

Charakterystyka geotechniczna osadów wysoczyzny morenowej na podstawie badań kampusu SGGW w Warszawie

Geotechnical characteristics of moraine upland sediments based on studies at the Warsaw University of Life Sciences Campus

dr inż. Simon Rabarijoely (ORCID: 0000-0002-4409-223X), dr inż. Mariusz Lech (ORCID: 0000-0003-1617-6361), dr inż. Marek Bajda (ORCID: 0000-0002-3921-2268), dr inż. Katarzyna Markowska-Lech (ORCID: 0000-0001-6883-3605), Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

DOI 10.5604/01.3001.0053.7000

Streszczenie: W artykule, na przykładzie kampusu SGGW w Warszawie, przedstawione zostały kryteria identyfikacji warstw geotechnicznych na obszarze wysoczyzny morenowej, pozwalające na bardziej wiarygodną ocenę parametrów geotechnicznych poszczególnych warstw podłoża z uwzględnieniem lokalnych warunkowań. W pracy wykorzystano wyniki badań terenowych, głównie CPT oraz DMT, które porównano z wynikami badań laboratoryjnych pobranych próbek gruntów. Proponowana metoda podziału warstw geotechnicznych wraz z doбором odpowiednich parametrów gruntowych dla wydzielanych warstw zakłada zastosowanie podejścia bayesowskiego.

Słowa kluczowe: badanie in situ, podejście bayesowskie, system eksperckie.

Abstract: The paper presents criteria for identification of geotechnical layers in the area of moraine upland, on the example of the Warsaw University of Life Sciences Campus – SGGW, which allows a more reliable assessment of the geotechnical parameters of individual ground layers, taking into account local conditions. The paper uses the results of in situ tests, mainly CPT and DMT, which were compared with the results of laboratory tests. A Bayesian approach was used in proposing a technique for subdividing the geotechnical layers with the annotation of the relevant parameters for the separated layers.

Keywords: soil classifications, field test, CPT/DMT tests, statistical analysis.

1. Wprowadzenie

W określaniu wartości charakterystycznych parametrów geotechnicznych, w tym wytrzymałościowych i odkształceniowych, należy w sposób ostrożny i przemyślany zastosować metody statystyczne, zarówno klasyczne, jak i podejście bayesowskie [1–9]. Analiza statystyczna Bayesa uzasadniona jest szczególnie w przypadku dysponowania i uwzględniania w doborze parametrów wartości a priori, na przykład wartości eksperckich parametrów geotechnicznych lub w przypadku możliwości powiększania liczebności zbiorów parametrów i danych geotechnicznych, co stanowi podstawę projektowania metodą obserwacyjną.

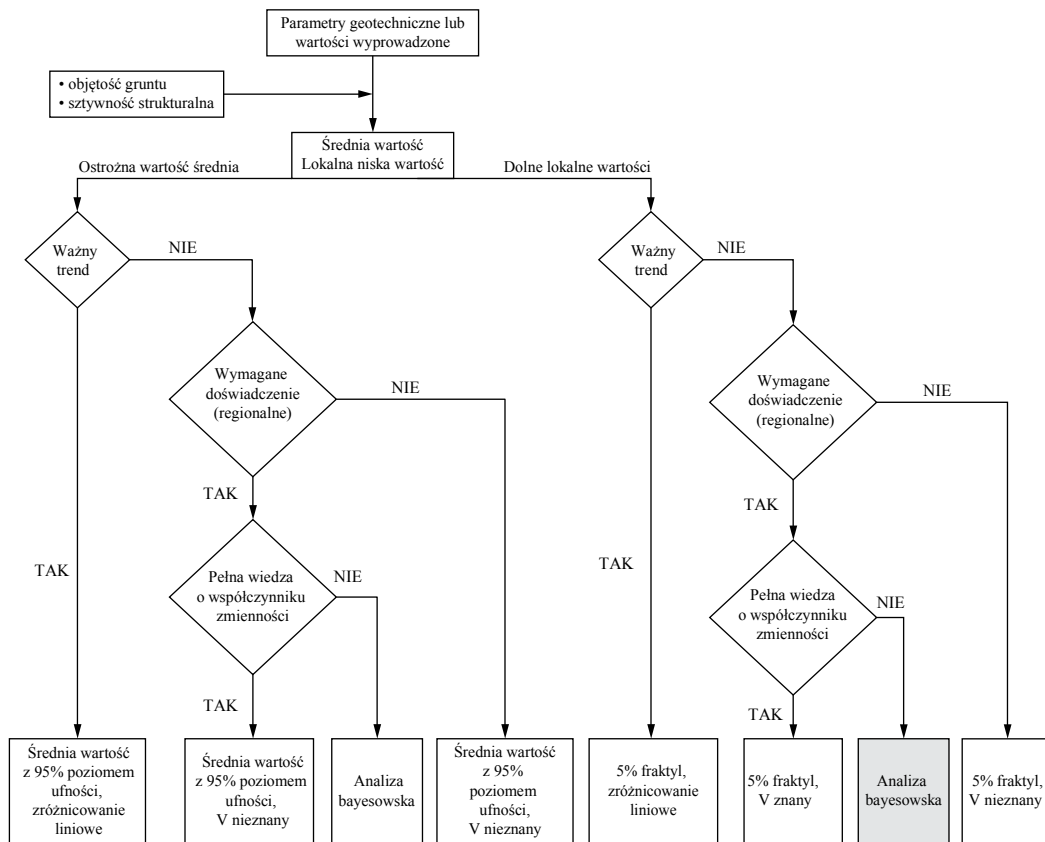
W artykule przedstawione zostały kryteria identyfikacji warstw gruntu. Przede wszystkim podano definicję warstw geotechnicznych i podstawową metodę ich identyfikacji w celu lepszego zrozumienia przedstawionego problemu. Następnie opisano warstwy geotechniczne w rozumieniu

geologicznym i geotechnicznym oraz analizowano dane przy użyciu wykorzystanych metod, uwzględniając cele i potrzeby inżynierów geotechników.

Wynikiem analizy jest propozycja sposobu podziału warstw geotechnicznych dla wybranego obiektu z kampusu SGGW w Warszawie. Do interpretacji warstw geotechnicznych wykorzystano wyniki badań uzyskane z sondowań statycznych CPT i badań DMT.

2. Warunki geologiczne w podłożu kampusu SGGW

W artykule przedstawiono zasady analizy statystycznej danych geotechnicznych z wykorzystaniem teorii Bayesa. W doborze parametrów geotechnicznych można zastosować klasyczne wnioskowanie statystyczne [10] lub coraz częściej wykorzystywane w zadaniach geotechnicznych wnioskowanie zaproponowane w XVIII wieku przez brytyjskiego matematyka



Rys. 1. Schemat wyboru metody statystycznej do oszacowania wartości charakterystycznej parametrów geotechnicznych [11]

i duchownego prezbiteriańskiego Thomasa Bayesa (1702–1761). Schemat analizy statystycznej oraz czynniki wpływające na dobór wartości charakterystycznej parametrów geotechnicznych przedstawiono na rysunku 1.

Rozpatrywany w tym artykule obiekt należy do Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, dokładnie jest to fragment kampusu SGGW. Kampus znajduje się w południowej części Warszawy, na Ursynowie. Obszar ten od zachodu ograniczony jest aleją Jana Rodowicza „Anody”, od południa ul. Ciszewskiego, natomiast od północy i wschodu ul. Nowoursynowską. Teren kampusu SGGW i miejsca badań przedstawiono na rysunku 2.

Budowa geologiczna terenu, na którym znajduje się kampus SGGW na Ursynowie, jest złożona. Kampus SGGW znajduje się w granicy wysoczyzny morenowej, posiadającej płaską przeobrażoną antropogenicznie powierzchnię. Wysoczyzna opada spadzistą skarpą na wschód od terenu SGGW na poziom tarasu wyższego – praskiego doliny Wisły [12]. Podłoże czwartorzędowego osadu, czyli ily plioceńskie, tworzą glaciektoniczną kulminację w rejonie przyskarpowej doliny Wisły. Nad ily plioceńskimi znajdują się osady preglacjalne, które wykształciły się w postaci żwirów kwarcowych z litytami i piasków oraz mułków. Osady te uczestniczą w zaburzeniach w strefie przyskarpowej [13]. Powyżej osadów preglacjalnych wysoczyzny ursynowskiej znajdują się utwory glacialne zlodowaceń południowopolskich (np. gliny

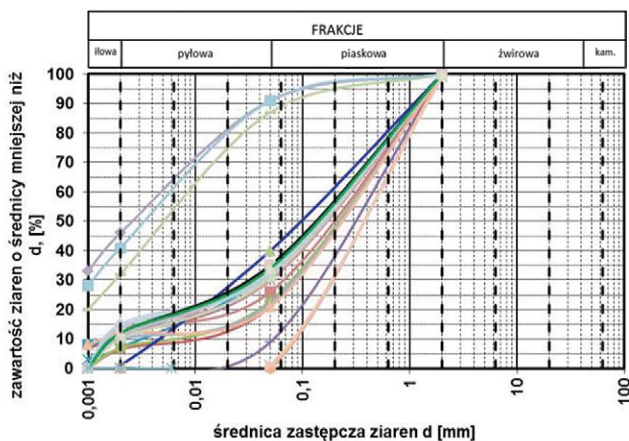


Rys. 2. Zdjęcie satelitarne kampusu SGGW z naniesionymi miejscami badań (A – projektowana aula wielofunkcyjna SGGW; B – projektowane przejście podziemne; C – parking podziemny SGGW; D – Biblioteka Główna SGGW – Wydział Rolniczy; E – budynek 37 – Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu; F – budynek 34 – Wydział Leśny oraz Wydział Technologii DREWNA)

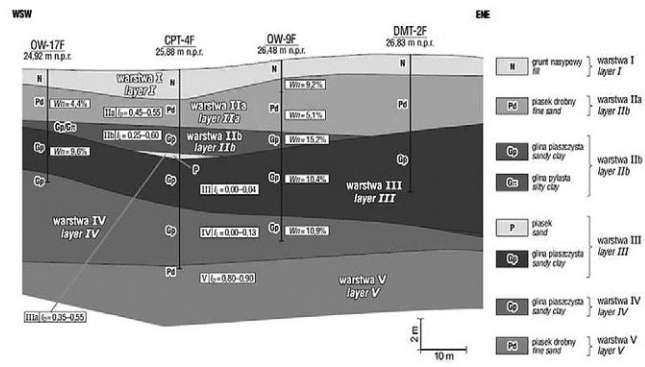
zwałowe) [14]. Poziom wodonośny na tym obszarze tworzą piaski rzeczne interglacjalnego mazowieckiego. Kierunek spływu wód podziemnych odbywa się z południowego wschodu na północny zachód, a współczynniki filtracji tych osadów kształtują się w granicy 1×10^{-4} m/s.

W celu określenia rodzaju gruntu i parametrów gruntowych wykonano następujące prace badawcze: badania CPT, badania DMT oraz wiercenia. Łącznie wykonano 29 sondowań CPT: 7 dla obiektu A, 7 dla obiektu C, 4 dla D, 5 dla E oraz 6 dla F. Sondowania przeprowadzono do głębokości ok. 9–11 m oprócz obiektu D, gdzie głębokość wynosi 5–7 m. Otrzymano wartości parametru q_c do ok. 20 MPa (wyjątkowo 30 MPa), natomiast sondowanie kończono przy wartościach dochodzących do 60 MPa. Wykonano również 17 badań DMT, z czego 6 na obiekcie A, 2 na B, 2 na C, 1 na D, 3 na E oraz 3 na F. Badania prowadzono do głębokości ok. 8–12 m. Uzyskano parametr gruntowy I_D (DMT) do wartości I_D równej 4 (wyjątkowo do 6) oraz E_D w zakresie do 80–100 MPa (wyjątkowo 150 MPa). Dla badanych obiektów wykonano badania laboratoryjne próbek gruntu z 24 wierceń, z czego 11 odbyło się na obiekcie A, 3 na B, 6 na C i 4 na obiekcie F.

Biorąc pod uwagę właściwości fizyczne i mechaniczne gruntów, na terenie kampusu SGGW wydzielono w podłożu 5 warstw geotechnicznych (rys. 4). Warstwę I tworzą utwory fluwioglacjalne zlodowacenia Warty – piaski średnie i drobne, średnio zagęszczone o wartościach stopnia zagęszczenia I_D w zakresie 0,35–0,55 oraz piaski gliniaste i gliny piaszczyste, jak również pyły w stanie twardoplastycznym o wartościach stopnia plastyczności I_L od 0,15 do 0,20. Warstwę II stanowią osady ablacyjne lądolodu zlodowacenia Warty – piaski średnie i drobne średnio zagęszczone o $I_D = 0,3–0,5$ oraz gliny piaszczyste (spływowe) i piaski gliniaste w stanie twardoplastycznymi o $I_L = 0,0–0,20$ oraz w stanie plastycznym, o $I_L = 0,25–0,54$. Warstwa III to brązowa glina glacialna z okresu zlodowacenia Warty – gliny piaszczyste w stanie twardoplastycznym o wartościach I_L od 0,0 do 0,11. Warstwa IV z kolei to szara glina glacialna z okresu zlodowacenia Odry – gliny piaszczyste z gładzikami, w stanie twardoplastycznym o wartościach I_L od 0,0 do 0,12. Warstwy III i IV są podobne pod względem plastyczności, ale wyraźnie różnią się zawartością frakcji piaskowej. Gliny piaszczyste warstwy III zawierają kilka procent więcej frakcji piaskowej, co łącznie z analizą wyników



Rys. 3. Wykresy krzywych uziarnienia badanych iltów i glin piaszczystych na kampusie SGGW w Warszawie



Rys. 4. Widok budynku nr 34 i przekrój geotechniczny podłoża pod budynkiem; w_n – wilgotność naturalna, I_D – stopień zagęszczenia, I_L – stopień plastyczności, m n.p.r. – metrów nad poziomem Wisły [15]

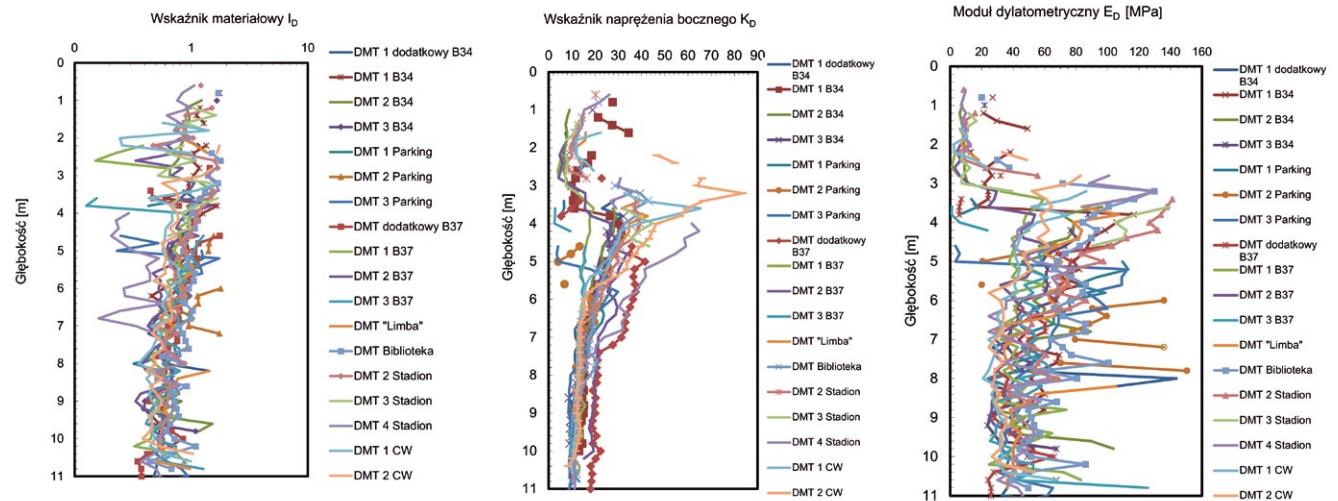
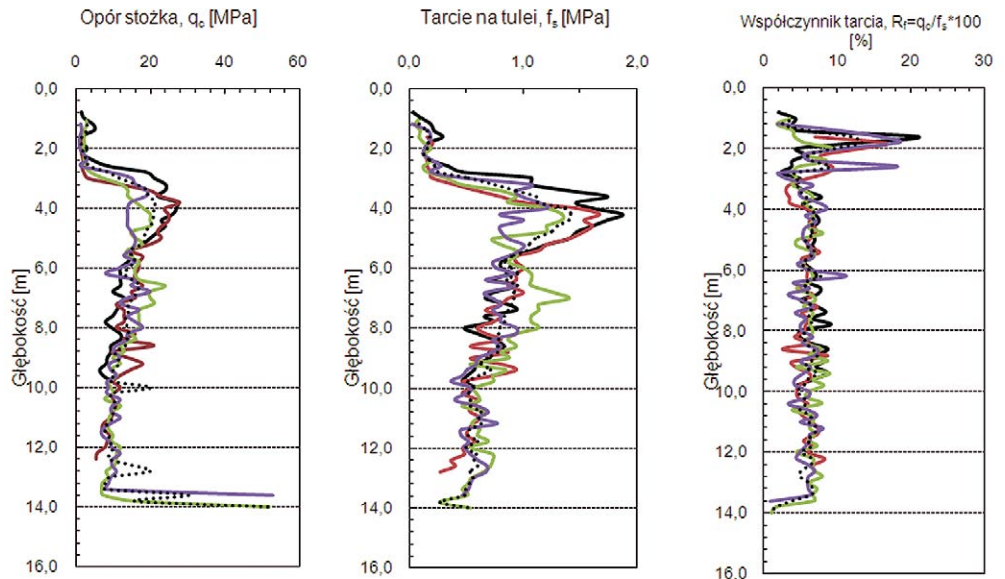
sondowań CPT i DMT było podstawą propozycji rozdzielania tych warstw w podłożu. Warstwę V stanowią osady rzeczne interglacjału mazowieckiego – piaski drobne i średnie, w stropie warstwy bardzo zagęszczone o $I_D = 0,8–0,9$ [14]. Swobodne zwierciadło wody gruntowej położone jest na stropie warstwy V. Uziarnienie badanych iltów i glin piaszczystych przedstawiono na rysunku 3, a typowy przekrój geotechniczny kampusu SGGW przedstawiono na przykładzie przekroju poprowadzonego pod budynkiem 34 (rys. 4).

3. Opracowanie wyników i analiza statystyczna

W ramach badań terenowych zostały wykonane sondowania CPT i DMT, których metodyka została szeroko omówiona w licznych pracach naukowych [16–18]. Wyniki badań CPT i DMT przedstawione zostały na rysunkach 5 i 6.

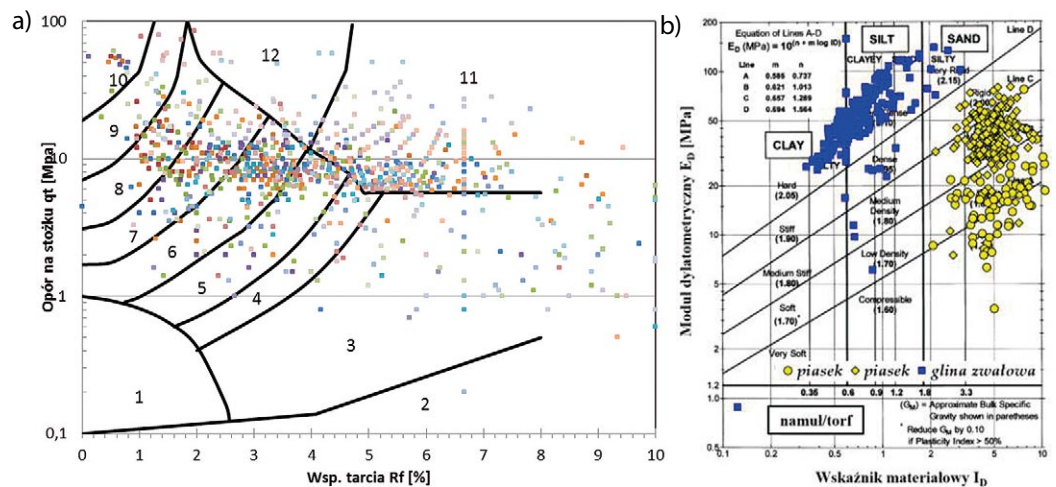
Wartości obliczone na podstawie sondowań CPT i DMT naniesiono na nomogramy Robertsona [19] i Marchetti-go oraz Crappa [20]. Wyniki badań CPT z kampusu SGGW pokazano na rysunku 7a. Z rysunku widać, że przeważająca część znormalizowanych wartości oporu stożka i współczynnika tarcia zawiera się w przedziale od 7 do 11 MPa (opór stożka) i 1–6% (współczynnik tarcia). Wynika z tego, że są to grunty drobnoziarniste (gliny piaszczyste, piaski gliniaste) w stanie półzwarłym lub zwartym i twardoplastycznym. Wyniki badań DMT przedstawia rysunek 7b. Z nomogramu wynika, że na badanych terenach znajdują się głównie zwarte i półzwarte grunty spoiste (zgodnie z opisem na nomogramie są to ility, ility pylaste i pyły) oraz średnio zagęszczone i zagęszczone grunty niespoiste – piaski i piaski pylaste.

Rys. 5. Interpretacja sondowania CPT na kampusie SGGW



Rys. 6. Profile wskaźników dylatometrycznych sondowania w podłożu w kampusie SGGW Warszawie

Rys. 7. Zestawienie wyników badań CPT na nomogramie Robertsona i in. [19] (a) i DMT na nomogramie Marchetti'ego i Crappa [20] (b)



Obszar (numeracja) rodzaju gruntu: 1. Wrażliwe grunty drobnoziarniste, 2. Grunty organiczne, 3. Gliny, 4. Gliny pylaste do gliny, 5. Pyły do gliny pylaste, 6. Pyły piaszczyste, 7. Piaszki pylaste do pyły piaszczyste, 8. Piaszki do piaszki pylaste, 9. Piaszki, 10. Żwiry do piaszki grube, 11. Prekonsolidowane, scementowane grunty drobnoziarniste, 12. Prekonsolidowane, scementowane piaszki, piaszki gliniaste

4. Proponowane sposoby wydzielenia warstw geotechnicznych wraz z parametrami za pomocą podejścia bayesowskiego

Analizę statystyczną wyników badań in situ CPT i DMT przeprowadzono w celu doboru parametrów odkształceniowych i wytrzymałościowych gliny zwałowej w podłożu budynku 34. W analizie wykorzystano wartości oporu stożka q_c z 18 sondowań CPT i wartości modułu dylatometrycznego E_D z 17 badań DMT wykonanych w podłożu budynku 34 i na pozostałym terenie Kampusu SGGW (rys. 8).

W obliczeniach wykorzystano pakiet BAYANAL, który pozwala zwiększyć wiedzę na temat rozkładu prawdopodobieństwa parametru objętego dochodzeniem. W pewnych sytuacjach analiza bayesowska może być konkurencyjna w stosunku do klasycznych metod wnioskowania statystycznego. Ocena parametrów geotechnicznych podłoża pod budynkiem 34 oparta jest nie tylko na podstawie sondowań CPT i DMT wykonanych w miejscu posadowienia tego obiektu, ale również na podstawie informacji z wcześniej prawidłowo przeprowadzonych analiz. Wyniki badań z pozostałej części kampusu stanowią tu pewną wiedzę ekspercką. Te dodatkowe dane pozwalają otrzymać bardziej wiarygodne wartości parametrów geotechnicznych poprzez mniejsze wartości odchylenia standardowego od wartości średniej parametru w stosunku do klasycznych metod statystycznych.

Łączna liczba danych użytych w interpretacji wyników z sondowań CPT wynosiła 735, z badań DMT 683. Wyznaczono wartości średnie wytrzymałości na ścinanie i modułu ścisłości przy poziomie ufności 95%. W pracy [21] na podstawie obliczeń porównawczych zaproponowano stosowanie do obliczenia wartości charakterystycznej parametrów następujący wzór:

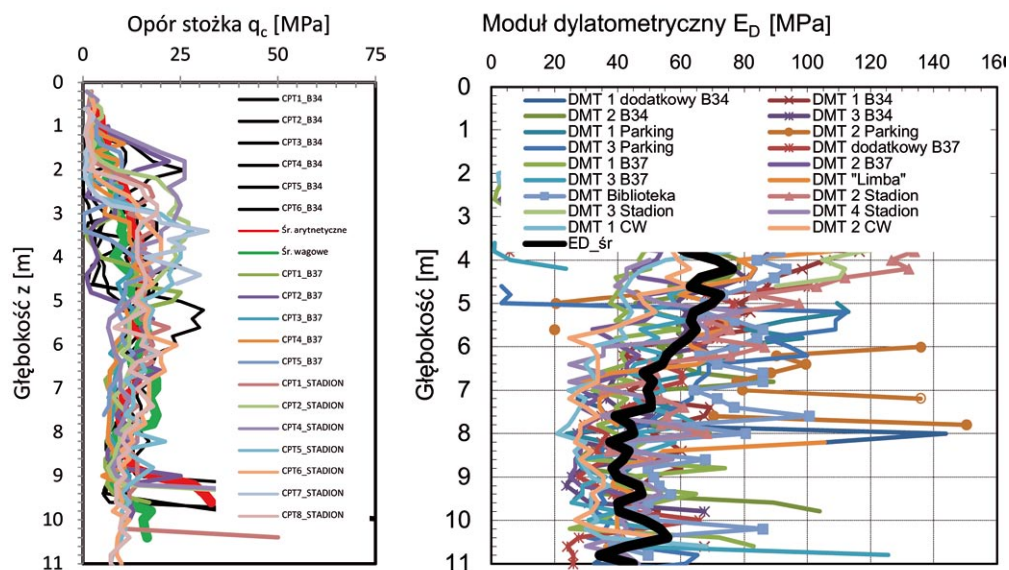
$$X_K = X_M - 0,5 \cdot \delta \quad (1)$$

gdzie:

X_M – wartość średnia, δ – odchylenie standardowe.

Dotychczasowe metody statystyczne wykorzystujące w większości estymację najmniejszych kwadratów przyjmowały dane z badań terenowych i laboratoryjnych jako zamkniętą liczbę zmiennych losowych do określenia wartości oczekiwanych, wariancji i korelacji dla danego wyrażenia jako funkcji zmiennej losowej. Zasadniczą wadą

Rys. 8. Rozkład oporu stożka q_c z badań CPT oraz parametr E_D badań dylatometrycznych DMT wykonanych na kampusie SGGW



stosowanej do oszacowania parametrów metody najmniejszych kwadratów są trudności w reprezentacji wiedzy o spodziewanych wartościach parametrów, które powinny wynikać z procesu estymacji. Znacznym postępowaniem w estymacji parametrów, jak wykazują coraz liczniejsze przykłady zastosowań w różnych dziedzinach, może okazać się analiza bayesowska, w której zestaw wyników badań może być powiększany o nowe dane i na tej podstawie określane prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia.

Sposób szacowania parametrów populacji w podejściu bayesowskim wynika z twierdzenia, które w przypadku zmiennych losowych o ciągłym rozkładzie prawdopodobieństwa może być przedstawione następująco:

$$f(\Theta) = \frac{f(x|\Theta) \cdot f(\Theta)}{\int_{\Omega} f(x|\Theta) \cdot f(\Theta) \cdot d(\Theta)} \quad (2)$$

gdzie:

$f(\Theta)$ jest gęstością prawdopodobieństwa „a priori” parametru Θ , natomiast $f(x|\Theta)$, zwane funkcją wiarygodności, jest warunkową gęstością wyniku obserwacji przy danej wartości Θ . Symbol Ω użyty pod całką oznacza zbiór możliwych wartości szacowanego parametru Θ . Lewa strona w równaniu oznacza gęstość aposteriorycznego prawdopodobieństwa parametru Θ . Wyniki analiz statystycznych, w tym z zastosowaniem pakietu BAYANAL przedstawiono w tabeli 1. W tabeli tej podano wartości średnie q_c i E_D oraz obliczone na ich podstawie wartości wytrzymałości na ścinanie τ_{fu} i modułu ścisłości M dla warstwy glin zwałowych.

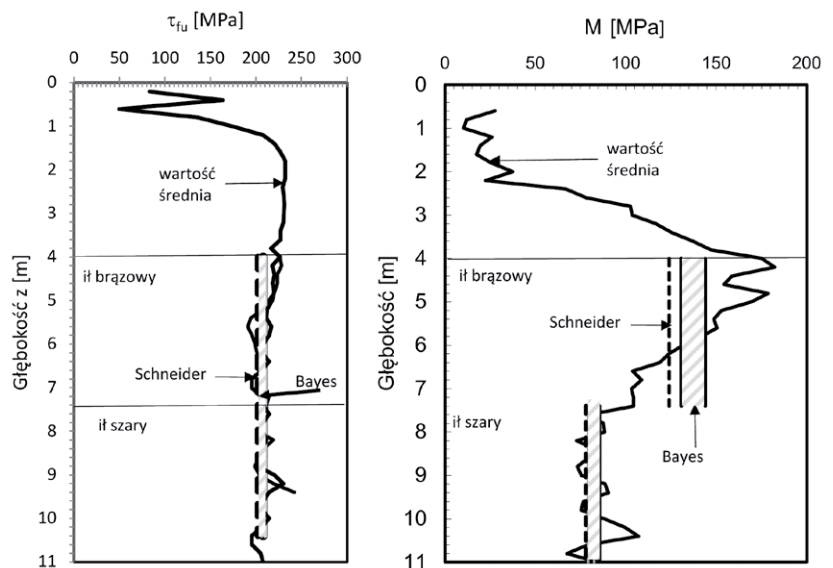
W celu określenia wpływu lokalizacji badań na wartości charakterystyczne parametrów geotechnicznych τ_{fu} i M przeprowadzono analizę statystyczną, przyjmując wartości wagowe parametrów. Analizę przeprowadzono dla dwóch wariantów: wariant 1 – określenie parametrów w podłożu projektowanego obiektu na podstawie analizy wszystkich badań przeprowadzonych na terenie kampusu SGGW (rys. 2), wariant 2 – określenie parametrów w podłożu

Tabela 1. Wyniki analizy statystycznej z 18 sondowań CPT i 17 DMT (kolejność „dołączania” danych od DMT 2 Budynek „Centrum Wodne” do DMT 1 B34)

Podejście klasyczne				
Parametr wskaźnikowy	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Przedział ufności	Poziom ufności 0,95
q_c [MPa]	10,65	6,17	10,38	11,13
E_D (4,1–7,4)	59,94	8,61	55,85	64,03
E_D (7,5–11,0)	42,92	7,95	40,03	45,81
M (4,1–7,4)	137,41	27,29	124,44	150,39
M (7,5–11,0)	83,26	9,91	78,68	87,83
τ_{fu} (4,1–11,0) [kPa]	207,98	12,98	203,41	212,55
Podejście bayesowskie				
Parametr wskaźnikowy	Wartość średnia	Odchylenie średniej	Zbiór wiarygodny	Poziom prawdopodobieństwa 0,95
q_c	10,63	0,16	10,31	10,94
E_D (4,1–7,4)	59,94	2,09	55,85	64,03
E_D (7,5–11,0)	42,92	1,48	40,03	45,81
M (4,1–7,4)	137,41	6,62	124,44	150,39
M (7,5–11,0)	83,26	2,33	78,68	87,83
τ_{fu} (4,1–11,0)	207,98	2,33	203,41	212,55
Podejście Schneidera (1997)				
Warstwa (głębokość)	Wartości średnie M_m [MPa] Wartość średnie τ_{fu} [MPa]	Odchylenie standardowe S_d	Wartości charakterystyczne $M_k = M_m - 0,5 \cdot S_d$ [MPa] $\tau_{fu k} = \tau_{fu m} - 0,5 \cdot S_d$ [kPa]	
M(4,1–7,4)	137	27	124	
M(7,5–11,0)	83	10	78	
τ_{fu} (4,1–11,0)	208	12	202	

projektowanego fundamentu na podstawie analizy badań przeprowadzonych wyłącznie dla budynku 34. W przypadku wariantu 1 dla warstwy glin zwałowych uzyskano następujące średnie wartości τ_{fu} i M odpowiednio z badań CPT i DMT: 203 kPa i 124 MPa (górna warstwa gliny zwałowej – brązowa), 79 MPa (dolna warstwa gliny zwałowej – szara). Z obliczeń propozycją Schneidera wartości τ_{fu} i M wynoszą odpowiednio: 202 kPa i 124 MPa (górną) i 78 MPa (dół). Wartości charakterystyczne glin zwałowych proponowane do obliczeń posadowienia budynków z analizy statystycznej Bayesa, z uwzględnieniem wag i według propozycji Schneidera przedstawiono na rysunku 9. W przypadku wariantu 2 wagi obliczono, przyjmując za najbardziej prawdopodobne wartości τ_{fu} i M uzyskane z sondowań CPT i DMT w odległości odpowiednio: 20,77 m i 42,70 m od projektowanej stopy fundamentowej.

W analizie statystycznej Bayesa kolejno dodawano wyniki badań z podłoża obiektów kampusu SGGW; jako ostatni uwzględniony został budynek 34. Wartości uzyskane z obliczeń wskazują, że wynik końcowy jest niezależny od kolejności dodawania obiektów. Poza tym wartości średnie wytrzymałości na ścinanie bez odplywu i modułu ściśliwości dla glin zwałowych są takie same w przypadku analizy



Rys. 9. Wartości charakterystyczne wytrzymałości na ścinanie τ_{fu} i modułu ściśliwości M zalecane do projektowania geotechnicznego

klasycznej i podejścia bayesowskiego mimo różnic w wartościach odchylenia standardowego i odchylenia średniego na korzyść podejścia bayesowskiego. Wyniki końcowe parametrów geotechnicznych nie różnią się od siebie, a wynika to z wysokiej powtarzalności wyników sondowań w badanym podłożu i jednorodności glin zwałowych na terenie kampusu SGGW.

Analiza rozkładu wartości q_c dla obu warstw nie wykazuje istotnego zróżnicowania tego parametru w całym profilu glin zwałowych (patrz rys. 8) i zaleca się ujednoczenie wytrzymałości na ścinanie bez odplywu do jednej wartości. Rozkład wartości średnich oporów stożka q_c dla glin zwałowych na głębokości posadowienia fundamentu pozwala przyjąć średnią wartość q_c równą 11 MPa. Biorąc pod uwagę określone wartości q_c wytrzymałość na ścinanie bez odplywu glin zwałowych wynosi 136 kPa.

W odróżnieniu od analizy oporu stożka analiza modułu dylatometrycznego ED z badań DMT wskazuje na zróżnicowanie tych wartości w profilu. Stąd moduły ściśliwości przyjęte do obliczeń wynoszą odpowiednio: dla górnej warstwy gliny zwałowej – 89 MPa i dla dolnej warstwy gliny zwałowej – 56 MPa.

5. Podsumowanie

W artykule dokonano oceny parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych w warstwie glin zwałowych występujących w poziomie fundamentów większości budynków posadowionych na terenie kampusu SGGW. Wyniki sondowań CPT i DMT zostały poddane interpretacji z wykorzystaniem metod statystycznych – klasycznej i bayesowskiej. Analiza ta pozwoliła sformułować poniższe wnioski.

- Analiza statystyczna wyników badań terenowych zapewnia bardziej obiektywne określenie parametrów gruntowych oraz wyznaczenie w podłożu jednorodnych warstw gruntowych.
- Analiza wyników badań pozwoliła na ustalenie jednej wartości parametru wytrzymałości na ścinanie bez odplywu τ_{fu} dla całej warstwy gliny zwałowej i wyróżnienie dwóch warstw tej gliny pod kątem jej właściwości odkształceniowych – tu wartości modułów ściśliwości M znacznie odbiegały od siebie.
- Na wartości parametrów geotechnicznych w analizie bayesowskiej nie miała wpływu kolejność dodawania obiektów. Wartości końcowe parametrów geotechnicznych badanych glin zwałowych są takie same w przypadku analizy klasycznej i podejścia bayesowskiego, co świadczy o jednorodności podłoża na terenie kampusu.
- Wartości odchylenia standardowego w statystyce klasycznej i odchylenia średniego w statystyce bayesowskiej różnią się od siebie na korzyść podejścia bayesowskiego – otrzymano mniejsze wartości odchylenia średniego.
- Wykorzystanie w interpretacji sondowań wiedzy eksperckiej i zastosowanie pakietu BAYANAL pozwala na bardziej

wiarygodną ocenę parametrów geotechnicznych, w szczególności przy rozpoznaniu podłoża na znacznym obszarze i przy dużej zmienności parametrów w danej warstwie geotechnicznej (np. [2 i 15]).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Frank R., Bauduin C., Driscoll R., Kavvas M., Krebs Ovesen N., Orr T.L.L., Schuppener B., Designers' Guide to EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical design Part 1: General rules. Thomas Telford. London, 2004
- [2] Garbulewski K., Jabłonowski S., Rabarijoely S., Zastosowanie analizy bayesowskiej w projektowaniu geotechnicznym, Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2007, str. 163–169
- [3] Paluszkiwicz R., Paluszkiwicz R., Wierzbiński J., Zastosowanie metody statycznego sondowania w analizie genezy osadów, na przykładzie sandru Gwdy, Landform Analysis, 13, 2010, str. 83–89
- [4] Sulewska M. J., Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w badaniach wybranych parametrów geotechnicznych, Inżynieria Morska i Geotechnika 4/2012, str. 388–392
- [5] Ochmański M., Bzówka J., Wybrane przykłady zastosowań sztucznych sieci neuronowych w geotechnice, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 4/2013, str. 287–294
- [6] Młynarek Z., Gogolik S., Nowe koncepcje wykorzystania wyników badań in situ w geotechnice – część II, Acta Scientiarum Polonorum. Architectura 13(1)2014, str. 3–19
- [7] Puła W., Wybrane zagadnienia dotyczące wyznaczania wartości charakterystycznych w geotechnice, Architectura 13(1)2014, str. 21–36
- [8] Chwała M., Puła W., Evaluation of shallow foundation bearing capacity in the case of a two-layered soil and spatial variability in soil strength parameters. PLoS ONE. 2020, tom 15, nr 4, 2020, art. 0231992, str. 1–23, ISSN: 1932-6203,
- [9] Kawa M., Puła W., Truty A., Probabilistic analysis of the diaphragm wall using the hardening soil-small (HSs) model, Engineering Structures, tom 232, 2021, art. 111869, str. 1–15, ISSN: 0141-0296; 1873-7323
- [10] Schuppener B., Simpson B., Orr T. L. L., Frank R., Bond A. J., Loss of static equilibrium of a structure – definition and verification of limit state EQU, [w:] Proc. 2nd Int. Symp. on Geotechnical Safety and Risk, Gifu, Japan, 2009
- [11] Frank R., Bauduin C., Driscoll R., Kavvas M., Krebs Ovesen N., Orr T., Schuppener B., Designers' Guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical design – General rules. Thomas Telford, 2004
- [12] Sarnacka Z., Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski. Arkusz Warszawa Zachód (559) 1:50000, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1976
- [13] Różycki S. Z., Sujkowski Z., Profile geologiczne przez Warszawę, Zarząd Miejski w Warszawie, 1936
- [14] Dokumentacja geotechniczna w sprawie warunków gruntowych i wodnych na terenie przeznaczonym pod projektowany stadion piłkarski SGGW w Warszawie, SGGW, 2001
- [15] Rabarijoely S., Jabłonowski S., Falkowski T., Garbulewski K., Interpretacja sondowań dylatometrycznych (DMT) z wykorzystaniem analizy bayesowskiej, Przegląd Geologiczny, tom 56, 4/2008, str. 322–329
- [16] Marchetti S., In situ Tests by Flat Dilatometer, J. Geotech Eng. Div., ASCE 106, GT3, 1980, str. 299–321
- [17] Wysokiński L., referat Badanie geotechniczne oceniające podłoże budowlane, 2002
- [18] Młynarek Z., Tschuschke W., Wierzbiński J., Wykorzystanie metody sondowania statycznego i badania dylatometrycznego do oceny parametrów geotechnicznych odpadów kopalnianych, seminarium Nowoczesne metody badań gruntów, Warszawa, 2003
- [19] Robertson P. K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Greig, J., Use of Piezometer Cone data. In-Situ'86 Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering, GSP 6, ASCE, Reston, VA, Specialty Publication, 1986, str. 1263-1280
- [20] Marchetti S. & Crapps D.K.: Flat dilatometer manual. Inc. Geotechnical Equipment. Gainesville, FL, USA, 1981
- [21] Schneider H. R., Determination of characteristic soil properties. In: Proceedings of the 12th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Amsterdam. Balkema, Rotterdam, 1999, tom 1, str. 273–281