

EEMSKIE GYTIE I KREDA JEZIORNA Z WARSZAWY JAKO PRZYKŁAD „MOCNYCH” GRUNTÓW ORGANICZNYCH

EEMIAN GYTJA AND LACUSTRINE CHALK FROM WARSAW AS AN EXAMPLE OF “HARD” ORGANIC SOILS

PAWEŁ PIETRZYKOWSKI¹

Abstrakt. Grunty organiczne, a w tym gytie i kreda jeziorna, są powszechnie uważane za słabonośne podłoże obiektów budowlanych. Taka hipoteza dotyczy głównie młodych osadów holoceniowych, które charakteryzują się małymi wartościami parametrów wytrzymałościowych i dużą odkształcalnością w wyniku przykładanych obciążeń. Sedymentacja w interglacjale eemskiej oraz historia geologiczna obciążeń warszawskich gytii i kredy jeziornej sprawiły, że grunty te zachowują się podobnie jak spójne grunty mineralne. Na podstawie analizy kilkudziesięciu pomiarów z opracowań archiwalnych oraz własnych badań polowych i laboratoryjnych, przedstawiono analizę wybranych parametrów geotechnicznych. Zebrane dotychczas wyniki klasyfikują badane grunty z dala od typowych „słabych gruntów organicznych” i pozwalają wnioskować, że jako podłoże budowlane nie powinny być za takie uważane.

Słowa kluczowe: gytia, rynna żoliborska, parametry fizyczno-mechaniczne, interglacja eemskiej, sondowanie statyczne CPT/CPTU, badanie dylatometryczne DMT.

Abstract. Gytja and lacustrine chalk are commonly considered as soft soils, inappropriate as a subsoil of buildings. This opinion concerns „young” Holocene sediments characterized by low values of strength parameters and large compressibility. The Eemian age and preconsolidation processes of Warsaw gytja and lacustrine chalk caused that tested soils behave like mineral sediments. The analysis of selected geotechnical parameters presented in the paper is based on author’s field investigations and laboratory tests supported by archival data from documentary works. The collected results locate calcareous sediments from “Żoliborz glacial tunnel valley” away from “soft” organic sediments and allow to treat them like “harder” subsoil for engineering constructions.

Key words: gytja, Żoliborz glacial tunnel valley, physical and mechanical parameters, Eemian Interglacial, cone penetration test CPT/CPTU, dilatometer test DMT.

WSTĘP I LOKALIZACJA BADAŃ

„Rynna żoliborska” jest paleozbiornikiem, w którym w interglacjale eemskiej następowała m.in. sedymentacja gruntów organicznych. Zlokalizowana w zachodniej części Warszawy (fig. 1) dolina rynnowa miała około 12 km długości i szerokość dochodzącą do 800 m w jej centralnej części w okolicach dworca kolejowego Warszawa Zachodnia (Kłębek, 1979; Morawski, 1980).

Żoliborz, Szczęśliwice, Rakowiec, Okęcie, Wola i Włochy to stołeczne dzielnice, w których w trakcie dokumentowania geologiczno-inżynierskiego i geotechnicznego natrafiano na gytie tzw. „rynny żoliborskiej” lub „żoliborsko-szczęśliwickiej”. W swojej historii geologicznej w zbiorniku osadziły się miejscami około 20-metrowej miąższości organiczne osady węglanowe. W wielu miejscach gytie zostały

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; ppietrykowski@uw.edu.pl

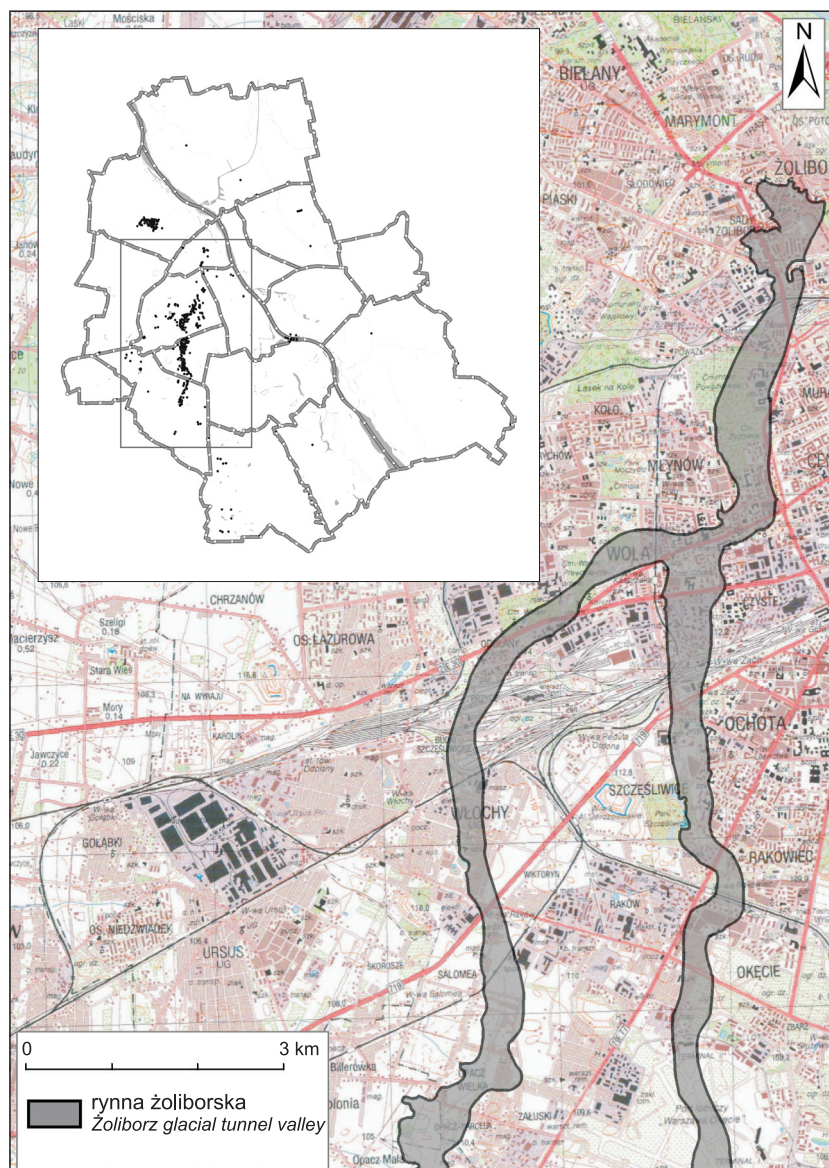


Fig. 1. „Rywna żoliborska” na tle fragmentu topografii Warszawy (wg Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, ark. Warszawa-Zachód; Morawski, 1978) z lokalizacją punktów z nawierconymi osadami eemskich gruntów węglanowych na tle szkicu lokalizacyjnego (Frankowski, Wysokiński, 2000)

„Żoliborz glacial tunnel valley” on the topography of Warsaw (after Detailed Geological Map of Poland, sheet: Warszawa-Zachód; Morawski, 1978) and location of boreholes with Eemian sediments in Warsaw (Frankowski, Wysokiński, 2000)

przykryte i skonsolidowane przez piaski wydm wędrujących (Kłębek, 1979, 1980). Pomimo że osady „rywny żoliborskiej” dokumentowano na głębokościach od ~3 do ~7 m p.p.t. pod przykryciem piasków wydmowych lub innych gruntów późniejszych okresów geologicznych, to lokalnie widoczne jest w morfologii obniżenie dochodzące nawet do 2 m (Morawski, 1980). Wyniki prezentowanych badań pochodzą z liczą-

nych materiałów archiwalnych, własnych opracowań autora o charakterze dokumentacyjnym oraz z reperowego poletka badawczego „Hala Mera” zlokalizowanego na terenie Warszawskiego Klubu Tenisowego w dzielnicy Szczęśliwice, gdzie pod 4–7-metrowym nadkładem nawiercono pakiet gytii eemskich o miąższości 15 m przewarstwionych miejscami drobnymi piaskami, torfami i łupkami ilastymi (fig. 2 i 3).

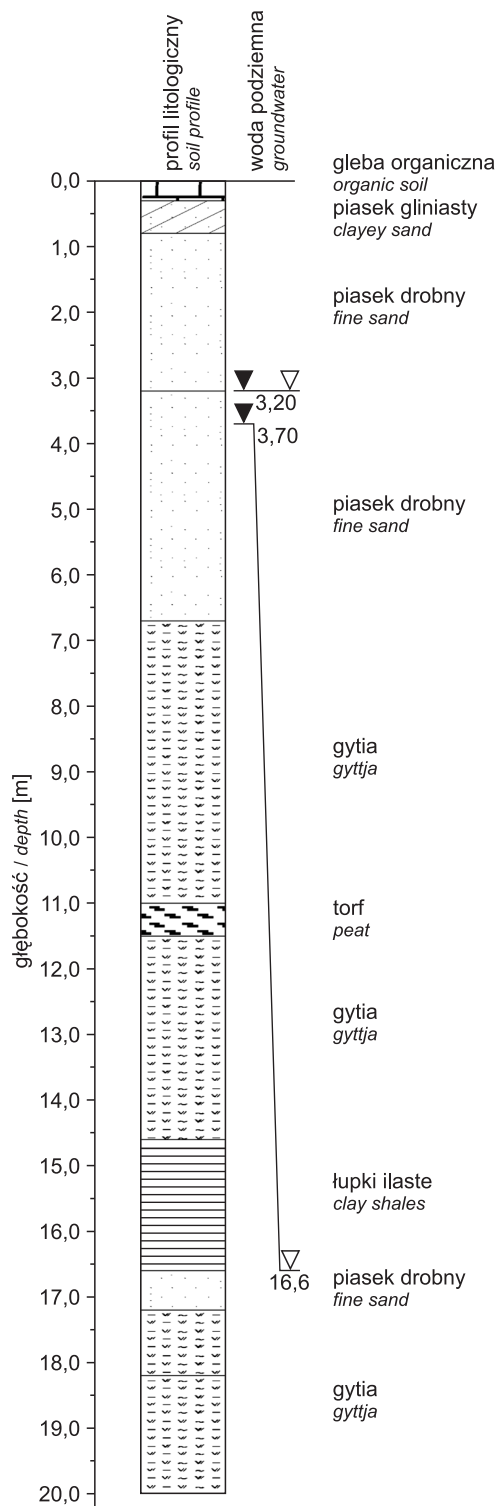


Fig. 2. Profil otworu wiertniczego w punkcie reperowym „Hala Mera” w Warszawie (zmienione) (Frankowski, Wysokiński, 2000)

Soil profile in the benchmark point „Hala Mera” in Warsaw (changed) (Frankowski, Wysokiński, 2000)

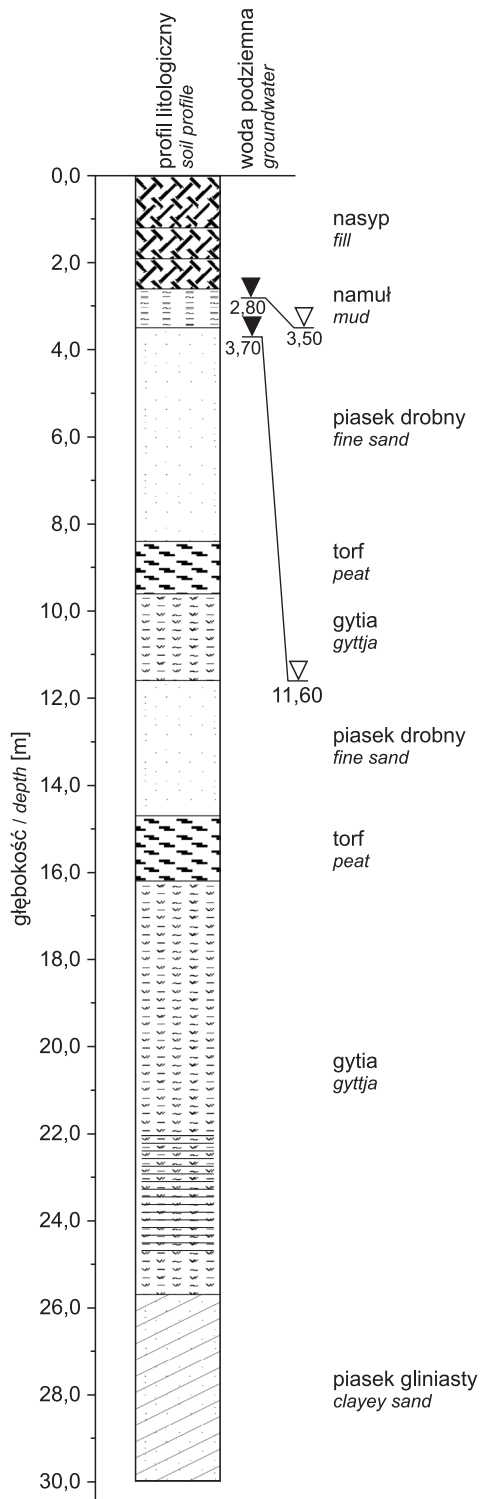


Fig. 3. Profil wiercenia przy ulicy Klonowicza w Warszawie (zmienione) (Frankowski, Wysokiński, 2000)

Soil profile at the Klonowicza Street in Warsaw (changed) (Frankowski, Wysokiński, 2000)

GYTIE „RYNNY ŻOLIBORSKIEJ” NA NOMOGRAMACH KLASYFIKACYJNYCH CPT/CPTU

Pierwsze dowody mocnej struktury gytii natrafiono w trakcie opróbowania wierceniami rdzeniowanymi oraz przy pobieraniu próbek kategorii A klasy 1 o strukturze nie-naruszonej. Pomimo około 4 m słupa wody nad stropem gytii (fig. 2), wyciągane z otworu próbki gruntu charakteryzowały się makroskopowo małą wilgotnością oraz stanem twaroplastycznym i półzwartym. Dodatkową informacją o silnej kompresji osadów była łupkowa tekstura gytii oraz przewarstwiających je gruntów ilastych.

Sondowania statyczne i badania dylatometryczne, wykonywane punktowo w różnych miejscach Warszawy, także nie wykazywały obecności słabych gruntów organicznych o strukturze galaretowatej. Opierając się na pomiarach archiwalnych, w celach porównawczych sprawdzono najpierw

różnice między wynikami sondowań z użyciem końcówki mechanicznej Begemanna (CPT) i końcówki elektrycznej (CPTU). Zgodnie z normą PN-B-04452:2002 wyprowadzono współczynnik korelacyjny β między wynikami uzyskanymi obiema końcówkami (fig. 4). Otrzymana wartość tego współczynnika wynosi 1,6 i mieści się zgodnie z powyższą normą w granicach 1,4–1,7. Przez nią mnożono zmierzony opór na stożku elektrycznym (badania CPTU) dla dalszych celów interpretacyjnych.

Wyniki analiz z 15 sondowań, wykonanych sondami ze stożkiem mechanicznym i/lub elektrycznym w 6 punktach na terenie warszawskich dzielnic Wola i Ochota, zestawiono w postaci pomiarów punktowych na figurze 5.

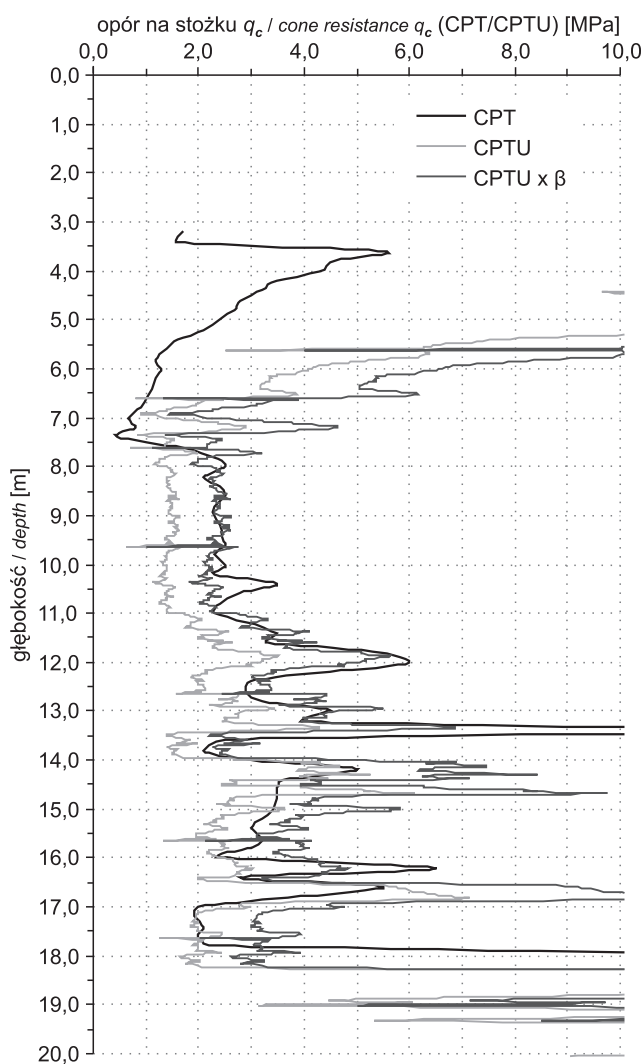


Fig. 4. Rozkład oporu na stożku (q_c) w zależności od stosowanej końcówki stożka oraz współczynnika $\beta = 1,6$ w profilu reperowym „Hala Mera”

Cone resistance (q_c) distribution dependant on the type of cone and the correction factor $\beta = 1.6$ in the benchmark point "Hala Mera"

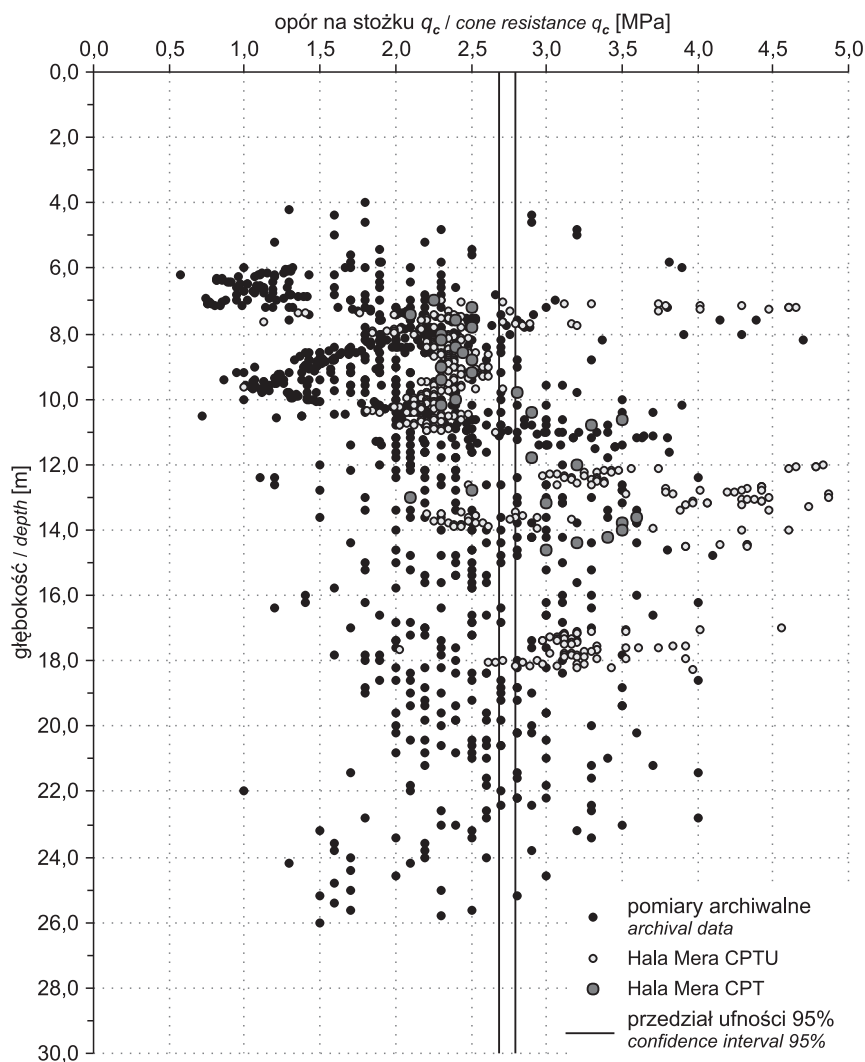


Fig. 5. Zestawienie pomiarów oporu na stożku (q_c) w analizowanych 15 profilach gytii „rynny żoliborskiej”

Cone resistance (q_c) values in 15 considered soil profiles within gytija in „Żoliborz glacial tunnel valley”

W ponad 99% odczytów opór na stożku (q_c) wynosi $>1,0$ MPa. Jest to w przybliżeniu maksymalna wartość dla gruntów organicznych charakterystyczna przy wysokim współczynniku tarcia $R_f = 10$ według diagramu klasyfikacyjnego (Młynarek i in., 1997; PN-B-04452:2002). Dla mniejszych wartości R_f opór na stożku (q_c) dla wydzielonych na diagramie gruntów organicznych jest mniejszy od 1,0 MPa. Opór na stożku $>1,5$ MPa miało 95% pomiarów, a $>2,0$ MPa ponad 80%, przy średniej ze wszystkich odczytów $2,74 \pm 0,05$ MPa (poziom ufności 95%), przy liczebności ponad 1300 pomiarów.

Rozkład wykonanych badań na wybranych nomogramach klasyfikacyjnych (fig. 6 i 7) pokazuje, że punkty pomiarowe

gromadzą się w obszarach różnych rodzajów gruntów, ale z dala od wydzielen o parametrach charakterystycznych dla gruntów organicznych, jakimi są gytie.

Bardzo charakterystyczna jest kumulacja około 60% pomiarów w obszarze ilów oraz 30% w obszarach glin piaszczystych i glin pylastych na normowym (PN-B-04452:2002) nomogramie Robertsona adaptowanym przez Młynarka i in. (1997) dla gruntów polskich. Takie rozłożenie wyników na podstawie sondowań statycznych CPT/CPTU pozwala wnioskować, że gytie „rynny żoliborskiej” zachowują się podczas sondowania z użyciem stożka nie jak wrażliwe grunty drobnoziarniste lub grunty organiczne, ale jak spójne grunty mineralne.

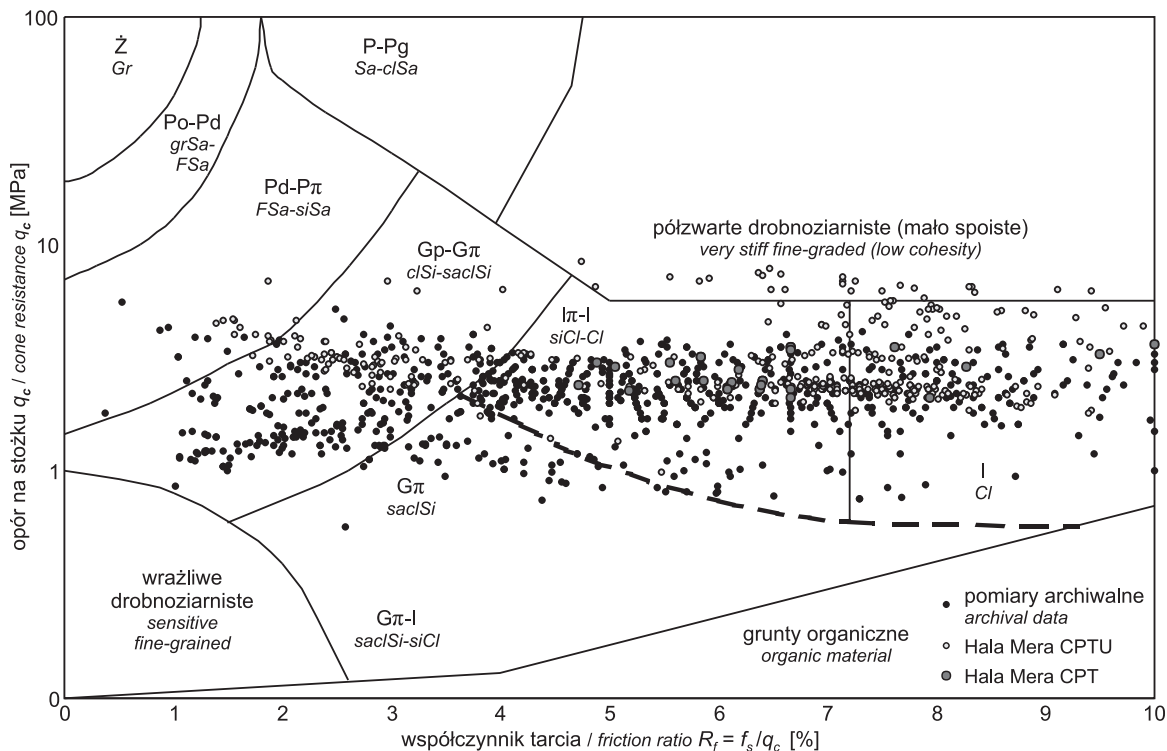


Fig. 6. Pomiary gytii „rynny żoliborskiej” na nomogramie Robertsona zaadaptowanym dla gruntów polskich (Młynarek i in., 1997)

Ż – żwir, Po – pospółka, Pd – piasek drobny, P – piasek, Pg – piasek gliniasty, Pπ – piasek pylasty, Gp – glina piaszczysta, Gπ – glina pylasta, Iπ – il pylasty, I – il

Tested gytija of „Żoliborz glacial tunnel valley” on the Robertson profiling chart adapted for Polish soils (Młynarek *et al.*, 1997)

Ż – gravel, Po – gravelly sand, Pd – fine sand, P – sand, Pg – clayey sand, Pπ – silty sand, Gp – sandy silty clay, Gπ – clayey silt, Iπ – silty clay

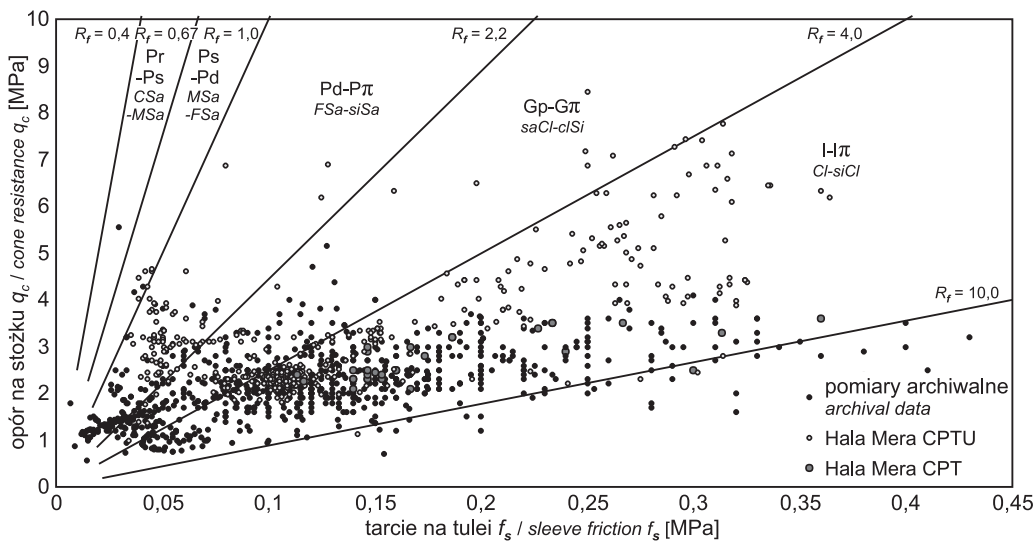


Fig. 7. Wybrane pomiary gytii „rynny żoliborskiej” na nomogramie klasyfikacyjnym Marra

R_f – współczynnik tarcia, Pr – piasek grubo, Ps – piasek średni; pozostałe objaśnienia jak na [fig. 6](#)

Tested gytija of „Żoliborz glacial tunnel valley” on the classification chart by Marr

R_f – friction ratio, Pr – coarse sand, Ps – medium sand; other explanations as in [Fig. 6](#)

GYTIE „RYNNY ŻOLIBORSKIEJ” NA DIAGRAMIE KLASYFIKACYJNYM DMT MARCHETTIEGO I CRAPPSA

Wyniki dwóch badań dylatometrem Marchettiego (DMT), wykonanych w reperowym profilu „Hala Mera”, zinterpretowano metodami według Marchettiego i in. (2001). Na diagramie klasyfikacyjnym Marchettiego i Crappa (1981 w: Marchetti i in., 2001) (fig. 8) dla szacowania rodzaju gruntów i ich gęstości objętościowej ponad 90% obliczeń wskaźnika materiałowego (I_D) mieściło się w przedziale od 0,6 do 1,8, przy module dylatometrycznym (E_D) od 8 do 25 MPa.

Taki rozkład pomiarów pozwala porównać zachowanie się gytii „rynni żoliborskiej” w badaniach dylatometrycznych do zachowania się pyłów o średnim ciężarze objętościowym $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$. Połowa tych pomiarów wskazuje na obecność w podłożu budowli typowych pyłów (*silt*), a prawie 45% pyłów ilastych (*clayey silt*). Pozostałe 5% pomiarów zlokalizowanych zostało w polu właściwym dla pyłów piaszczystych (*sandy silt*) (Marchetti i in., 2001). W trakcie

badania makroskopowych przy opróbowaniu granulometrycznie oznaczono grunty jako pyły i pyły drobne (wg PN-EN 14688-1:2006).

Laboratoryjne badania uziarnienia gruntów po usunięciu substancji organicznej (I_{om}), której zawartość w profilu wynosi od 9 do 33%, wykazały skład granulometryczny odpowiadający gruntom pylastym (pyłom piaszczystym, pyłom oraz glinom pylastym wg PN-B-02480:1986). Większa zawartość frakcji ilowej $f_i \approx 40\%$ (w formie węglanowej) została odnotowana w eemskiej kredzie jeziornej w rejonie stacji metra na Wawrzyszewie. LaborATORYJNE badania uziarnienia potwierdzają zachowanie się gytii „rynni żoliborskiej” w testach DMT. Badania te nie potwierdziły jednak ciężaru objętościowego (γ) analizowanych gruntów. Zawartość substancji organicznej około 10–30% powoduje obniżenie ciężaru objętościowego do 13–15 kN/m^3 , bardziej odpowiadającego gruntem organicznym niż ciężar wyliczony na podstawie

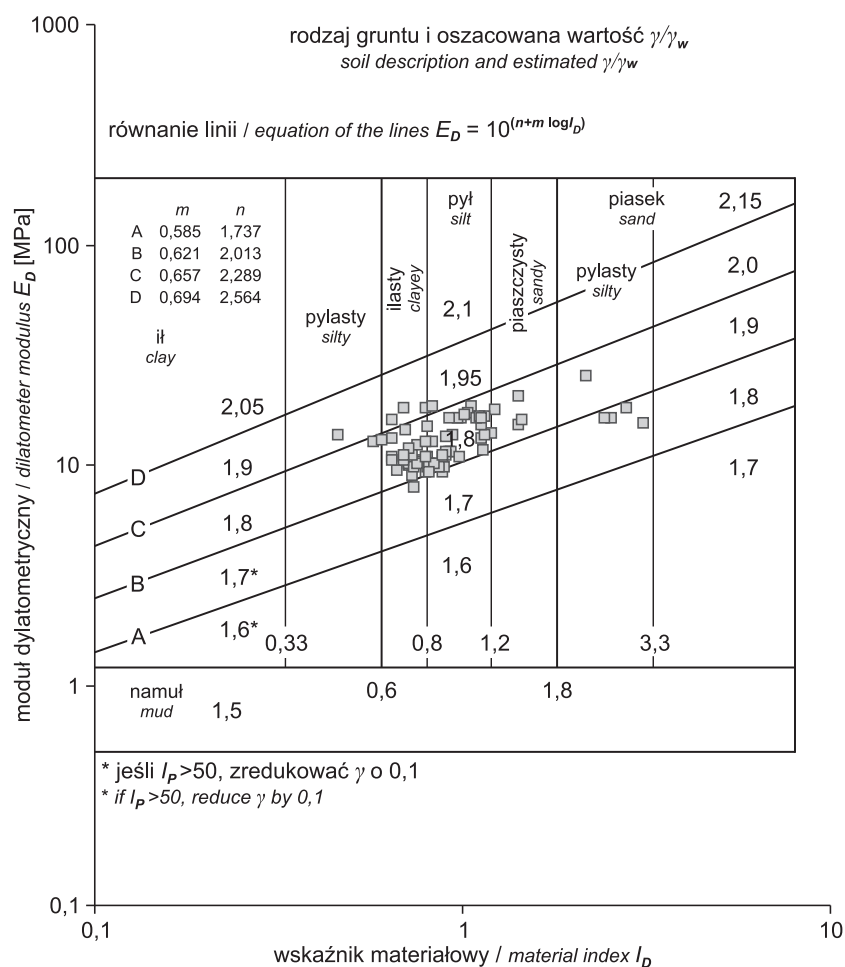


Fig. 8. Wyniki dwóch badań dylatometrycznych w profilu reperowym „Hala Mera” na diagramie klasyfikacyjnym Marchettiego i Crappa (1981 w: Marchetti i in., 2001)

The results from two dilatometer tests (DMT) on gytija in the benchmark point “Hala Mera” on the DMT classification chart by Marchetti and Craps (1981 in: Marchetti *et al.*, 2001)

badan DMT, który wynosi 18 kN/m^3 . Oszacowany na podstawie badań dylatometrycznych ciężar objętościowy gytii „rynny żoliborskiej” jest większy o $\sim 20\%$ od ciężaru obję-

tościowego rzeczywistego i może być kolejnym dowodem „wzmocnienia się” badanego gruntu w historii geologicznej i zachowania się zbliżonego do gruntów mineralnych.

SPOSOBY INTERPRETACJI PARAMETRÓW GEOTECHNICZNYCH

Przy interpretacji pomiarów dylatometrycznych opierano się wyłącznie na wzorach empirycznych Marchettiego i in. (2001) z zastosowaniem bezpośrednich pomiarów ciśnienia (p_0) i (p_1) oraz przeliczeń tych pomiarów na wskaźniki K_D , I_D oraz na moduł dylatometryczny (E_D). Przy interpretacji sondowań statycznych CPT/CPTU w celu wyprowadzenia parametrów geotechnicznych wykorzystano sprawdzone dla innych gruntów i wykorzystywane w praktyce dokumentacyjnej wzory empiryczne z norm: PN-B-04452:2002 i PN-EN 1997-2:2009 – Eurokod 7 oraz zalecane w literaturze

branżowej (Sanglerat, 1972; Lunne i in., 1997; Sikora, 2006; DeGroot, Lutenegeger, 2005 w: Młynarek, Wierzbicki, 2007).

Na podstawie tych dwóch najpopularniejszych obecnie badań polowych (CPT/CPTU i DMT) dla oznaczania właściwości podłoża budowli oraz przy uwzględnieniu wyników badań laboratoryjnych przedstawiono sposoby interpretacji i charakterystykę wybranych parametrów geotechnicznych. Współczynniki empiryczne dla sondowań statycznych przyjęto w porównaniu z „zachowaniem się” gruntu pod stożkiem lub korelowano je z pomiarami laboratoryjnymi.

MODUŁ ŚCISLIWOŚCI

Przy ocenie odkształcalności posłużono się formułą obliczającą styczny moduł ściśliwości według wzoru $M = \alpha q_c$ (*constrained modulus* M wg Lunnego i in., 1997, określane w literaturze również modułem edometrycznym (E_{oed}) wg PN-EN 1997-2:2009 – Eurokod 7 lub modułem ściśliwości wtórnej (M) wg Sikory, 2006). Przeprowadzono analizy z zastosowaniem różnych wartości współczynnika α .

Dla pyłów o małej plastyczności (Sikora, 2006) (*low plasticity* wg Lunnego i in., 1997) – jak pokazują pomiary DMT oraz analizy makroskopowe i laboratoryjne – zaobserwowano niezgodności i wykluczanie się wartości współczynnika α w zależności od zastosowanej literatury branżowej i norm. Dla pyłów o małej plastyczności przy oporze na stożku $q_c > 2 \text{ MPa}$ przyjmowano sugerowaną wartość współczynnika α z przedziału od 3 do 6 (Lunne i in., 1997 w: Sikora, 2006). Następnie przeprowadzono obliczenia dla $q_c \geq 2 \text{ MPa}$, przyjmując współczynnik α w granicach od 1 do 2 według Sanglerata (1972) oraz normy PN-EN 1997-2:2009 – Eurokod 7.

Ostatecznie założono, że gytie mają właściwości podobne jak ły o małej plastyczności (Lunne i in., 1997), przy oporze na stożku $q_c > 2 \text{ MPa}$ ($1 < \alpha < 2,5$). Uzasadniało to zachowanie się gruntów w trakcie badań CPT/CPTU oraz ocenę plastyczności w terenie i w laboratorium. Najwłaściwsze zatem, według literatury, wydaje się przyjęcie współczynnika $\alpha = 2,5$. Wartość ta wydaje się być kompromisem między założeniem, że gytie „rynny żoliborskiej” zachowują się w badaniach polowych jak ły (CPT/CPTU) lub też jak pyły (DMT, ocena makroskopowa i laboratoryjna). Obliczenia zestawiono z wynikami badań laboratoryjnych modułu siecznego i interpretacją DMT (fig. 9).

Dla analizowanego profilu „Hala Mera” średnia modułu edometrycznego (E_{oed}) wynosi 8 MPa , a dla wszystkich analizowanych profili (PN-EN 1997-2:2009 – Eurokod 7) $6,9 \text{ MPa}$, przy przyjęciu współczynnika $\alpha = 2,5$. Wartość 8 MPa jest po-

nad trzykrotnie wyższa niż średnia wartość modułu edometrycznego z badań laboratoryjnych ($M_0 = 2,5 \text{ MPa}$), dla wyżej leżącej (7–11 m) warstwy gytii dla przedziałów obciążeń: 25–50; 50–100; 100–200 i 200–400 kPa oraz porównywalna ($M_0 = 7,4\text{--}8,5 \text{ MPa}$) dla warstw głębszych (12–18 m) dla przedziałów obciążeń: 100–200 i 200–400 kPa. Średnia wartość modułu edometrycznego (M_0) dla wskazanych przedziałów obciążeń w laboratorium wynosi $3,4 \text{ MPa}$.

Porównując wyniki obliczeń modułu na podstawie pomiarów dylatometrycznych, największą zgodność otrzymano przy przyjęciu współczynnika $\alpha = 5,5$ dla górnej części przykładowego profilu (7–11 m) oraz $\alpha = 8$ dla środkowej (12–14 m) i dolnej (16–18 m) (fig. 9). Średnie moduły (M) na podstawie badań dylatometrycznych wyniosły $18,5 \text{ MPa}$ i w stosunku do innych metod oznaczania wydają się być zawyżone oraz przeszacowane. Jednakże przyjęte także w pracach dokumentacyjnych, dotyczących osiedla „Szczęśliwicka”, moduły edometryczne $M_0 = 20 \text{ MPa}$ dla gruntów twardoplastycznych i półzwardych (Dragowski i in., 1993) okazały się właściwe. Obserwacje terenowe osiadań także pokazują, że odkształcenia podłoża pod obciążeniami w podobnych warunkach gruntowych (gytie „rynny żoliborskiej” ze stropem na głębokości 3–7 m p.p.t.) przy obciążeniach jednostkowych 100–200 kPa nie przekroczyły 20 mm (np. obiekty przy ulicy Wieluńskiej w Warszawie; Pogorzelska, 1990). Zgodność modułu siecznego z badań laboratoryjnych z modułem stycznym z sondowań CPT/CPTU otrzymuje się dopiero przy przyjęciu współczynnika $\alpha = 1$, co dla gytii „rynny żoliborskiej” nie wydaje się mieć uzasadnienia w obserwacjach terenowych. Niezgodności między edometrycznymi modułami ściśliwości, zbadanymi w laboratorium, a rzeczywistymi pomiarami odkształceń podłoża budowli (Pogorzelska, 1990) w świetle zebranych danych wymagają dalszych pomiarów i obserwacji w celu potwierdzenia wartości założonego współczynnika α .

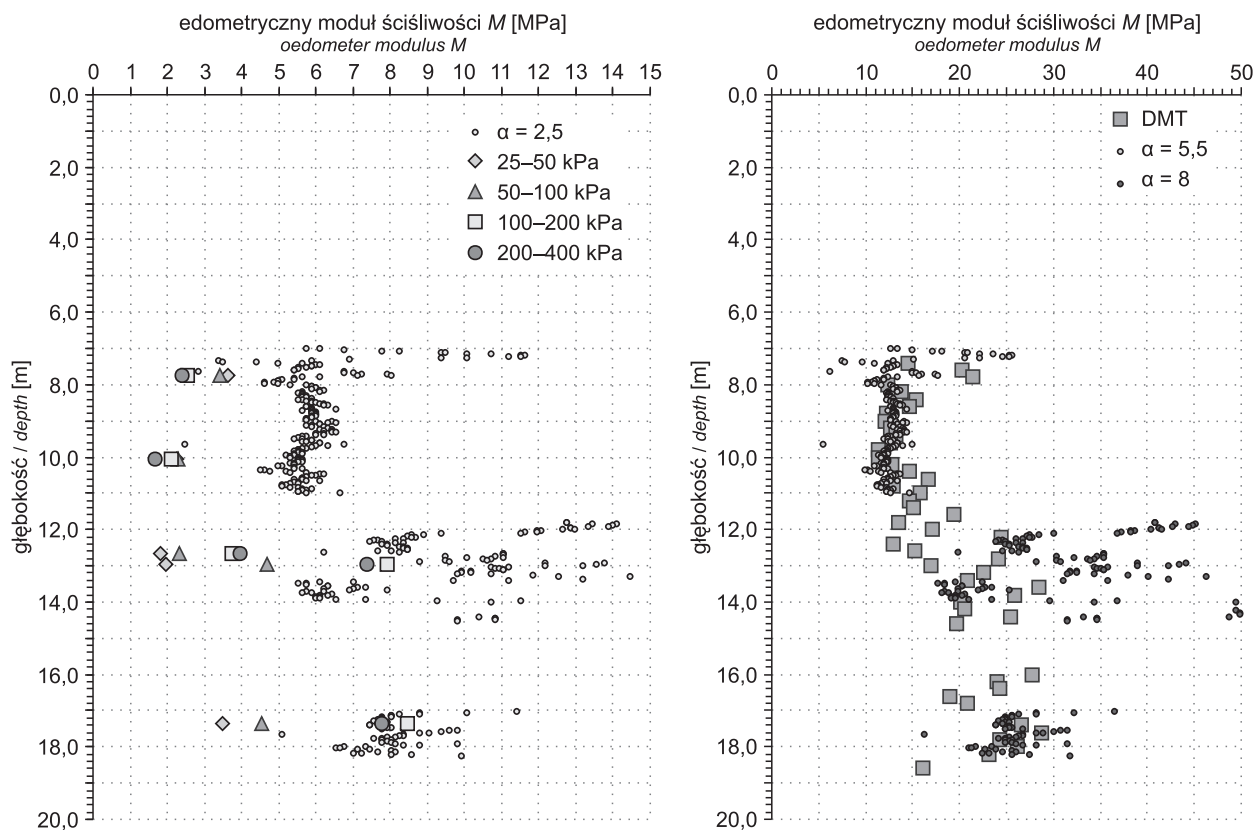


Fig. 9. Wykresy modułów ścisłości według CPT/CPTU w zależności od zastosowanych współczynników α i ich zgodność z badaniami laboratoryjnymi i DMT na przykładzie profilu „Hala Mera”

Oedometer modulus from CPT/CPTU in the correlation with the α values, laboratory tests and DMT results in the benchmark point "Hala Mera"

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCINANIE

Parametrem mechanicznym analizowanym *in situ* była wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu. Wytrzymałość gytii badano przy zastosowaniu sondowania CPT/CPTU i dylatometru. Przydatność oryginalnej zależności Marchettiego do oceny wytrzymałości na ścinanie na podstawie badań DMT $c_u = 0,22\sigma_v'(0,5K_D)^{1,25}$ wykazali stosując badania modelowe DeGroot i Lutenegeger (2005 w: Młynarek, Wierzbicki, 2007). W praktyce przy dokumentowaniu podłoża budowli sondowaniami CPT/CPTU wykorzystuje się jednak sprawdzoną zależność $c_u = (q_c - \sigma_{v0})/N_k$ lub $c_u = (q_t - \sigma_{v0})/N_k$ w przypadku badań stożkiem z końcówką elektryczną (Lunne i in., 1997; PN-B-04452:2002; Robertson, Cabal (Robertson), 2010). Wówczas ostateczna wytrzymałość na ścinanie bez odpływu zależy od przyjętego dla danego rodzaju gruntu współczynnika stożka N_k (fig. 10). Generalnie zalecane jest stosowanie współczynnika N_k w przedziale 10–20 (PN-B-04452:2002), 11–19 (Lunne i in., 1997; Sikora, 2006), przy średniej w granicach 15–17, lub $N_{kt} - 10-20$ (Sikora, 2006; Młynarek, Wierzbicki, 2007), przy średniej 15 (Sikora, 2006) lub też $N_{kt} - 0-18$, przy średniej 14 (Robertson, Cabal (Robertson), 2010). Konkretna wartość przyjętego współczynnika zależy od wskaźnika plastyczności

(I_p), z którego wzrostem współczynnik stożka także wprost proporcjonalnie rośnie (Lunne i in., 1997; Sikora 2006). Współczynnik empiryczny (N_k) zależy również wprost proporcjonalnie od wskaźnika prekonsolidacji – OCR (Lunne i in., 1997; Młynarek, Wierzbicki, 2007). W zbadanych przypadkach dopuszcza się przyjmowanie wartości współczynnika stożka N_k/N_{kt} poza tymi przedziałami. Lunne i in. (1997) podają możliwe wartości N_{kt} od 8 do 29 (za: Rad, Lunne, 1988) lub od 10 do 30 (za: Powell, Quarterman, 1988). Polska Norma PN-B-04452:2002, na podstawie załączonej tabeli, dopuszcza stosowanie współczynnika stożka N_k w przedziale 1–25. Na szczególną uwagę zasługują tutaj gytie, dla których dokument ten uzależnia przyjęcie współczynnika w granicach od 1 do 6 od uśrednionej wartości oporu na stożku (q_c) w zakresie 0,2–4,0 MPa. Przyjmując zależność liniową dla uśrednionej wartości oporu na stożku $q_c = 2,7$ MPa, dla gytii „rynny żoliborskiej” zgodnie z normą należałoby przyjąć wartość $N_k = 4,3$. Dla tak założonego współczynnika średnia wartość wytrzymałości na ścinanie (c_u) w reperyjnym profilu badawczym „Hala Mera” wyniosłaby 700 kPa. Przyjmując najwyższy zgodny z normą współczynnik $N_k = 6$, średnia wartość c_u wynosi 500 kPa, co dla gytii w obu przy-

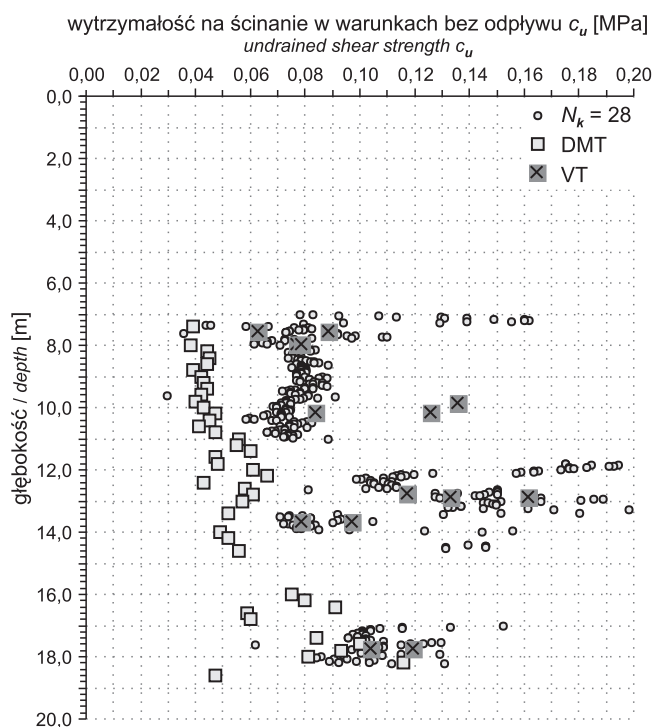


Fig. 10. Wykresy wytrzymałości na ścinanie według CPT/CPTU w zależności od zastosowanych współczynników N_k i ich zgodność z badaniami laboratoryjnymi i DMT na przykładzie profilu „Hala Mera”

Shear strength from CPT/CPTU in the correlation with cone factor N_k , laboratory tests and DMT results in the benchmark point “Hala Mera”

padkach wydaje się być wartością znacznie przeszacowaną. Propozycja Szwedzkiego Instytutu Geotechnicznego (SGI) (Sikora, 2006) sugeruje przyjęcie współczynnika stożka $N_k = 24$, przy którym średnia wartość c_u jest równa 126 kPa i jest blisko dwukrotnie wyższa niż wyniki z pomiarów dylatometrycznych, gdzie średnia wartość $c_{uDMT} = 57$ kPa. Zgodność wytrzymałości na ścinanie z badań DMT i CPT/CPTU osiągnięto dopiero po przyjęciu współczynnika $N_k = 53!$, który znacznie przewyższa maksymalne współczynniki proponowane w literaturze. W przypadku dużych projektów geotechnicznych, przy których wykonuje się wytrzymałościowe testy laboratoryjne, Młynarek i Wierzbicki (2007) sugerują wyprowadzenie własnej zależności na podstawie wartości wytrzymałości na ścinanie (c_u) wyznaczonych w laboratorium. Postanowiono wyznaczyć taką zależność w oparciu o badania laboratoryjne sondą krzyżakową. Średnia wytrzymałość na ścinanie (c_u) z 16 analiz, przeprowadzonych na

próbekach gruntu z różnych głębokości wzdłuż całego profilu gytii, wyniosła 134 kPa. Zastosowano współczynnik redukcyjny w funkcji granicy płynności $\mu = f(w_L)$. Chociaż wyprowadzenie tego współczynnika w oparciu o wartość granicy płynności może być niemiernym parametrem fizycznym ze względu na dużą średnią zawartość substancji organicznej $I_{om} = 20\%$, to otrzymana wartość μ równa 0,80 jest zgodna ze współczynnikiem podanym w pracy Lechowicza (1992) na podstawie badań granicy płynności w „młodych” gytiiach holocenijskich. W wyniku obliczeń średnia wytrzymałość na ścinanie wyniosła 107 kPa. Dla tak pomierzonej wartości wyprowadzono współczynnik stożka $N_k = 28$, który jest bliższy propozycji Szwedzkiego Instytutu Geotechnicznego.

W odniesieniu do badań i korelacji wytrzymałości na ścinanie (c_u) oraz stopnia plastyczności (I_L) według Borowczyka i Zaremby (1984) wartości wytrzymałości równej 107 kPa odpowiada stopień plastyczności 0,15, a według Frankowskiego (1993) – 0,20. Takie wartości odpowiadają stanowi twaroplastycznemu i są od 3 do 4 razy większe niż otrzymane w trakcie badań laboratoryjnych gytii „rynny żoliborskiej” oraz stanom interpretowanym na podstawie sondowań CPT/CPTU. Uśredniony stopień plastyczności (I_L) badanych gytii równy 0,05 odpowiada wytrzymałości na ścinanie odpowiednio: według Borowczyka i Zaremby (1984) – 139 kPa, a według Frankowskiego (1993) – 159 kPa. Wartości te nie odbiegają znacznie od nieredukowanych wyników wytrzymałości na ścinanie otrzymywanych laboratoryjną ścinarką obrotową w profilu reperowym „Hala Mera”. Dla uśrednionej wartości oporu na stożku (q_c) w gruntach spoistych równej 2,2 MPa Borowczyk i Zaremba (1984) z dostatecznym przybliżeniem określili spójność gruntu interpretowaną jako wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu (c_u) równą 146 kPa, co odpowiada stopniowi plastyczności $I_L = 0,04$. Taką samą uśrednioną wartość stopnia plastyczności otrzymano dla gytii w reperowym punkcie przy interpretacji sondowań CPT/CPTU wzorem dla gruntów spoistych o zawartości frakcji ilowej $f_i > 30\%$ według PN-B-04452:2002. Tak duże zgodności wytrzymałości na ścinanie (c_u) wyprowadzone z sondowań CPT/CPTU z danymi archiwalnymi, z wynikami bezpośrednich badań wytrzymałości na ścinanie w laboratorium oraz z zależnościami $c_u = f(I_L)$ potwierdzają przyjęcie współczynnika stożka $N_k = 28$ dla gytii „rynny żoliborskiej”. Dla weryfikacji tego współczynnika celowe jest kontynuowanie analiz i pomiarów laboratoryjnych oraz prowadzenie terenowych bezpośrednich badań wytrzymałości na ścinanie. Wyprowadzenie najbardziej wiarygodnej wartości wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu (c_u) jest bardzo istotne, ponieważ parametr ten jest wykorzystywany w praktyce do szacowania nośności granicznej (q_{gr}).

PODSUMOWANIE

Na podstawie badań reperowych, obserwacji terenowych oraz analizy materiałów archiwalnych osady węglanowe z Warszawy wydają się być „mocnymi” gruntami na tle słabych gruntów organicznych, za jakie uważa się gytie. Widocz-

na makroskopowo tekstura łupkowa znacznie różni się od charakterystycznego dla młodych gytii galaretowatego sapropelu.

Wyprowadzone współczynniki na potrzeby interpretacji sondowań CPT/CPTU są częściowo zgodne z literaturą i wy-

nikami prezentowanymi przez innych badaczy. Współczynniki stożka N_k proponowane w normie (PN-B-04452:2002) wydają się być niedoszacowane w stosunku do gytii „rynny żoliborskiej”, co przy analizie wyników z 15 sondowań w 6 punktach wykluczało ich przydatność.

Badania pokazują dużą jednorodność gytii na przestrzeni całej „rynny żoliborskiej” w Warszawie oraz niewielki rozrzut wyników w profilach pionowych.

Badane gytie z wysokim prawdopodobieństwem nie są gruntami słabonośnymi. Zgodnie z Sangleratem (1972) grunty spoiste słabonośne charakteryzują się oporem gruntu $q_c < 0,6$ MPa. Grunt, dla którego opór ten zawiera się w przedziale 0,6–1,2, powinien być poddany dodatkowym badaniom. Grunty spoiste w podłożu budowli, dla których opór na stożku (q_c) wynosi $>1,2$ MPa, nie powinny stanowić problemu. Średnia wartość tego oporu dla gytii „rynny żoliborskiej” wynosiła 2,7 MPa, a dla 80% odczytów $>2,0$ MPa.

Orientacyjna wstępna nośność tych gruntów (q_{gr}), w odniesieniu do literatury dotyczącej gruntów słabonośnych w Polsce przy uśrednionej i zredukowanej właściwym współczynnikiem μ wartości $c_u = 107$ kPa, powinna wynosić odpowiednio $\approx 6c_u$ (Schwab, 1978) oraz $\approx 5,14c_u$ (Molisz i in., 1986). Przy takiej interpretacji warszawskie gytie „rynny żoliborskiej” charakteryzują się szacowaną nośnością $q_{gr} > 0,5$ MPa.

Podziękowania. Badania i analizy wykonano dzięki pomocy koleżanek i kolegów z Wydziału Geologii UW i Laboratorium Hydrogeologicznego i Geologiczno-Inżynierskiego PIG – PIB przy wsparciu finansowym Uniwersytetu Warszawskiego oraz Mazowieckiego Stypendium Doktoranckiego w ramach Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego.

LITERATURA

- BOROWCZYK M., ZAREMBA A., 1984 — Wytyczne badania gruntów słabonośnych dla potrzeb budownictwa mieszkaniowego. Centralny Ośrodek Studialno-Projektowy Budownictwa Mieszkaniowego „Inwestprojekt” Spółdzielnia Osób Prawnych. Zespół Geotechniki. Warszawa.
- DRĄGOWSKI A., DOBAK P., ŁUKASZEWSKI P., WRÓBLEWSKI J., 1993 — Posadowienie bezpośrednio osiedla mieszkaniowego w trudnych warunkach geotechnicznych podłoża. *W: X Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania 21–22 października 1993: 223–231.* Warszawa.
- FRANKOWSKI Z., 1993 — Ocena parametrów wytrzymałościowych gruntów spoistych metodami polowymi. *W: X Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania 21–22 października 1993: 27–30.* Warszawa.
- FRANKOWSKI Z., WYSOKIŃSKI L., 2000 — Atlas geologiczno-inżynierski Warszawy 1:10 000. Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KŁĘBEK A., 1979 — Gytie jako podłoże budowlane. *W: Budownictwo na gruntach słabych, nasypowych i antropogenicznych rejonu Warszawy: 163–167.* NOT, Warszawa.
- KŁĘBEK A., 1980 — Gytie w dokumentowaniu geologiczno-inżynierskim. Inżyniersko-geologiczne problemy badań pokrywy czwartorzędowej w Polsce. *W: Narada naukowa „Geoprojektu” Bocheniec k/Małogoszcza, maj 1980: 181–190.* Wyd. Geol., Warszawa.
- LECHOWICZ Z., 1992 — Ocena wzmocnienia gruntów organicznych obciążonych nasypem. Wyd. SGGW, Warszawa.
- LUNNE T., ROBERTSON P.K., POWELL J.J.M., 1997 — Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic and Professional, London, UK, Hardcover.
- MARCHETTI S., MONACO P., TOTANI G., CALABRESE M., 2001 — The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations. A Report by the ISSMGE Committee TC16. Proc. IN SITU 2001 — Intl. Conf. on in situ Measurement of Soil Properties, Bali, Indonesia, May 2001.
- MŁYNAREK Z., TSCHUSCHKE W., WIERZBICKI J., 1997 — Klasyfikacja gruntów podłoża budowlanego metodą statyczne sondowania. *W: XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Geotechnika w budownictwie i transporcie: 119–126.* Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- MŁYNAREK Z., WIERZBICKI J., 2007 — Nowe możliwości i problemy interpretacyjne polowych badań gruntów. *W: Współczesne problemy geologii inżynierskiej w Polsce. Geologos, 11: 97–118.* Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Instytut Geologii. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań.
- MOLISZ R., BARAN L., WERNO M., 1986 — Nasypy na gruntach organicznych. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- MORAWSKI W., 1978 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Warszawa-Zachód. Wyd. Geol., Warszawa.
- MORAWSKI W., 1980 — Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000, ark. Warszawa-Zachód. Wyd. Geol., Warszawa.
- PN-B-02480:1986 — Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów. PKN, Warszawa.
- PN-B-04452:2002 — Grunty budowlane. Badania polowe. PKN, Warszawa.
- PN-EN ISO 14688-1:2006 — Eurokod 7. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1 – Oznaczanie i opis. PKN, Warszawa.
- PN-EN 1997-2:2009 — Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2 – Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego. PKN, Warszawa.
- POGORZELSKA J., 1990 — Album osiadań budynków mieszkalnych obserwowanych w ITB: 277–285. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.
- ROBERTSON P.K., CABAL (ROBERTSON) K.L., 2010 — Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering. Gregg Drilling & Testing, Inc, Signal Hill, California, US.
- SANGLERAT G., 1972 — The penetrometer and soil exploration. Interpretation of penetration diagrams – theory and practice. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands.
- SCHWAB E.F., 1978 — Bearing capacity, strength and deformation behavior of soft organic sulphide soils. Royal Institute of Technology. Department of Soil and Rock Mechanics, Stockholm.
- SIKORA Z., 2006 — Sondowanie statyczne. Metody i zastosowanie w geoinżynierii. Wyd. Nauk.-Techn., Warszawa.

SUMMARY

“Żoliborz glacial tunnel valley” (“rynna żoliborska”) is the Eemian palaeoaquifer located in Warsaw and filled with organic and lacustrine sediments – gytja. It occupies an area of approximately 12 km in length and a few hundred meters in width. Nowadays, sediments from this palaeoaquifer with a roof at 4 to 7 m depth and thickness up to 20 m are the sub-soil for engineering constructions in Warsaw like foundations of buildings, roads, water pipes and water reservoirs. Gytja is commonly considered as “soft” soil but the measurements by cone penetration tests (CPT/CPTU) locate the results on calcareous sediments of “Żoliborz glacial tunnel valley” away from organic soils when compared at profiling charts used for estimating the soil type. Statistical analysis revealed the mean cone resistance q_c/q_t at a level of 2.7 MPa and 95% of the results of cone resistance q_c/q_t were over 2.0 MPa. The value of cone resistance q_c/q_t and a friction ratio R_f ranging from 1 to 13% clustered most data in the fields which are defined as mineral clayey soils. A correlation between measurements by mechanical and electrical cone was also derived. The value of the correction factor β for Warsaw gytja was at level of 1.6 in the benchmark point “Hala Mera”. From flat dilatometer tests (DMT), 90% values of material index I_D of tested soils ranged from 0.6 to 1.8 and behaved like silts with the mean unit weight $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$. Approximately 45% of these results were clayey silts. Laboratory tests of particle size distribution confirmed behavior of soils obtained from DMT test. For interpretation of deformation and mechanical parameters, appropriate factors were applied according to the soil type. For DMT tests original formulas from the “Report by the ISSMGE Committee TC16” were used. For the results from cone penetration tests, the formulas and factors for cohesive soils with clay fraction content $f_i > 30\%$ were applied because more than 60% of the results from CPT/CPTU clustered tested gytja in fields defined as clays and silty clays. For estimation of constrained modulus M of tested gytja, the coefficient $\alpha = 2.5$ was applied and a mean value

of $M = 6.9 \text{ MPa}$ was obtained. Correlation of M from CPT/CPTU with the one from DMT tests was acquired at $\alpha = 5.5$. The assumption of constrained modulus about 20.0 MPa ($M_{DMT} = 18.5 \text{ MPa}$) is confirmed in archival data and settlements observations of buildings located within “Żoliborz glacial tunnel valley”. Laboratory tests revealed the mean oedometer modulus M of 3.5 MPa. Cone factor N_k/N_{kt} for estimating undrained shear strength c_u was derived on the basis of laboratory tests. The results from laboratory vane test were reduced by correction factor $\mu = f(w_L)$. A calculated value of $\mu = 0.8$ was consistent with cited literature. On the basis of laboratory test results, cone factor $N_k = 28$ was derived and it was near to $N_k = 24$ proposed by Swedish Geotechnical Institute (SGI). An adoption of derived cone factor $N_k = 28$ was confirmed by published correlations with physical parameters of soil i.e. liquid limit w_L with a mean value of 0.04. Cone factors for gytja given in Polish geotechnical standards (PN), ranging from 1 to 6, were absolutely rejected for soils of “Żoliborz glacial tunnel valley”. For such low values of N_k , minimum undrained shear strength was about $c_u = 500 \text{ kPa}$. That value seemed to be greatly overestimated. Flat dilatometer tests (DMT) results gave the value of c_u at a level 57 kPa and correlated with cone penetration tests (CPT/CPTU) only with cone factor $N_k = 53$! This value far exceeds the limits and appeared also to be overestimated. In the light of field investigations, gytja of “Żoliborz glacial tunnel valley” is homogenous throughout palaeoaquifer and has a small variation in vertical profiles. Macroscopically visible shale texture, observed in the cores for laboratory testing, confirmed the consolidation due to the load in the geological past. Stiff and very stiff consistency of Warsaw gytja is far from gelatinous sapropel characteristic for this type of Holocene sediments. Bearing capacity estimated at 0.5 MPa from shear strength confirms the stiffness of soil tested.