicza się na parametry wykorzystywane do projektowania. Stosowanie ogólnych korelacji do ich przeliczania nie zawsze prowadzi do uzyskania kompatybilnych wartości, dlatego pożądane jest poszukiwanie lokalnych zależności korelacyjnych. W niniejszym artykule przedstawiono zależność korelacyjną pomiędzy wytrzymałością na ścinanie bez odplywu uzyskiwaną z sondy krzyżakowej FVT i penetrometru tłoczkowego dla glin zwałowych rejonu Tarnowa. Na podstawie tej korelacji opracowano krzywą zależności oporu wcisku penetrometru tłoczkowego i stopnia plastyczności. Korelację tę wykorzystano następnie przy badaniu mady gliniastych doliny Dunajca, uzyskując wysokie wartości współczynnika korelacji. Otrzymane wyniki potwierdzają przydatność penetrometru tłoczkowego jako metody szybkiego określania wytrzymałości na ścinanie bez odplywu oraz stopnia plastyczności.

Abstract

Field and laboratory tests of soils provide a large amount of data, but most of them are measured parameters, which are converted by various formulas and correlations into parameters used for design. General correlations does not always lead to obtaining compatible values, therefore it is desirable to search for local correlations. This article presents the correlation between the undrained shear strength from the field vane tests (FVT) and the pocket penetrometer for tills in the Tarnów region. On the basis of this correlation, a dependence curve of the unconfined compressive strength measured by pocket penetrometer and the liquidity index was developed. This correlation was then used of river's clay muds in the Dunajec valley. The high values of the correlation coefficient were obtained. The results confirm the usefulness of the pocket penetrometer as a method of quick determination of the undrained shear strength and liquidity index.

Słowa kluczowe

- parametry geotechniczne gruntów
- wytrzymałość na ścinanie bez odplywu
- stopień plastyczności
- gliny zwałowe
- mady gliniaste
- Tarnów

Korespondencja

Tomasz Bardel

e-mail: jatomak@interia.pl
„Geogrunt” PPUP sp. z o.o.
ul. Zagumnie 49a
33-100 Tarnów, Poland
tel. +48 501 265 398

Informacje o artykule

Historia artykułu (Article history)

- Otrzymano (Received): 2022-09-13
- Zaakceptowano (Accepted): 2023-03-05
- Opublikowano (Published): 2023-03-31

Wydawca (Publisher)

Akademia Nauk Stosowanych w Tarnowie
University of Applied Sciences in Tarnow
ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnow, Poland

Licencja (User license)

© by Author. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License CC-BY-SA.

Finansowanie (Financing)

Badania nie zostały sfinansowane z grantów pochodzących ze środków publicznych, organizacji komercyjnych lub non-profit.

Konflikt interesów (Conflict of interest)

Nie zadeklarowano konfliktu interesów.

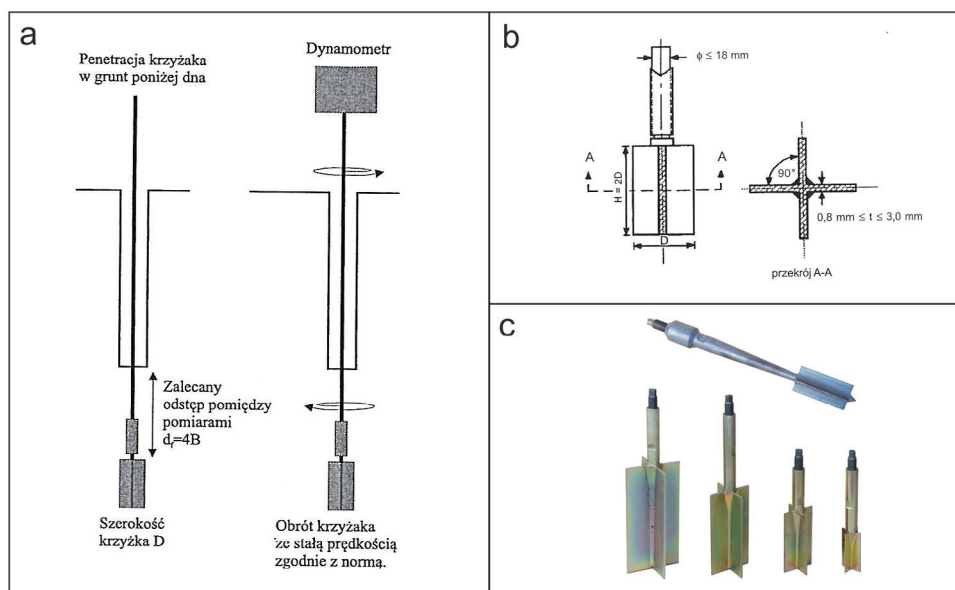
Wstęp

Zmiany przepisów prawa budowlanego (art. 34) spowodowały, że w ramach ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych jedynym dokumentem, który wchodzi w skład zatwierdzonego w urzędzie projektu architektoniczno-budowlanego jest opinia geotechniczna [1]. Dokumentacja badań podłoża gruntowego oraz opracowywana w określonych przypadkach dokumentacja geologiczno-inżynierska wchodzi w skład projektu technicznego, który nie podlega zatwierdzeniu. Powoduje to wzrost rangi opinii geotechnicznej, która stanowi zasadniczy dokument określający warunki gruntowe podłoża budowlanego i ustala przydatność gruntów na potrzeby budownictwa [2]. Zawartość opinii geotechnicznej w sensie prawnym reguluje Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych [2]. Zgodnie z przepisami dla obiektów pierwszej kategorii geotechnicznej (niewielkich obiektów budowlanych, m.in. domów jednorodzinnych), zakres badań geotechnicznych może być ograniczony do wierceń i sondowań oraz określenia rodzajów gruntów na podstawie analizy makroskopowej, a wartości parametrów geotechnicznych mogą być określone na podstawie lokalnych zależności korelacyjnych [2; par. 6 ust. 2]. Poszukiwanie tych zależności stanowi więc wyzwanie dla współczesnej geologii inżynierskiej [3]. Szczególne znaczenie ma ustalanie zależności pomiędzy wynikami badań bezpośrednich danego parametru (np. wytrzymałości na

ściananie) a wynikami innych badań, które służą oznaczeniu specyficznych cech podłoża (np. oporu na wciskanie lub wbijanie) i które same w sobie nie stanowią wielkości służących projektowaniu, ale ich wyniki można powiązać z wartościami parametrów geotechnicznych [4]. W niniejszym artykule przedstawione zostaną lokalne zależności korelacyjne pomiędzy wytrzymałością na ściananie bez odpływu z badania sondą krzyżakową (obrotową) i oporem wcisku penetrometru tłoczkowego oraz ich powiązanie ze stopniem plastyczności.

Materiały i metody

Parametry geotechniczne do projektowania uzyskiwane są z badań polowych lub laboratoryjnych. Jednym z badań polowych jest ściananie sondą krzyżakową (FVT), które służy do oznaczania wytrzymałości na ściananie w warunkach bez odpływu, inaczej zwanej niedrenowaną wytrzymałością na ściananie oznaczanej dawniej symbolem τ_b , obecnie najczęściej s_u wyrażoną w kPa. Badanie to, w najczęściej stosowanej i najprostszej wersji, polega na wprowadzeniu w grunt żerdzi z końcówką zakończoną krzyżakiem („skrzydełkiem”), a następnie ścięciu gruntu poprzez obrót żerdzi kluczem dynamometrycznym (rysunek 1). Wprowadzenie sondy w grunt może odbywać się poprzez wciskanie lub wbijanie w dno otworu wiertniczego. Autor sugeruje wciskanie sondy w dno otworu, natomiast w przypadku zwartych gruntów o wysokiej spoistości (glin zwięzłych lub ilów) – wprowadzenie krzyżaka poprzez wbijanie.



Rysunek 1. a) Schematyczna procedura badania sondą krzyżakową FVT [5; rys. 4.72 zmod.]; b) Geometria końcówki pomiarowej według PN-EN ISO 22476-9 [6]; c) najczęściej stosowane końcówki sondy FVT/SLVT [7]

Mierzony jest maksymalny moment obrotowy wywołujący ściecie. Wartość momentu granicznego przeliczana jest na wytrzymałość na ścinanie bez odpływu według wzoru [8]:

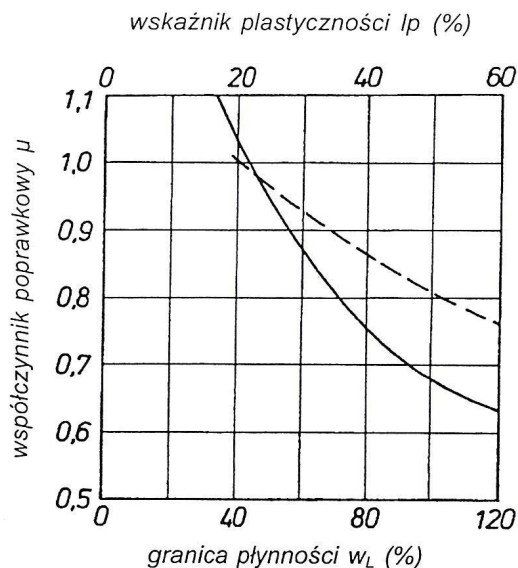
$$s_u = \frac{Mf_{max}}{K_{VT}} \quad [\text{kPa}]$$

gdzie:

Mf_{max} – największa wartość momentu w czasie wykonywania obrotu [Nm];

K_{VT} – współczynnik zależny od wymiarów końcówki wynoszący 0,23 mm³ w przypadku krzyżaka o wymiarach 80 × 40 mm.

Badaniu FVT mogą podlegać wszystkie grunty spiste, z wyłączeniem takich, które zawierają znaczne ilości kamieni lub otoczków, a więc żwiry i pospółki gliniaste, rumosze gliniaste oraz piaski gliniaste i gliny piaszczyste z zawartością kamieni. W zależności od zwięzłości gruntów (wskaźnika plastyczności I_p lub granicy płynności w_L) stosuje się współczynnik poprawkowy μ odczytywany z poniższego diagramu (rysunek 2). Skorygowana wartość wytrzymałości na ścinanie bez odpływu wykorzystywana do projektowania stanowi iloczyn wartości obliczonej s_u i współczynnika μ [5,8–10, por. 11]. Autor w prowadzonych przez siebie badaniach wykorzystywał wartości współczynnika μ w zależności od wskaźnika plastyczności.



Rysunek 2. Współczynniki poprawkowe (korekcyjne) μ w zależności od wskaźnika plastyczności I_p (linia przerywana) i granicy płynności w_L (linia ciągła) [9].

W badaniu FVT najczęściej stosowana jest końcówka sondy o wysokości 80 mm i szerokości 40 mm. W gruntach o niskiej wytrzymałości stosuje się końcówkę o większej szerokości. Z doświadczeń praktycznych autora wynika, że stosowanie najpopularniejszej końcówki o wymiarach 80 × 40 mm daje wiarygodne wyniki w gruntach, w których s_u wynosi przynajmniej 60 kPa [por. 5,10]. Stosowane najczęściej klucze dynamometryczne do pomiaru momentu obrotowego pozwalają ustalić wartość wytrzymałości na ścinanie z dokładnością nie mniejszą niż 2 kPa [7]. Z badania sondą FVT uzyskiwana jest wartość parametru geotechnicznego jakim jest wytrzymałość na ścinanie bez odpływu (s_u), która może być wprost wykorzystana do wyznaczania nośności fundamentów [5,12]. Oznaczanie wytrzymałości na ścinanie z wykorzystaniem sondy krzyżakowej uznane jest jako zalecane i przydatne także w przypadku badania podłoża nawierzchni drogowych [13].

Wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu w warunkach laboratoryjnych można uzyskać w badaniu penetrometrem stożkowym [14,15], a także w badaniu jednoosiowego (prostego) ściskania, poprzez pionowe obciążanie walcowej próbki o wymiarach najczęściej 76 × 38 mm (rysunek 3). Wartość wytrzymałości na ścinanie bez odpływu określana jest jako połowa pomierzonej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie [16]. Badanie to jest szczególnie popularne w USA i w Kanadzie, a jego wyniki z powodzeniem są wykorzystywane do projektowania posadowienia fundamentów.



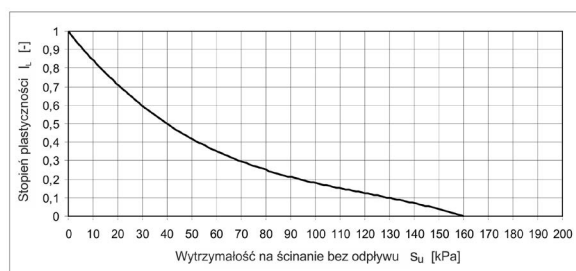
Rysunek 3. Próbką iltu po zakończeniu badania jednoosiowego ściskania

Według normy PN-B-04452:2002 wartość wytrzymałości na ścinanie bez odpływu może służyć do określenia stanu gruntu (tabela 1).

Tabela 1. Zależność między stanem gruntu a wytrzymałością na ścinanie bez odplywu

Stan gruntu	Stopień plastyczności I_L	Wytrzymałość na ścinanie bez odplywu s_u [kPa]
Miękkoplastyczny	$I_L > 0,50$	0–40
Plastyczny	$0,25 < I_L \leq 0,50$	40–80
Twardoplastyczny	$0 < I_L \leq 0,25$	80–160
Półzwały	$I_L \leq 0,0$	> 160

Połączenie przedziałów wartości wytrzymałości na ścinanie bez odplywu podanej dla określonego stanu gruntu (zakresu wartości stopnia plastyczności) określa zależność wytrzymałości na ścinanie s_u i stopnia plastyczności I_L (rysunek 4).



Rysunek 4. Zależność między wytrzymałością na ścinanie bez odplywu a stopniem plastyczności

Doświadczenia praktyczne autora w powiązaniu z badaniami porównawczymi (oznaczanie stopnia plastyczności w badaniu metodą Casagrande'a) wskazują, że stosunkowo wysoka dokładność i powtarzalność wyników oznaczania wartości s_u w sondowaniu FVT pozwala na wiarygodne określenie stopnia plastyczności w oparciu o powyższą zależność korelacyjną [17]. Metoda ta często stosowana jest w ramach badań kontrolnych na potrzeby odbiorów dna wykopów fundamentowych w czasie realizacji inwestycji [5].

Oszacowanie wartości wytrzymałości na ścinanie bez odplywu jest możliwe także w badaniu penetrometrem tłoczkowym (kieszonkowym) wykonywanym przy okazji badań makroskopowych. Polega ono na pomiarze oporu wciskania (siły wciskania) końcówki penetrometru w próbkę gruntu pobraną podczas wiercenia (rysunek 5). Mierzona jest maksymalna wartość oporu wcisku (graniczna siła wciskania) Q_f najczęściej z dokładnością do 12,5 kPa.



Rysunek 5. Penetrometr tłoczkowy (kieszonkowy) produkcji Humbolt Mfg. Co. IL USA [18]

Wartość wytrzymałości na ścinanie bez odplywu stanowi połowę oporu wcisku penetrometru tłoczkowego $s_u = Q_f / 2$ [kPa, na penetrometrach produkcji amerykańskiej w kg/cm^2]. Badanie jest przydatne dla gruntów spoistych z wyłączeniem pyłów, pyłów piaszczystych, piasków gliniastych oraz rumoszy, żwirów i pospółek gliniastych. Wysoka zbieżność wyników badania uzyskiwana jest szczególnie dla gruntów, których spójność jest kilkukrotnie wyższa niż kąt tarcia wewnętrznego (iły i wszystkie typy glin zwięzłych). Na podstawie opracowanej w 1974 r. instrukcji OBRTG możliwe jest oszacowanie wartości stopnia plastyczności w oparciu o wartości oporu wcisku penetrometru tłoczkowego w grunt [19]. Korelacja ta ma jednak charakter ogólny i nie odnosi się do konkretnych typów gruntów w danym rejonie, stąd nie stanowi lokalnej zależności korelacyjnej.

Wyniki i dyskusja

Ustalenie korelacji pomiędzy wytrzymałością na ścinanie bez odplywu z badania sondą krzyżakową FVT i z badania penetrometrem tłoczkowym przeprowadzono w oparciu o badania wykonywane na obszarze Wysoczyzny Tarnowskiej, w północnej części Tarnowa. Wysoczyznę w tym rejonie pokrywa dwudzielna seria glin zwałowych [17]. Gliny zwałowe dolne wykazują niewielkie zróżnicowanie litologiczne. Zalegają one najczęściej bezpośrednio na iłach mioceńskich zapadliska przedkarpacciego, stąd cechuje je podobna do iłów szara barwa. W sensie litologicznym są to gliny pylaste zwięzłe ze średnią zawartością frakcji iłowej wynoszącą 22% [17]. Zróżnicowanie stopnia plastyczności tych glin (I_L w zakresie 0,0–0,22 średnio 0,07) wskazuje, że są w stanie twardoplastycznym [17].

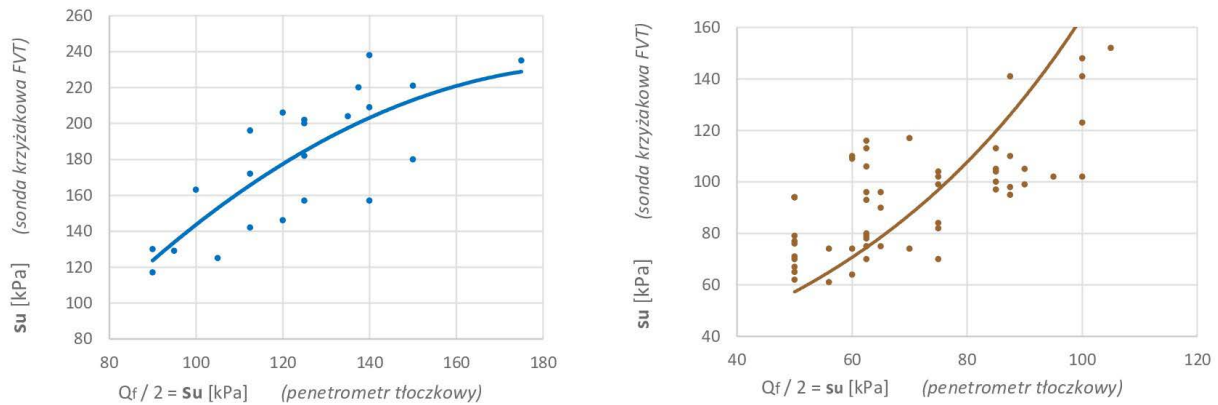
Znacznie większym zróżnicowaniem litologicznymi charakteryzują się gliny zwałowe górne, w skład których wchodzi wszystkie typy gruntów określane mianem glin. Zawartości poszczególnych frakcji są zmienne (zawartość frakcji iłowej w zakresie 10–29%),

przy czym w profilu przeważają gliny piaszczyste związane. Gliny zwałowe górne na terenie Tarnowa wykazują stan twardoplastyczny lub plastyczny (I_L w zakresie 0,03–0,40, przy wartości średniej 0,22) [17].

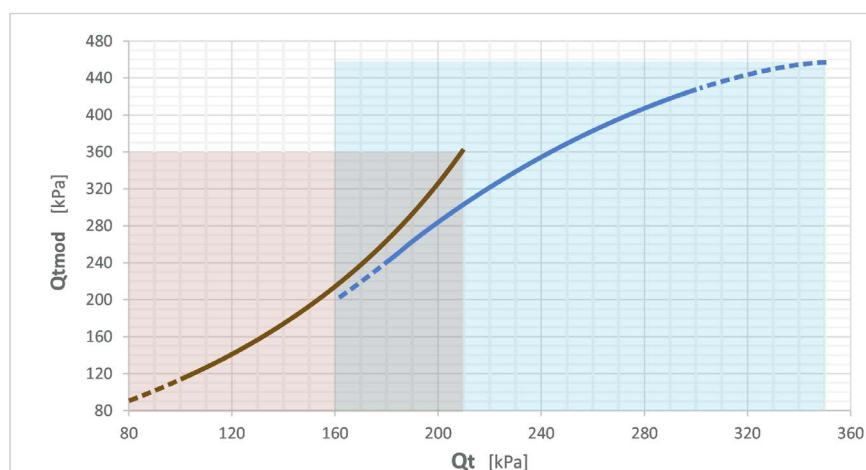
Opisane powyżej cechy glin zwałowych na terenie Tarnowa wskazują na zasadność stosowania sondy krzyżakowej oraz penetrometru tłoczkowego w tych gruntach. Dla ustalenia korelacji pomiędzy wytrzymałością na ścinanie bez odpływu z badania FVT (s_u) i z penetrometru tłoczkowego ($Q_f / 2$) wykorzystano 78 pomiarów wartości oporu ścicia sondy FVT (22 pomiary w glinie zwałowej dolnej i 56 pomiarów w glinie zwałowej górnej) w powiązaniu z licznymi badaniami penetrometrem tłoczkowym na tych samych

interwałach głębokości. W przypadku glin zwałowych dolnych na terenie Tarnowa wartości s_u uzyskane na podstawie sondowania FVT wynosiły w zakresie 114–238 kPa, przy średniej 178 kPa, zaś dla glin zwałowych górnych w zakresie 61–152 kPa, średnio 94 kPa. Wartości te mieszczą się w przedziale określonym przez S. Rybickiego i P. Krokoszyńskiego (2011) według badań na Wysoczyźnie Tarnowskiej (zakres wartości 41–300 kPa, średnio 154 kPa) [20].

Określono zależność korelacyjną pomiędzy wytrzymałością na ścinanie bez odpływu s_u z badania sondą krzyżakową FVT i z badania penetrometrem tłoczkowym $Q_f / 2$ osobno dla gliny zwałowej dolnej i górnej (rysunek 6).



Rysunek 6. Zależność korelacyjną między wartościami wytrzymałości na ścinanie uzyskanymi z badania sondą krzyżakową i penetrometrem tłoczkowym dla gliny zwałowej górnej (linia brązowa) i dolnej (linia niebieska) na terenie Tarnowa



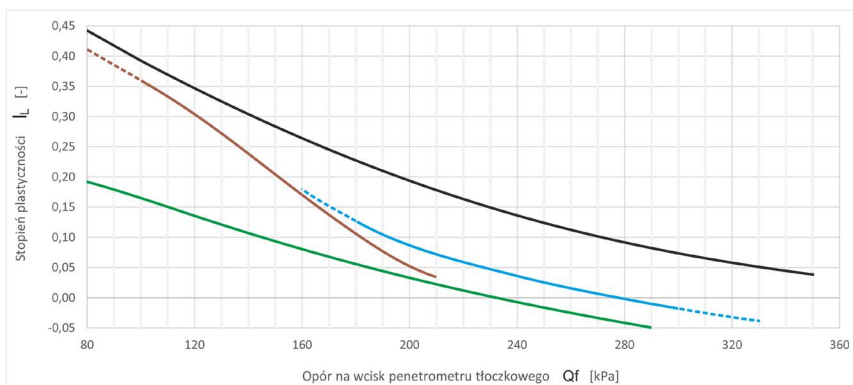
Rysunek 7. Diagram do przeliczania wartości pomierzonej oporu na wcisk penetrometru tłoczkowego na wartość skorygowaną (linia brązowa dla gliny zwałowej górnej, linia niebieska dla gliny zwałowej dolnej rejonu Tarnowa; pola brązowe i niebieskie wskazują zakresy stosowalności)

W oparciu o te zależności korelacyjne opracowano wykres dla przeliczenia pomierzonej wartości oporu na wcisk penetrometru tłoczkowego (Q_f) na wartość skorygowaną (Q_{fmod}), której połowa stanowi poszukiwaną wartość wytrzymałości na ścinanie bez odplywu ($Q_{fmod} / 2 = s_u$) (rysunek 7).

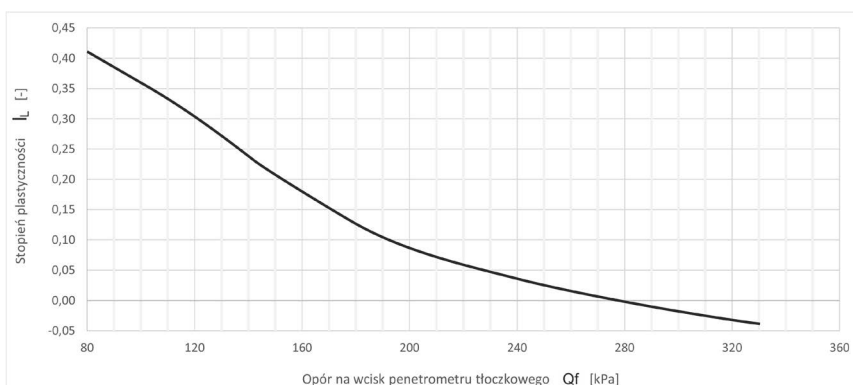
Wykorzystując znane z literatury zależności wytrzymałości na ścinanie bez odplywu s_u i stopnia plastyczności I_L [20,21] oraz bazując na powyżej opisanej lokalnej zależności korelacyjnej Q_f i Q_{fmod} opracowano wykres dla oszacowania wartości stopnia plastyczności I_L na podstawie pomierzonych wartości oporu wcisku penetrometru tłoczkowego (Q_f). Krzywą zależności I_L od Q_f naniesiono na wykres wraz z dwoma innymi krzywymi korelacyjnymi – ogólną krzywą korelacyjną z instrukcji OBRTG (linia czarna) [19] oraz lokalną zależność korelacyjną uzyskaną dla gruntów na przebiegu mazowieckiego odcinka autostrady A1 opracowaną przez E. Majer, P. Pietrzykowski (2018) (linia zielona)

[21]. Uzyskane krzywe korelacyjne dla glin zwałowych rejonu Tarnowa zawierają się w obszarze pomiędzy tym dwoma krzywymi (rysunek 8).

Ostatnim etapem było sprawdzenie, czy możliwe jest zastosowanie uzyskanej korelacji do gruntów o innej genezie, ale o podobnej litologii. Wykorzystano badania wykonywane na dwóch obszarach w obrębie doliny Dunajca, przeprowadzone na madach gliniastych tarasu nadzalewowego w rejonie Tarnowa i Nowego Sącza. Litologicznie mady gliniaste odpowiadały glinom pylastym zwięzłym lub rzadziej glinom pylastym w stanie od półzwałowego do plastycznego. Łącznie uwzględniono wyniki 36 oznaczeń wytrzymałości na ścinanie s_u z sondowania FVT w powiązaniu z badaniami penetrometrem tłoczkowym na tych samych interwałach głębokości. Wykorzystując wartości Q_f wyprowadzone z ujednoczonej zależności I_L od Q_f (rysunek 9) ustalono współczynniki korelacji pomiędzy określeniem stopnia plastyczności w oparciu o wyniki badania sondą FVT i penetrometrem tłoczkowym.

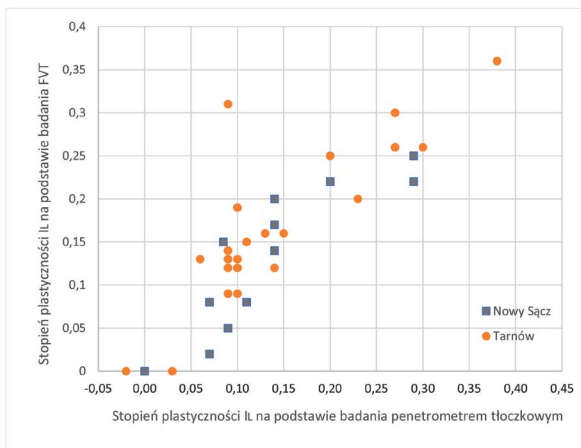


Rysunek 8. Zależność między oporem na wcisk penetrometru tłoczkowego Q_f a stopniem plastyczności I_L dla glin zwałowych rejonu Tarnowa (linia brązowa – glina zwałowa górna, linia niebieska – glina zwałowa dolna)



Rysunek 9. Zależność między oporem na wcisk penetrometru tłoczkowego Q_f a stopniem plastyczności I_L

Współczynnik korelacji dla mad gliniastych w rejonie Tarnowa wynosił $R = 0,88$, zaś w rejonie Nowego Sącza $R = 0,83$. Stosunkowo wysokie wartości współczynnika korelacji wskazują na dość silną korelację, co potwierdza możliwości oszacowania wartości stopnia plastyczności I_L w oparciu o badania penetrometrem tłoczkowym (rysunek 10).



Rysunek 10. Korelacja między wartościami stopnia plastyczności I_L wyznaczonymi w oparciu o sondowanie FVT i badanie penetrometrem tłoczkowym

Podsumowanie

Badania podłoża gruntowego dostarczają wielu wartości parametrów mierzonych, z których jedynie niektóre wykorzystywane są jako parametry do projektowania. W ostatnich kilkunastu latach następuje wzrost roli badań polowych względem oznaczeń laboratoryjnych, gdyż grunt poddawany jest badaniu w warunkach in situ, w stanie quasi-naturalnym, w nieznanym tylko zmienionym stanie naprężenia. Uzyskiwane wartości oznaczanych parametrów dotyczą najczęściej jakiś konkretnych cech gruntu, np. oporu na ścinanie, wciśnięcie czy wbijanie. Z badań polowych można uzyskać wartości różnych parametrów, wykorzystując określone korelacje. Jest to bardzo pomocne przy ustalaniu charakterystycznych wartości parametrów geotechnicznych podłoża służących projektowaniu, jednakże wartości określonych parametrów z ogólnych korelacji uzyskiwane na podstawie wyników badań różnymi metodami niekiedy bardzo się od siebie różnią. Istotne jest zatem poszukiwanie i opracowywanie lokalnych zależności korelacyjnych, które w lepszy sposób opisują współzależności pomiędzy tymi samymi parametrami określanymi z wykorzystaniem różnych metod badania. W przypadku opisywanego ścinania sondą krzyżakową

FVT uzyskiwana jest wartość wytrzymałości na ścinanie bez odplywu, która może zostać wykorzystana do projektowania. Dodatkowo możliwe jest skorelowanie wyników badania sondą FVT z wartościami stopnia plastyczności charakterystycznego dla określonego stanu gruntu. W prostych przypadkach alternatywną metodą oszacowania wytrzymałości na ścinanie, a także stopnia plastyczności może być oznaczenie oporu na wciśnięcie penetrometru tłoczkowego (kieszonkowego) [por. 21]. Przeanalizowane badania porównawcze uzyskane z badania sondą FVT i penetrometrem tłoczkowym dla glin zwałowych rejonu Tarnowa pozwoliły na opracowanie lokalnej zależności korelacyjnej, która umożliwia oszacowanie wartości wytrzymałości na ścinanie oraz stopnia plastyczności gruntów na podstawie szybkiego badania penetrometrem tłoczkowym. Uzyskana zależność korelacyjna pomiędzy oporem wciśnięcia penetrometru tłoczkowego a stopniem plastyczności dla glin zwałowych rejonu Tarnowa dobrze sprawdza się również w przypadku mad gliniastych doliny Dunajca. Wyniki badań potwierdzają, że stosowanie penetrometru tłoczkowego może być przydatne jako badanie klasyfikacyjne pozwalające na oszacowanie stopnia plastyczności gruntów.

Bibliografia

- [1] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (t.j. Dz.U. z 2021 r. poz. 2351 ze zm. Dz.U. z 2022 r. poz. 88, poz. 1157).
- [2] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych (Dz.U. z 2012 r. poz. 463).
- [3] Młynarek Z, Gogolik S. Nowe koncepcje wykorzystywania wyników badań in situ w geotechnice – część II. Acta Scientiarum Polonorum: Architektura. 2014;13(1):3–19.
- [4] Godlewski T, Kaczyński Ł. O wyznaczaniu wytrzymałości gruntu na ścinanie polową sondą krzyżakową w świetle nowych wymagań norm europejskich. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska. 2016;25(3):356–365.
- [5] Tarnawski M, editor. Badania podłoża budowli: metody polowe. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2020.
- [6] Norma PN-EN ISO 22476-9 – Ground investigation and testing – Field testing – Part 9: Field vane test.
- [7] Katalog Firmy: Zakład Narzędzi Wiertniczych i Geologicznych Waldemar Szkurlat; 2014.
- [8] Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. Część 1 i 2. Warszawa: GDDP; 1998.
- [9] Hansbo S. Foundation Engineering. Amsterdam: Elsevier; 1994.

- [10] Norma PN-B-04452:2002. Geotechnika – Badania polowe.
- [11] Straż G. Ocena wytrzymałości na ścinanie bez odplywu wybranego gruntu organicznego na podstawie badań FVT. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*. 2017;64(3/1):91–101. <https://doi.org/10.7862/rb.2017.106>.
- [12] Wysokiński L, Kotlicki W, Godlewski T. Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7. Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej; 2011.
- [13] Wytyczne wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego. Część 1, 2. Warszawa–Kraków: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy; Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; Politechnika Warszawska; 2019.
- [14] Norma PN-EN ISO 17892-6:2017-06, Badania geotechniczne. Badania laboratoryjne gruntów. Badanie penetrometrem stożkowym.
- [15] Zbiciak A, Michalczyk R, Józefiak K, Maślakowski M. Oznaczanie cech mechanicznych gruntów spoistych w aparacie stożkowym: badania laboratoryjne i symulacje komputerowe. *Logistyka*. 2014;(3):7046–7053.
- [16] Norma PN-EN 1997-1 – Eurocod 7; Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- [17] Bardel T. Geologiczne uwarunkowania planowania przestrzennego miasta Tarnowa, Tarnów: Wydawnictwa Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Tarnowie; 2020.
- [18] Katalog Firmy: Humbolt Mfg. Co., Testing Equipment for Construction Materials; 2017.
- [19] Tymczasowa instrukcja obsługi: penetrometr wciskowy PW-1. Wyd. 2 uzup. Warszawa: OBRTG; 1974.
- [20] Rybicki S, Krokoszyński P. Sondowania statyczne i dynamiczne w badaniach podłoża gruntowego budowli drogowych. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*. 2011;446:397–406.
- [21] Majer E, Pietrzykowski P. Propozycja obiektywizacji makroskopowej oceny konsystencji penetrometrem tłoczkowym. *Acta Scientiarum Polonorum: Architectura*. 2013;12(3):175–181.