

Właściwości mechaniczne ilów zastoiskowych z Wierzbicy k. Serocka w świetle wybranych polowych badań geologiczno-inżynierskich

Piotr Zawrzykraj¹



Mechanical properties of ice-dammed clays from Wierzbica near Serock in the light of selected geological and engineering in situ tests. Prz. Geol., 65: 32–43.

Abstract. The paper presents the results of geological investigations of ice-dammed clays from Wierzbica near Serock (Central Poland). Physical and mechanical properties of varved clays were determined mainly during in situ tests. Different available equipment and methods were used for determining current geological and engineering conditions. Static tests CPT(U), dilatometer tests (DMT) and pressuremeter tests (PBP) were performed and compared. Deformation modulus E , shear strength c_u , yield pressure σ'_y , limit pressure p_l , and other parameters were evaluated. The selected methods were compared with respect to differences between the obtained results. With the use of statistical methods, the variability of ice-dammed lake sediments is presented. For this reason, the parameters should be carefully estimated. The geological environment is still diverse and difficult to apprehend. Histograms of collected data illustrate distribution of mechanical properties of varved clays from Wierzbica.

Keywords: varved clays, mechanical properties, static sounding CPT(U), dilatometer DMT, pressuremeter PBP, yield pressure, compressibility, shear strength, in situ tests, statistical analysis

Jednym z głównych zainteresowań geologii inżynierskiej jest poprawne i możliwie dokładne rozpoznanie wzajemnych relacji zachodzących pomiędzy środowiskiem geologicznym a obiektem budowlanym. Środowisko geologiczne jest ośrodkiem przyrodniczym stworzonym przez naturę, którego swoistą wrodzoną cechą jest niejednorodność i często duża zmienność właściwości fizyczno-mechanicznych. Ośrodek gruntowy to także przestrzeń, w której zachodzi wiele zjawisk i procesów, również tych inicjowanych przez działalność człowieka. Są to procesy zmienne w czasie, o różnej intensywności, zależne od warunków zewnętrznych. Generuje to szereg problemów związanych z metodyką badawczą oraz interpretacją wyników badań (Kaczyński i in., 2008). Ciągłe postępujący rozwój i zbierane doświadczenia stopniowo zawężają różnice między oczekiwanym zachowaniem się gruntu a stanem rzeczywistym. Za pomocą dostępnej aparatury tworzymy coraz lepszy i bardziej wiarygodny model budowy geologicznej. Znajomość procesów zachodzących w gruncie podczas jego historii geologicznej ułatwia przewidywanie i rozumienie aktualnego zachowania się podłoża gruntowego i w efekcie pomaga w sposób trwały, racjonalny i ekonomiczny projektować obiekty budowlane.

Tematem artykułu jest przede wszystkim ocena cech mechanicznych ilów zastoiskowych o strukturze warwowej, które występują w rejonie Wierzbicy k. Serocka. Osady te w ubiegłych stuleciach były eksploatowane celem wytwarzania z nich materiałów budowlanych, głównie cegieł.

SYTUACJA GEOLOGICZNA I GEOMORFOLOGICZNA

Obszar badań znajduje się na zboczu doliny rzeki Klusówka, która rozcina dwa wzgórza moren czołowych – Wierzbicką i Dzierżeniną. Morena Wierzbicka jest to

wzgórze o wysokości względnej ok. 34 m, długości 6 km i szerokości 1,5 km, o przebiegu równoleżnikowym. Spadek terenu północnego stoku wynosi 10°, a południowego 6–7°. Morena Dzierżeniną to wysokie na 13 m, długie 2,5 km i ok. 1,5 km szerokie wzgórze, o spadku terenu od 5 do 8° (Nowak, 1969). Sytuację geomorfologiczną przedstawiono na rycinie 1.

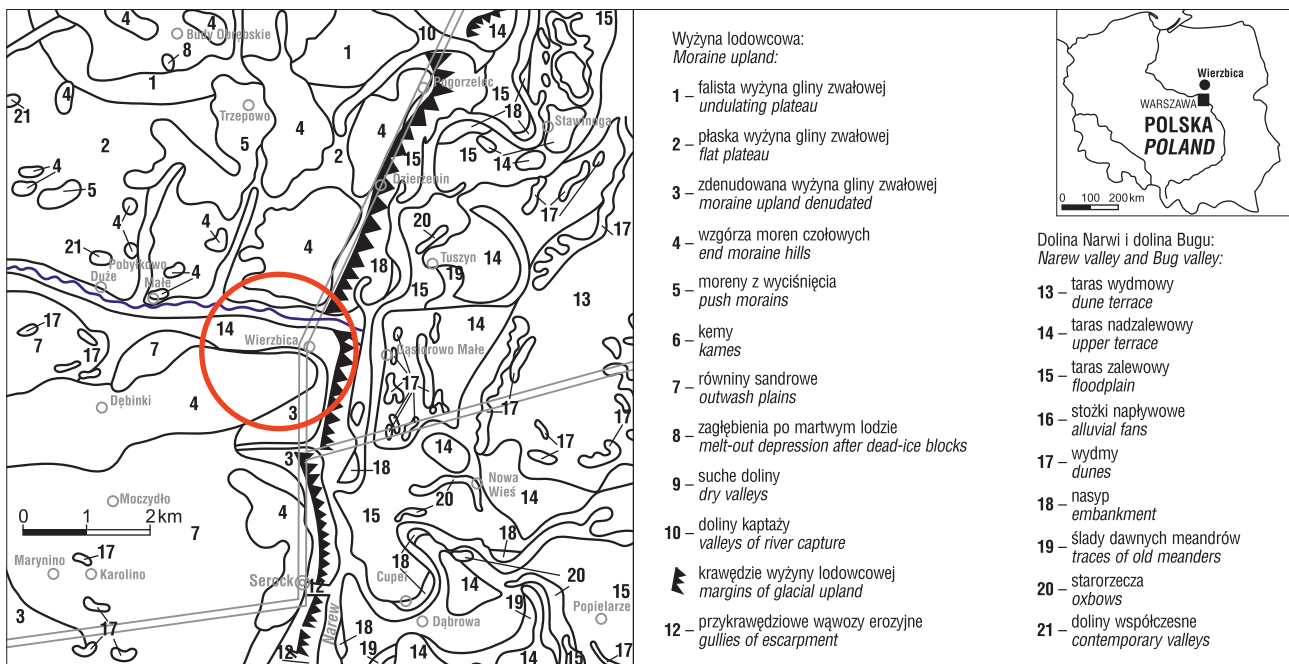
Wzdłuż północnej granicy terenu badań przepływa (w kierunku wschodnim) rzeka Klusówka, jest ona prawym dopływem rzeki Narew. W dolinie rzecznej zaznacza się taras erozyjny zbudowany z ilów warwowych. W jego obrębie znajduje się nieczynna cegielnia, a obok poligon badawczy, na którym przeprowadzono omawiane badania (ryc. 2).

Złoże cegielni Wierzbicka o powierzchni 27,5 ha zostało udokumentowane w 1954 r. Na obszarze o wielkości 35 ha złoże ilów warwowych rozpoznano 72 wierceniami w węzłach siatki kwadratowej o boku ok. 50 m. Seria ilasta ma średnią miąższość ok. 2 m, maksymalnie do 8 m. Stanowią ją ility warwowe barwy brązowo-szarej powstałe w czasie stadiału wkry zlodowacenia warty. Poniżej zalegają fluwiogłajalne osady piaszczysto-zwirowe. Schematyczny przekrój geologiczny przez stanowisko badawcze zaprezentowano na rycinie 3.

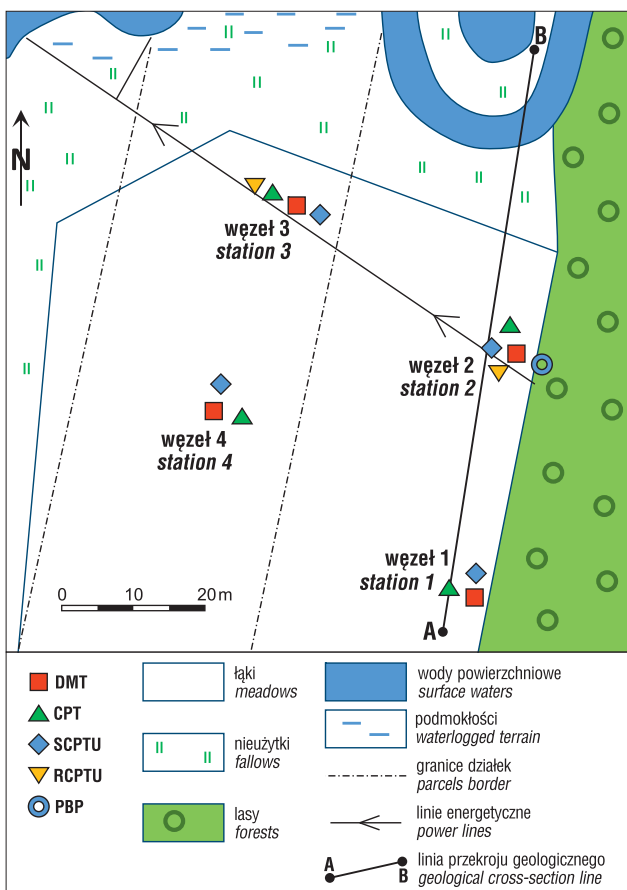
SKŁAD MINERALNY

Opis składu mineralnego znajdujemy w pracy Bojarskiego (1982). Prowadził on badania surowcowe w 11 kopalniach na obszarze zastoiska warszawskiego. Do wyznaczenia składu mineralnego wykorzystał rozmaite metody badawcze, tj. analizy granulometryczne, chemiczne, derywatograficzne, termiczno-różnicowe i rentgenowskie. Informacje o składzie mineralnym ilów warwowych z Wierzbicy w swojej pracy doktorskiej zamieściła Ptaszkiwicz (2007). Jej celem była ocena zmienności litologicznej ilów

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



Ryc. 1. Lokalizacja geomorfologiczna na podstawie objaśnień do SMGP, arkusz Serock (Nowak, 1969)
Fig. 1. Geomorphological situation based on SMGP explanations (Serock map sheet) (Nowak, 1969)



Ryc. 2. Lokalizacja badań terenowych wykonanych na poligonie badawczym w Wierzbicy
Fig. 2. Location of field tests carried out at the Wierzbica experimental site

warwowych zastoiska warszawskiego wobec możliwości zastosowania ich jako naturalnych barier geologicznych.

Ostatnim opracowaniem, które zawiera wyniki oznaczeń mineralogicznych ilów z Wierzbicy, jest praca ma-

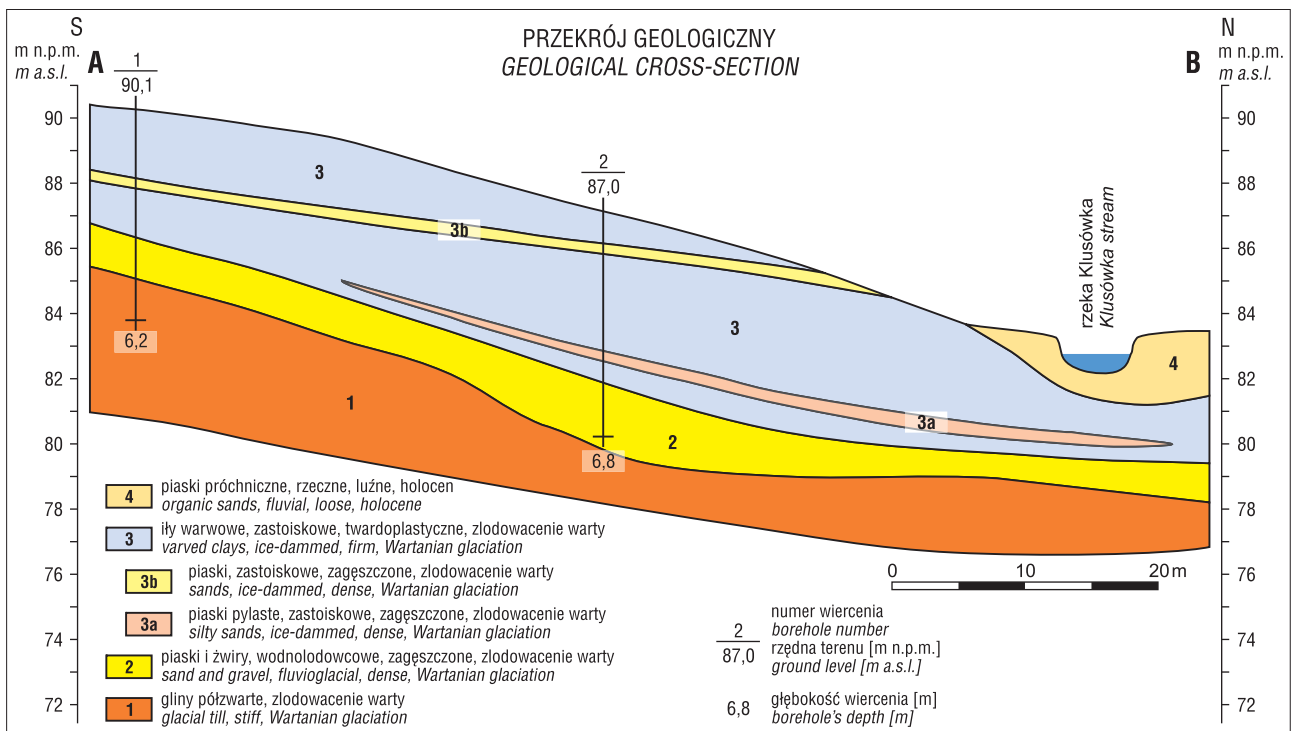
gisterska Gruczka (2014). W jej ramach autor dokonał charakterystyki geologiczno-inżynierskiej tych gruntów. Identyfikację poszczególnych składników mineralnych przeprowadził dla wydzielonych warstwek jasnych oraz ciemnych, a także dla próbek uśrednionych. Oznaczenie składu mineralnego wykonał metodą derywatograficzną w pracowni Instytutu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Zestawienie wyników z ww. opracowań zawiera rycina 4.

Analizując wspomnianą rycinę, widać, że w składzie mineralnym ilów warwowych z Wierzbicy przeważają minerały ilaste 42,1–67%, następnie kwarc 20,8–35,7% i węglany 4–26,9%. Wśród tych pierwszych przeważa illit. Według Bojakowskiego (1982) dominują łyszczycy i chloryty, którym towarzyszy kaolinit. Podrzędnie występują minerały takie jak beidellit, kaolinit, goethyt oraz substancja organiczna. Głównym składnikiem frakcji ilowej jest illit od 82,18 do 90,0%. Pozostałe minerały ilaste stanowią kilkanaście procent (10–18%).

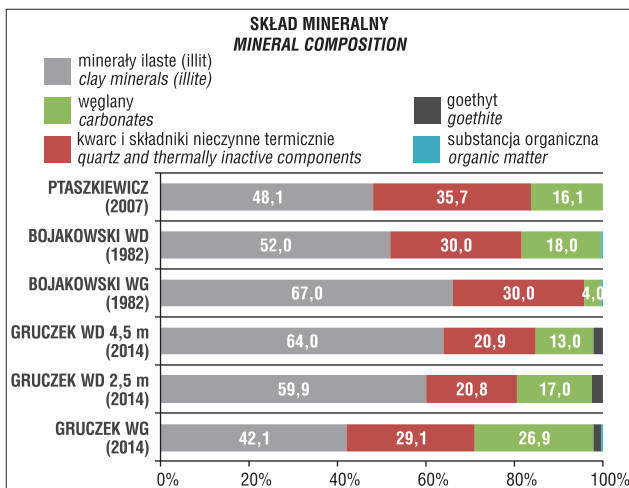
Bojakowski (1982) podsumowując swoje badania składu mineralnego, podkreślał, że we wszystkich próbkach zidentyfikowano na ogół te same minerały. Różnice polegają na zmianie stosunków ilościowych pomiędzy nimi. Zwrócił uwagę na stały skład mineralny na obszarze badań. Różnice składu mineralnego osadów wynikają ze zróżnicowania ich uziarnienia. Zmiany składu mineralnego związane są ze strefą sedymentacji. Blżej źródeł rzeki zasilającej zbiornik zastoiskowy więcej jest smektytów (szybciej są strącane w pobliżu ujścia rzeki).

UZIARNIENIE I PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE

Skład granulometryczny oraz parametry fizyczne zostały przedstawione na podstawie danych zaczerpniętych z literatury. Źródłem tych informacji są prace dyplomowe Ptaszkiewicz (2007) i Gruczka (2014). Stanowią je dane z próbek brzdowych określone dla charakterystycznych



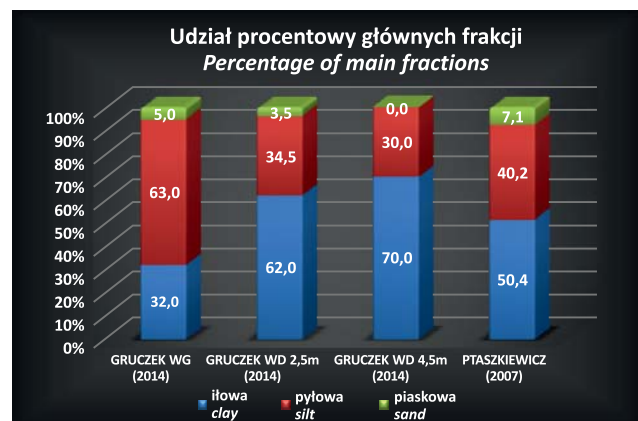
Ryc. 3. Przekrój geologiczny przez omawiany poligon badawczy
Fig. 3. Geologic cross section through the experimental site



Ryc. 4. Wyniki badań składu mineralnego wg różnych autorów (WD – kompleks dolny, WG – kompleks górny)
Fig. 4. Results of mineral composition studies by different researchers (WD – lower complex, WG – upper complex)

stref profilu serii zastoiskowej (WG – kompleks górny; WD 2,5m – kompleks dolny, próbka z głębokości 2,5 m; WD 4,5m – kompleks dolny, próbka z głębokości 4,5 m). Zestawienie wyników badań uziarnienia przedstawiono na rycinie 5, natomiast zestawienie parametrów fizycznych zawiera tabela 1.

Analizując wyniki z pracy Gruczka, daje się zauważyć trend zwiększania zawartości frakcji iłowej wraz z głębokością. Zgodnie z tą tendencją zmieniają się też parametry porowatości, granice konsystencji oraz wilgotność naturalna. Wyniki przywołane z pracy Ptaszkiewicz (2007) są średnią arytmetyczną z siedmiu oznaczeń, dlatego lokują się w centralnych partiach przedziału zmienności poszczególnych cech fizycznych.



Ryc. 5. Skład granulometryczny iłów warwowych z Wierzbicy wg różnych autorów (WD – kompleks dolny, WG – kompleks górny)
Fig. 5. Grain-size distribution of varved clays from Wierzbica by different researchers (WD – lower complex, WG – upper complex)

ZASTOSOWANA APARATURA BADAWCZA

Wraz z rozwojem zaawansowanych geologiczno-inżynierskich badań terenowych (sondowań) stają się one podstawowym i często najbardziej obiektywnym sposobem rozpoznania właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów. Dzięki standaryzacji metodyki badawczej, stosunkowo prostej procedurze, wykonywaniu w warunkach *in situ*, stały się one kanwą badań geologiczno-inżynierskich podczas realizacji wielu typów inwestycji budowlanych. Wśród szerokiego spektrum narzędzi służących ocenie właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów w warunkach terenowych kilka znalazło szczególne uznanie wśród badaczy i trafiło do praktyki inżynierskiej. Sprawdzone możliwości zastosowania i łatwość wykonywania testów,

Tab. 1. Podstawowe parametry fizyczne ilów warwowych z Wierzbicy
Table 1. Basic physical parameters of varved clays from Wierzbica

Źródło Source		Gęstość objętościowa gruntu Bulk density ρ [g/cm ³]	Gęstość właściwa szkieletu grunto- wego Density of solid particles ρ_s [g/cm ³]	Gęstość objętościowa szkieletu grunto- wego Density of dry soil ρ_d [g/cm ³]	Porowatość Porosity n [-]	Wskaźnik porowatości Void ratio e [-]	Wilgotność naturalna Soil moisture w_n [%]	Wilgotność granicy skurczalności Shrinkage limit w_s [%]	Wilgotność granicy plastyczności Plastic limit w_p [%]	Wilgotność granicy płynności Liquid limit w_l [%]	Stopień plastyczności Liquidity index I_L [-]
Gruczek, 2014	WG	2,03	2,75	1,62	0,41	0,70	25,2	14,9	20,2	41,4	0,24
	WD 2,5 m	1,93	2,73	1,50	0,45	0,82	28,3	15,9	25,1	62,0	0,09
	WD 4,5 m	1,85	2,75	1,35	0,51	1,04	36,8	16,4	26,9	68,8	0,24
Ptaszkiewicz, 2007		1,82	2,79	1,49	0,47	0,88	22,2	17,3	23,4	46,1	-0,05

spowodowały, że zostały one umieszczone w wielu światowych normach, takich jak: EN, ASTM, DIN, AFNOR.

Wśród najpowszechniej stosowanych metod badania właściwości gruntów w warunkach *in situ* należy wymienić sondowanie statyczne (CPT). Przez ostatnie kilkanaście lat nastąpił intensywny rozwój tej techniki badawczej, co spowodowało, że obecnie jest dostępnych wiele końcówek pomiarowych, tj. z możliwością pomiaru nadwyżki ciśnienia porowego (CPTU), wielopunktowego pomiaru nadwyżki ciśnienia porowego (CPTUU), pomiaru przewodności podłoża (CCPTU), rejestracji fali sejsmicznej w metodzie *downhole* (SCPTU) (Młynarek i in., 2003; Młynarek & Wierzbicki, 2005).

W ramach przedmiotowych badań wykorzystano stożek mechaniczny CPT (Begemanna) oraz piezostóżek elektryczny CPTU. Do pograżania sond badawczych zastosowano holenderskie urządzenie hydrauliczne firmy GMF Gouda o nacisku maksymalnym 200 kN.

Badanie gruntów sondą statyczną CPT(U) umożliwiło określenie m.in.: parametrów stanu (I_D , I_L), wytrzymałości na ścinanie (c_u), nadwyżki ciśnienia wody w porach (u_2), szacowanie parametrów odkształcalności (M , E) oraz prekonsolidacji (OCR/YSR , σ'_p/σ'_y). Wartości pierwotne rejestrowane bezpośrednio w trakcie badania, tj. opór na stożku (q_c , q_t) i tarcie na tulei (f_s), są podstawowymi zmiennymi służącymi do interpretacji innych parametrów mechanicznych. Wspomniane parametry charakteryzują badany profil gruntowy niemal w sposób ciągły. Dzięki temu jest możliwa przestrzenna i statystyczna ocena zmienności analizowanych cech mechanicznych. Bardzo istotny jest w tym miejscu stały sposób oceny całego profilu, który pozwala na uchwycenie względnych różnic między punktami pomiarowymi w profilu. Dzięki takiej prostej i szybkiej procedurze zmniejszamy zakres zmienności parametrów i tym samym błędów, które towarzyszą np. punktowemu pobieraniu próbek i badaniom laboratoryjnym.

Dylatometr Marchettiego (DMT) umożliwia ocenę wielu cech, jest jednak szczególnie przydatny ze względu na wiarygodną ocenę modułu ściśliwości M oraz wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu c_u w ośrodku gruntowym. Jest to zaawansowane urządzenie, które znajduje zastosowanie do badań zarówno gruntów spoistych, jak i niespoistych. Pozwala także na określanie parametrów prekonsolidacji oraz prognozowanie rodzaju gruntu w profilu geologicznym. Znajduje szczególne miejsce pod-

czas prac naukowo-badawczych, ze względu na dużą dokładność, łatwość obsługi i możliwości uzyskiwania dodatkowych parametrów gruntu, np. współczynnika konsolidacji c_h .

Presjometr Menarda stanowi najbardziej wymagające urządzenie badawcze spośród wymienionych. Jak podkreślają badacze, kluczową rolę odgrywa przygotowanie odpowiedniej jakości otworu badawczego. Narzędzie to pozwala na uzyskanie charakterystyki odkształcalności w szerokim zakresie obciążeń. Z badania otrzymujemy tzw. krzywą presjometryczną, na podstawie której możemy określić całkowite naprężenie poziome, naprężenie pełzania, naprężenie graniczne oraz moduł presjometryczny. Jest to urządzenie o dużym potencjale badawczym, które przy odpowiednich trybach pracy umożliwia określenie wielu cech fizyczno-mechanicznych gruntów. Procedura badawcza polega na stopniowym obciążaniu gruntu do momentu zniszczenia jego struktury. Najnowsze wersje tego urządzenia są wyposażone w komputerowy moduł akwizycji danych, który umożliwia jednocześnie bardzo precyzyjny odczyt zadawanego ciśnienia oraz zmian objętości cieczy roboczej.

Na podstawie zarejestrowanych w terenie parametrów obliczono następujące wielkości:

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a) \text{ [MPa]}$$

gdzie:

q_c – pomierzony opór wciskania stożka,

u_2 – pomierzona nadwyżka ciśnienia porowego podczas sondowania,

q_t – skorygowany opór wciskania stożka o wpływ ciśnienia porowego,

a – współczynnik powierzchni stożka (tutaj $a = 0,58$);

$R_f = f_s/q_c \cdot 100\%$ w przypadku wykorzystania mechanicznego

$R_f = f_s/q_t \cdot 100\%$ w przypadku wykorzystania stożka CPTU

Parametry uzyskane w trakcie sondowań dylatometrycznych zostały przeliczone zgodnie z formułami programu Marchettiego DMT Elab v.4.9.0 (Marchetti, 1980, 1999).

Moduły E szacowano dla ilów zastoiskowych na podstawie następującej ogólnej formuły:

$$E = 0,6 \cdot M \text{ [MPa]}$$

Opiera się ona na module ścisłości M , który należy wyznaczyć wcześniej. Wartość 0,6 przyjęto zgodnie z zależnością $E/M = \delta$ (dla ilów) oraz dopasowanie do bezpośrednich wartości E_M z badania presjometrycznego. Ponieważ moduł ścisłości M jest funkcją modułu E i współczynnika Poisson'a ν :

$$M = \frac{(1-\nu) \cdot E}{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}$$

gdzie:

dla ilów przyjęto $\nu = 0,35$

Wyznaczając wartość modułu ścisłości M , wykorzystano następujące wzory:

$$M_{CPT} = \alpha_m \cdot q_c \text{ (Sanglerat, 1972)}$$

gdzie:

przyjęto $\alpha_m = 14$

$$M_{CPTU} = \alpha \cdot q_n = \alpha \cdot (q_t - \sigma_{v0}) \text{ (Senneset i in., 1989)}$$

gdzie:

przyjęto $\alpha = 18$

$$M_{DMT} = R_m \cdot E_D \text{ (zgodnie z formułami programu Marchettiego DMT Elab v.4.9.0)}$$

Wartości stopnia plastyczności określono zgodnie z formułą zawartą w Polskiej Normie PN-B-04450:2002 Geotechnika – Badania polowe.

$$I_L = 0,242 - 0,427 \cdot \log_{10}(q_c)$$

Parametry prekonsolidacji szacowano wg następujących zależności:

$$OCR = \sigma'_p / \sigma'_{v0}$$

$$\sigma'_p = 0,33 \cdot (q_c - \sigma_{v0}) \text{ (Mayne & Holz, 1988)}$$

$$\sigma'_{p,CPT} = 0,33 \cdot (q_c - \sigma_{v0}) \text{ [MPa] (Lunne i in., 1997) – dla stożka mechanicznego}$$

$$\sigma'_{p,DMT} = OCR \cdot \sigma'_{v0} \text{ [MPa]}$$

gdzie:

q_c – opór wciskania stożka mechanicznego CPT [MPa],

$\sigma'_{p,CPT}$ – naprężenie prekonsolidacji na podstawie sondowania CPT [MPa],

$\sigma'_{p,DMT}$ – naprężenie prekonsolidacji na podstawie sondowania DMT [MPa],

σ_{v0} – całkowite naprężenie pionowe *in situ* [MPa],

σ'_{v0} – efektywne naprężenie pionowe [MPa],

OCR – współczynnik prekonsolidacji [–];

$$\sigma'_{p,CPTU} = OCR / \sigma'_{v0}$$

$$OCR = k \cdot \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \text{ (Lunne i in., 1997) – dla stożka}$$

CPTU

gdzie:

k waha się od 0,2–0,5, przyjęto $k = 0,5$; dla mocno prekonsolidowanych można przyjmować wyższe wartości.

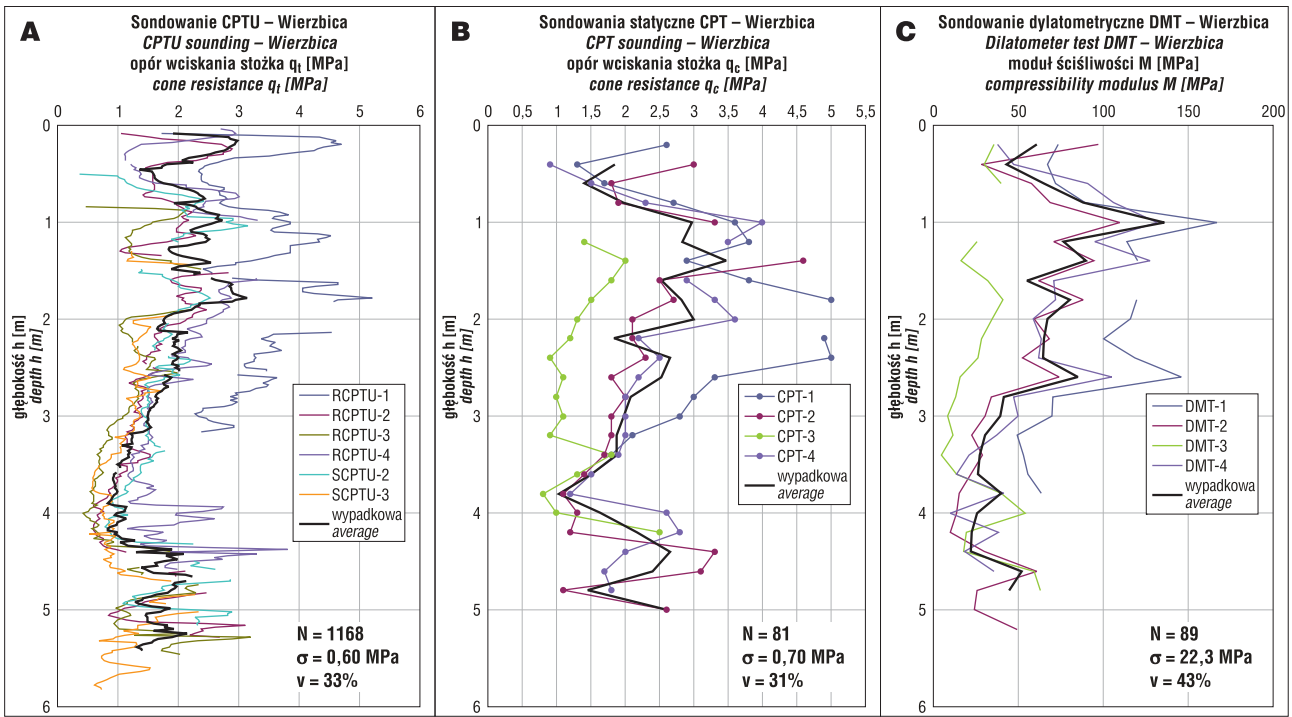
WYNIKI BADAŃ TERENOWYCH I DYSKUSJA

Na poligonie badawczym w Wierzbicy została zrealizowana seria różnych sondowań zgrupowanych w czterech węzłach badawczych. W każdym węźle przeprowadzono przynajmniej jedno sondowanie CPT, jedno – SCPTU oraz jedno – dylatometryczne DMT. W węzłach nr 2 i 3 wykonano dodatkowo sondowanie typu RCPTU, z uwagi na pełniejszy profil osadów zastoiskowych, natomiast w węźle nr 2 również serię badań presjometrycznych PBP. W każdym z węzłów punkty badawcze były oddalone od siebie o ok. 2,5 m. Celem takiej metody było stworzenie możliwości porównania różnych narzędzi badawczych i znalezienie między nimi zależności. Jednocześnie charakteryzowano znaczną przestrzeń geologiczną, co pozwoliło na zobrazowanie zmienności przyrodniczej badanych osadów.

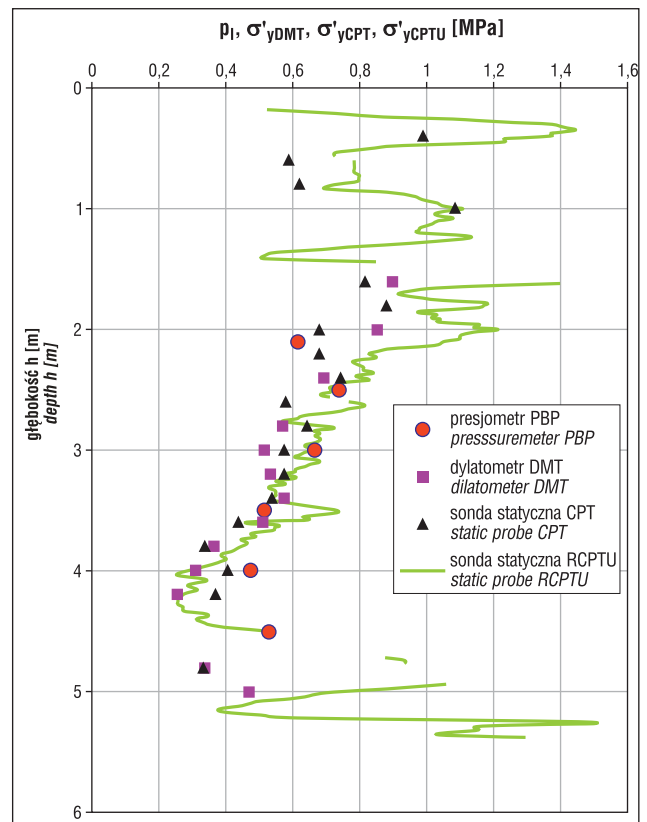
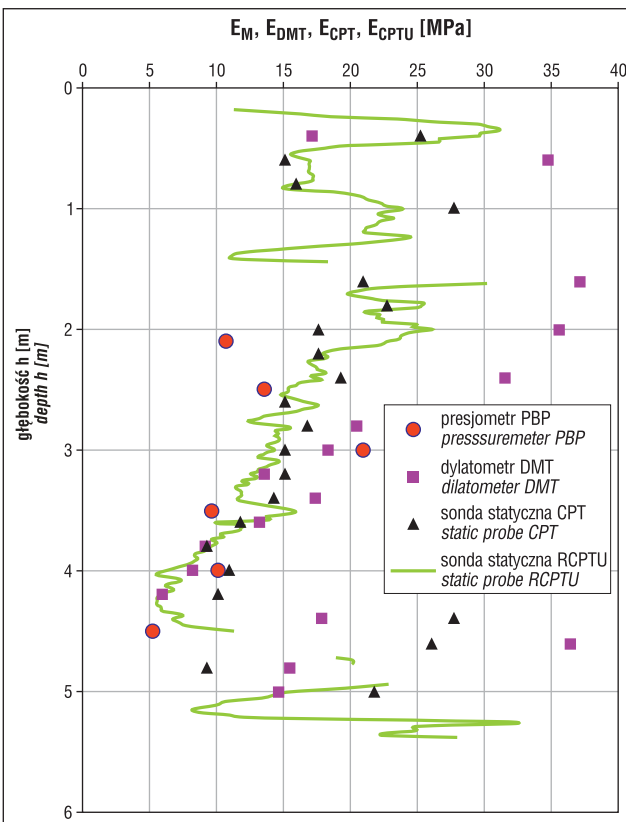
Zmienność zarejestrowanych parametrów sondowania statycznego (q_c , q_t) zaprezentowano w rycinach 6a i b. Sumaryczne zestawienie wartości modułu ścisłości M_{DMT} w profilach pionowych węzłów badawczych przedstawiono na rycinie 6c. W trakcie przygotowania tych wykresów obliczono proste parametry statystyczne, które określają zmienność badanych cech. Zakładając horyzontalne warstwowanie (charakterystyczne dla warunków sedymentacji), dokonano obliczenia wypadkowego wykresu reprezentującego zmienność w pionie danego parametru poligonu badawczego. Przeprowadzono to na drodze kalkulacji średniej arytmetycznej, odchylenia standardowego i współczynnika zmienności z czterech węzłów dla tej samej głębokości badania. W końcowym etapie uśredniono odchylenie standardowe i współczynnik zmienności dla profilu wypadkowego, reprezentującego średnią wartość danej cechy w profilu pionowym.

Można zauważyć, że współczynnik zmienności reprezentujący cechy mechaniczne ilów warwowych z poligonu w Wierzbicy zmienia się od 31% dla q_c przez 33% dla q_t do 43% dla M_{DMT} . Mimo stosunkowo niewielkich odległości między węzłami badawczymi (ok. 20–25 m) zmienność rejestrowanych charakterystyk mechanicznych jest duża. Jest to związane ze zmiennością strukturalną ilów warwowych, która wynika z lokalizacji obszaru ich akumulacji bardzo blisko brzegu zbiornika zastoiskowego, nieopodal źródła dostawy materiału terygenicznego. Determinuje to większą dynamikę warunków sedymentacji i różnorodność litologiczną tych osadów. Wpływ na to mają także zmiany postsedymentacyjne, które na tym poligonie są wyrażone np. odprężeniem masywu gruntowego w efekcie erozji bocznej rzeki Klusówki i uformowaniem skarpy (podcięcia) tarasu tworzonego przez ility warwowe (węzeł 3). Dają się również zauważyć zmiany stanu (w wyniku utraty wilgotności) mniejszych warstw gruntów, które zalegają hipsometrycznie wyżej ponad poziomem lustra wody (rejon węzła 1). Trudno zauważalne, a jednocześnie bardzo istotne w testach *in situ*, są zmiany diagenetyczne. Są one niewątpliwie obecne i odgrywają znaczącą rolę, co sygnalizuje się w wielu publikacjach (Burland i in., 1996; Liu & Carter, 1999; Zawrzykraj, 2007).

Zarejestrowane parametry zmienności pochodzące z różnych niezależnych narzędzi badawczych, choć różnią się nieco od siebie, zdaniem autora są zbieżne. Stanowią obiektywny, liczbowy wskaźnik zmienności sztywności



Ryc. 6. Wyniki badań statycznych i dylatometrycznych w 4 węzłach badawczych; **A** – opór wciskania stożka elektrycznego q_t , **B** – opór wciskania stożka mechanicznego q_c , **C** – dylatometryczny moduł ściśliwości M_{DMT}
Fig. 6. Results of static and dilatometer soundings at the four survey stations; **A** – resistance of piezocone penetration q_t , **B** – resistance of mechanical cone penetration q_c , **C** – dilatometer deformation modulus M_{DMT}



Ryc. 7. Moduł odkształcenia ogólnego E (E_M, E_{DMT}, E_{CPT}) w świetle sondowań w węźle 2
Fig. 7. Compression modulus E (E_M, E_{DMT}, E_{CPT}) in the light of soundings at survey station 2

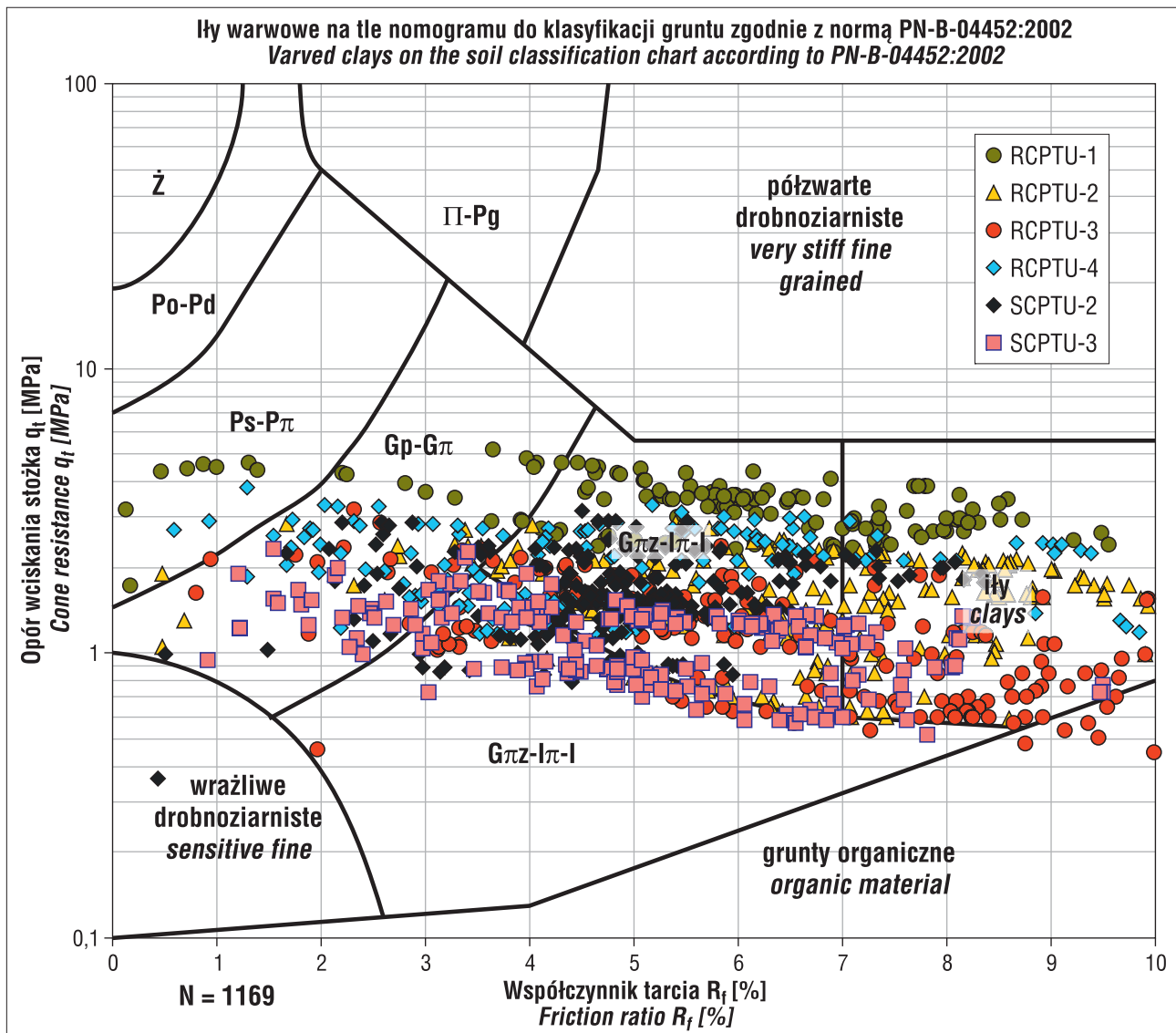
Ryc. 8. Naprężenie uplastycznienia σ'_y (CPT i DMT) i naprężenie graniczne p_l w profilu węzła 2
Fig. 8. Yield pressure σ'_y (CPT i DMT) and limit pressure p_l (PBP) in the profile of survey station 2

tego ośrodka gruntowego. Jak można zauważyć, mamy do czynienia z szeregiem czynników kształtujących aktualnie stwierdzone właściwości mechaniczne. Mimo że przedmiotem oceny jest jedno wydzielenie litologiczno-genezyjne, to stwierdzony przedział zmienności parametrów mechanicznych nawet na taki niewielkim obszarze zmusza do różnicowania tej jednostki na mniejsze. Dopiero wówczas można przystąpić do konstruowania prawdopodobnego modelu budowy geologicznej.

W profilach pionowych tego samego węzła cechy mechaniczne determinowane różnymi narzędziami badawczymi są względem siebie zbieżne (ryc. 7, 8). Jest to także pewnego rodzaju sposób wzajemnej weryfikacji stosowanych metod badawczych. Obraz pionowej zmienności danych z równoległych sondowań potwierdza rejestrowane charakterystyki w profilach cech mechanicznych lub pozwala wychwytywać rozbieżności w działaniu aparatury pomiarowej w przypadku zaistnienia niezgodności. Przykładem takiej kongruencji są rezultaty wyznaczania modułu odkształcenia ogólnego E w węźle 2 (ryc. 7).

Obserwuje się bardzo dobrą zgodność między pomiarami CPT i CPTU, co częściowo wynika z podobnej meto-

dy badawczej. Wartości odkształcalności określone na podstawie badań presjometrycznych PBP i dylatometrycznych DMT również lokują się w podobnych zakresach, choć ich rozpiętość jest zauważalnie większa. Jest to efekt odmiennego sposobu badań, który jest oparty na analizie charakterystyk pomiarowych w różnych fazach odkształceń gruntu. W przypadku presjometru pomiary są dokonywane w szerokim zakresie odkształceń sięgających naprężeniu granicznemu, które oznacza zniszczenie struktury i ścięcie gruntu. Ściany otworu badawczego zostały przygotowane z najwyższą starannością poprzez ręczne wykonanie otworu przeznaczonym do tego świdrem okienkowym. Przyczynił się do tego korzystny stan gruntu oraz odciecie dopływu wody gruntowej. Każdy cykl pomiarowy w tym badaniu w odróżnieniu od pozostałych narzędzi obejmuje dodatkowo fazę odkształceń przed zniszczeniem struktury osadu. Natomiast wprowadzenie w przestrzeń gruntową ostrza łopatki dylatometrycznej lub stożka CPT(U) powoduje zaburzenia jego struktury. Należy zaznaczyć, że badanie dylatometryczne pozwala na rejestrację naprężeń (ciśnien roboczych) oraz towarzyszących im odkształceń wg dwóch punktów pomiarowych, co sta-



Ryc. 9. Wyniki sondowań CPTU na zmodyfikowanym nomogramie Robertsona
 Fig. 9. Results of CPTU soundings on the modified Robertson's chart

nowi niezwykle istotną przewagę nad badaniem sondą statyczną. W jej przypadku odkształcalność wyznacza się na podstawie empirycznych zależności i jest kwestią jakości stosowanej korelacji oraz jej adekwatności do lokalnych warunków geologicznych (cech strukturalnych i litogenetycznych).

Przeprowadzone w ostatnich dekadach badania parametrów prekonsolidacji dowodzą, że często poszukiwane klasyczne wartości są obciążone wpływem innych zjawisk diagenetycznych. Dlatego w niniejszym artykule uzyskiwane na drodze zależności empirycznych naprężenie prekonsolidacji σ'_p interpretowano jako naprężenie uplastycznienia σ'_y , natomiast współczynnik prekonsolidacji OCR – jako współczynnik uplastycznienia YSR . Na rycinie 8 zestawiono wykresy naprężenia uplastycznienia σ'_y otrzymane z testu statycznego CPT i dylatometrycznego DMT w węźle 2. Można zauważyć dobre wzajemne dopasowanie tych wartości. Dodatkowo naniesiono wartości naprężenia granicznego p_t , które uzyskuje się z badania presjometycznego. Celem tej kompilacji była wstępna próba szacowania parametrów prekonsolidacyjnych na podstawie testów presjometycznych. Dotychczas ten parametr nie był interpretowany w oparciu o ten rodzaj badania. Jak widać na rycinie 8 wartości naprężenia granicznego bardzo dobrze harmonizują z naprężeniem uplastycznienia, co pozwala na prognozowanie tej charakterystyki na bazie badań presjometycznych. Jest to wstępny wniosek, który powinien być poparty dalszymi badaniami porównawczymi. W tym zestawieniu intrygujący jest fakt, że należałoby oczekiwać, że naprężenie uplastycznienia σ'_y powinno się korelować z naprężeniem pełzania p_f ze względu na podobny sens fizyczny. W obydwu przypadkach oznacza ono obciążenie, przy którym grunt się uplastycznia (kończy się faza odkształceń pseudosprężystych, a rozpoczyna faza odkształceń plastycznych). Autor jest przekonany, że w trakcie dalszych badań uda się zweryfikować rozpatrywane zależności. Warto tu nadmienić, iż w świetle aktualnych badań (Burland i in., 1996; Zawrzykraj, 2007) naprężenie uplastycznienia σ'_y jest bardziej obiektywnym i właściwym parametrem prekonsolidacyjnym w sensie interpretacji, niż dotychczas identyfikowane naprężenie prekonsolidacji σ'_p . Prawidłową analizę odkształceń utrudniają zmiany strukturalne zachodzące w osadzie od chwili jego powstania, takie jak wietrzenie czy procesy diagenetyczne (Bjerrum & Lo, 1963; Boone & Lutenegeger, 1997; Zawrzykraj, 2004).

Wobec czego do obliczeń naprężenia uplastycznienia wykorzystano następujące formuły:

$$\sigma'_{y,CPT} = 0,33 \cdot (q_c - \sigma_{v0}) \text{ [MPa]}$$

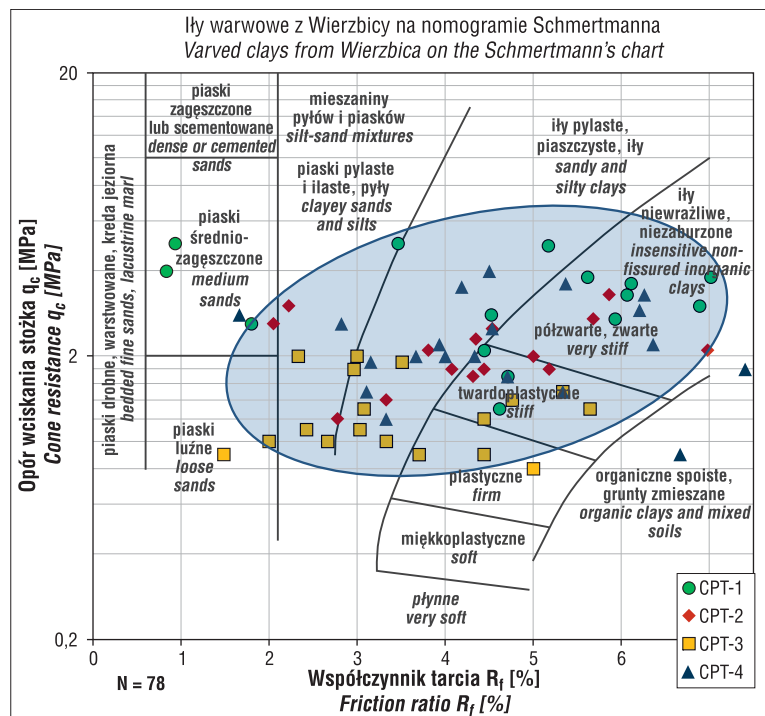
$$\sigma'_{y,DMT} = OCR \cdot \sigma'_{v0} \text{ [MPa]}$$

gdzie:

q_c – opór wciskania stożka mechanicznego CPT [MPa]

$\sigma'_{y,CPT}$ – naprężenie uplastycznienia na podstawie sondowania CPT [MPa]

$\sigma'_{y,DMT}$ – naprężenie uplastycznienia na podstawie sondowania DMT [MPa]



Ryc. 10. Wyniki sondowań CPT na nomogramie Schmertmanna. Obszar otoczony elipsą wskazuje 90% danych

Fig. 10. Results of CPT soundings on the Schmertmann's chart. Ellipse area covers 90% of data

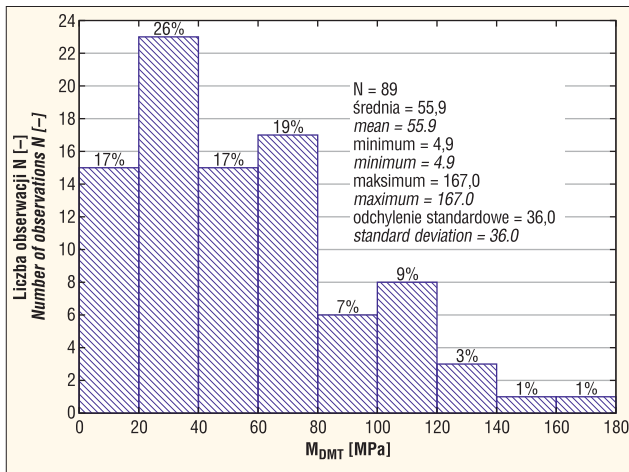
σ'_{v0} – całkowite naprężenie pionowe nadkładu [MPa]

σ_{v0} – całkowite naprężenie pionowe nadkładu [MPa]

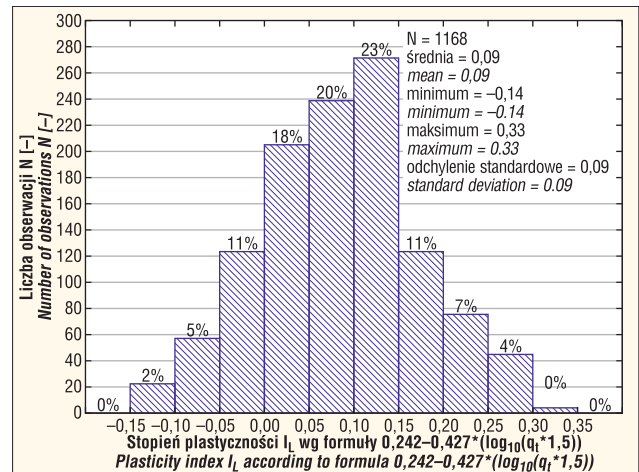
OCR – współczynnik prekonsolidacji [–].

Ponieważ wyniki sondowań statycznych CPT(U) są często wykorzystywane do prognozowania rodzaju gruntów objętych sondowaniem (norma PN-B-04452), naniesiono je na powszechnie stosowane nomogramy (ryc. 9, 10).

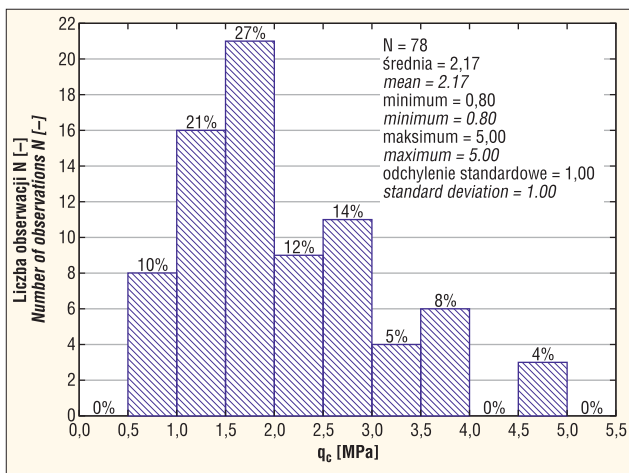
Widocznym efektem jest duży rozrzut prognozowanych rodzajów gruntów, który nie znajduje pokrycia w bezpośrednich obserwacjach z wierceń lub analiz granulometrycznych. Interpretowana zmienność litologiczna wg zmodyfikowanego nomogramu Robertsona lokuje otrzymane punkty głównie w polu glin pylastych zwięzłych – iłów pylastych – iłów oraz w mniejszym udziale w polu samych iłów, a także glin piaszczystych – glin pylastych. Po naniesieniu wyników badań na nomogramach klasyfikacyjnych badane iły w większości nie lokują się w oczekiwanych standaryzowanych polach. Próba oceny jakościowej badanych osadów na podstawie mechanicznych charakterystyk sondowań jest zatem niezadowolająca. Przedstawione dotychczas klasyfikacje gruntów naturalnych tą metodą nie uwzględniają w dostatecznym stopniu oddziaływań i wiązań mikrostrukturalnych obecnych w osadach. Nie po raz pierwszy daje się zauważyć, że nie są doskonałe, a właściwie mogą wskazywać tylko typ zachowania się gruntu determinowany przez jego własności mechaniczne (*Soil Behaviour Type*). Klasyfikacje nie uwzględniają czynników diagenetycznych, zdolnych do przeobrażenia (uszluszenia lub osłabienia) przestrzeni gruntowej i modyfikacji rejestrowanego efektu mechanicznego, na podstawie których powstają nomogramy.



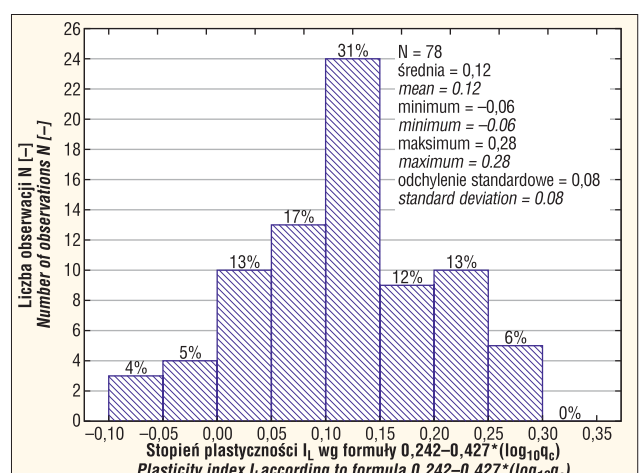
Ryc. 11. Histogram i udział procentowy modułu ściśliwości M_{DMT} w przedziałach szeregu rozdzielczego
 Fig. 11. Histogram and percentage of constrained deformation modulus in the intervals of frequency distribution



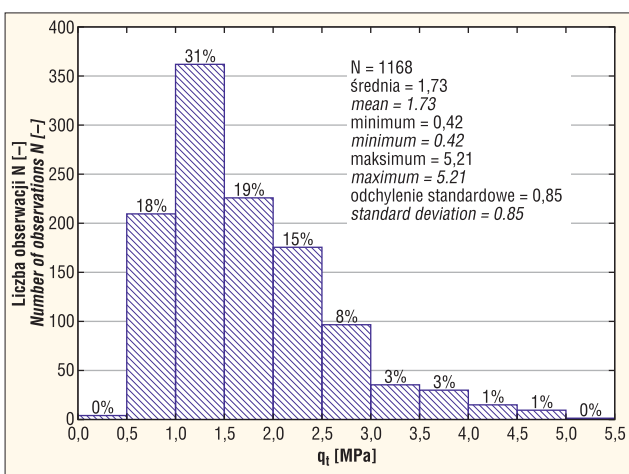
Ryc. 14. Histogram i rozkład prawdopodobieństwa stopnia plastyczności I_L na podstawie sondowania CPTU w przedziałach szeregu rozdzielczego
 Fig. 14. Histogram and probability distribution of plasticity index I_L on the basis CPTU tests in the intervals of frequency distribution



Ryc. 12. Histogram i udział procentowy oporu wciskania stożka q_c w przedziałach szeregu rozdzielczego
 Fig. 12. Histogram and percentage of cone resistance q_c in the intervals of frequency distribution



Ryc. 15. Histogram i udział procentowy stopnia plastyczności I_L na podstawie sondowania CPT w przedziałach szeregu rozdzielczego
 Fig. 15. Histogram and percentage of plasticity index I_L on the basis CPT tests in the intervals of frequency distribution



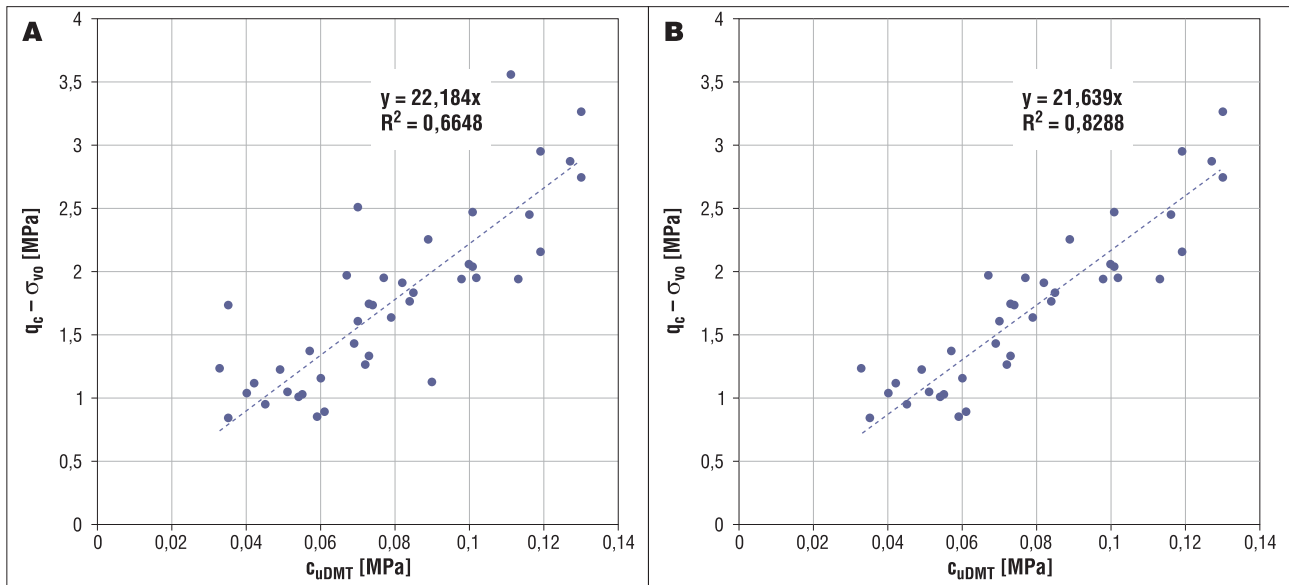
Ryc. 13. Histogram i rozkład prawdopodobieństwa oporu wciskania stożka elektrycznego q_t w przedziałach szeregu rozdzielczego
 Fig. 13. Histogram and probability distribution of electric cone resistance q_t in the intervals of frequency distribution

Zestawiając razem zgromadzone i pogrupowane parametry z wszystkich węzłów badawczych, przygotowano histogramy, na których przedstawiono rozkład częstości i prawdopodobieństwo otrzymania danych parametrów (ryc. 11, 12, 13, 14, 15). Charakterystyki statystyczne prezentujące rozkład wartości zarejestrowanych zmiennych są obrazowym i ilościowym sposobem prezentacji danych. Wraz ze wzrostem ich ilości optymalizuje się (wygładza) kształt histogramu. Opracowane zestawienia prezentują wyraźnie prawoskośne rozkłady rejestrowanych parametrów. Natomiast histogram prezentujący zakres stopnia plastyczności I_L jest rozkładem zbliżonym do symetrycznego. Jest to również efekt przekształcenia danych na drodze logarymowania, ponieważ stopień plastyczności został obliczony wg formuły (norma PN-B-04452):

$$I_L = 0,242 - 0,427 \cdot \log_{10}(q_t \cdot \beta)$$

gdzie:

q_t – opór wciskania stożka końcówki elektrycznej (piezostopka) [MPa],



Ryc. 16. Wyniki badań korelacji między wytrzymałością na ścinanie z sondowania dylatometrycznego a wytrzymałością na ścinanie z badania statycznego; **A** – wszystkie dane, **B** – zbiór danych po odrzuceniu czterech wartości odstających

Ryc. 16. Results of correlation between shear strength from dilatometer test and shear strength from static sounding; **A** – all data, **B** – set of data after rejection of four outlier values

β – współczynnik dopasowania między końcówką mechaniczną q_c a elektryczną q_t sondy CPT, $q_c = q_t \cdot \beta$, przyjęto $\beta = 1,5$.

Autor jest świadomy, że wykonane badania cech mechanicznych nie zostały wyraźnie odniesione do wrodzonej anizotropii iłów warwowych, czy też rozdzielone ze względu na orientację prowadzonych testów. Ten wątek jest istotny, lecz będzie kanwą odrębnego artykułu oraz innego wachlarza badań, które służą ocenie roli tekstury warwowej w badaniach właściwości mechanicznych gruntów. Prezentowane wyniki należy odnosić w zasadzie do całego kompleksu zastoiskowego, ponieważ stanowią jego statystyczną reprezentacyjną próbę.

Jest to ośrodek niejednorodny i trudny, więc zaobserwowany rozstęp oraz rozrzut danych są częściowo uzasadnione.

Dodatkowo analizując otrzymane wyniki, porównano ze sobą wytrzymałość na ścinanie z badania dylatometrycznego c_{uDMT} i sondą statyczną c_{uCPT} . Ponieważ wartość c_{uDMT} jest otrzymywana w standardowym programie obliczeniowym i formuła nie jest modyfikowana, to ją potraktowano jako wartość reperową. Zgodnie ze wzorem (Aas i in., 1986):

$$c_{uCPT} = (q_c - \sigma_{vo}) / N_{KT} \quad [\text{MPa}]$$

gdzie:

q_c – opór wciskania stożka mechanicznego CPT [MPa],
 σ_{vo} – naprężenie nadkładu na głębokości badania [MPa],
 N_{KT} – współczynnik empiryczny zależny od rodzaju gruntu [–].

Zmienną, która podlega modyfikacji w powyższym wzorze, jest współczynnik empiryczny N_{KT} . Dlatego ułożono równanie, gdzie N_{KT} było szukaną niewiadomą. Ponieważ poszukiwano wartości N_{KT} , przy której:

$$(q_c - \sigma_{vo}) / N_{KT} = c_{uDMT} \quad (1)$$

przekształcono (pomnożono obustronnie przez N_{KT}) ten wzór, otrzymując go w postaci:

$$(q_c - \sigma_{vo}) = c_{uDMT} \cdot N_{KT}$$

Poszukując korelacji, N_{KT} potraktowano jako wyraz służący dopasowaniu wytrzymałości c_{uCPT} oraz c_{uDMT} . Zestawienie punktów, które jest podstawą poszukiwanej korelacji, objęło analizowane cechy iłów warwowych na odpowiadających sobie głębokościach we wszystkich węzłach badawczych. Linia trendu, która jest wypadkową dopasowania porównywanych danych, w pierwszym etapie poszukiwania zależności charakteryzowała się współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,66$. Ponieważ zbiór danych cechował się obecnością czterech punktów wyraźnie różniących od pozostałych elementów (patrz ryc. 16), wartości te zostały odrzucone. Po tym uproszczeniu eksperymentalna zależność między wytrzymałością na ścinanie z badania DMT a skorygowanym o wpływ nadkładu oporem wciskania sondy CPT dała współczynnik dopasowania $R^2 = 0,82$. Mając na uwadze wyraźne zróżnicowanie badanego środowiska geologiczno-inżynierskiego, jest to dobry wynik. Dla celów praktycznych wartość współczynnika empirycznego można zaokrąglić do liczby całkowitej i przyjmując $N_{KT} = 22$.

Zatem prognozując wytrzymałość na ścinanie c_{uDMT} na podstawie sondowania statycznego CPT, możemy skorzystać z wzoru (1), przyjmując $N_{KT} = 22$.

Przeprowadzone sondowania tego samego typu zostały ze sobą zestawione na zbiorczych wykresach, żeby przedstawić zróżnicowanie rejestrowanych cech w profilach pionowych. Diagramy te prezentują jednocześnie wzajemne porównanie sondowań z całego poligonu. Zebrane ze wszystkich węzłów badawczych parametry pomiarowe zostały poddane prostej kalkulacji statystycznej. W efekcie opracowano i przedstawiono histogramy rozkładu analizowanych cech oraz prawdopodobieństwo ich wystąpienia, które jest bezpośrednio powiązane z zarejestrowaną frek-

wencją obserwacji. Na ich podstawie można dokładniej szacować i ustalać tzw. wartości wyprowadzone parametrów geotechnicznych oraz dobierać wielkości częściowych współczynników bezpieczeństwa służących obliczeniowej redukcji stałych materiałowych podczas projektowania konstrukcji.

Dzięki porównaniu parametrów prekonsolidacyjnych uzyskanych z sondowań statycznych i dylatometrycznych oraz badań presjometycznych został nakreślony kształt korelacji, pozwalającej na szacowanie naprężenia uplastycznienia σ_p na podstawie naprężenia granicznego p_l . Takie wnioski mają charakter wstępny z uwagi na niewielką liczbę danych pomiarowych. Niemniej jednak zaobserwowano jaskrawą zgodność parametrów zestawionych na rycinie 8.

Badania gruntów w warunkach ich naturalnego występowania umożliwiają:

- charakterystykę znacznej części przestrzeni gruntowej w postaci niemal ciągłych profili sondowań oraz obserwacji względnego zróżnicowania różnych jego partii;
- bezpośrednie badania cech mechanicznych iłów warwowych w warunkach *in situ*;
- otrzymanie obiektywnych wyników, ponieważ odnoszą się do dużej skali i w warunkach naturalnego występowania gruntów;
- analizę reakcji mechanicznego oddziaływania sond badawczych na otaczający grunt, jest to adekwatne do mechanicznej interakcji budowli i podłoża gruntowego;
- zbadanie cechy gruntów w rodzimym stanie naprężeń, bez zbędnego naruszenia struktury, w miejscu gdzie będzie on stanowił potencjalne podłoże budowlane;
- bardzo szybkie i jednocześnie ekonomiczne otrzymanie danych o potencjalnym podłożu budowlanym;
- pozyskiwanie bardzo dużej ilości danych w bardzo krótkim czasie (w trybie CPTU – 50 danych na 1 mb sondowania w ciągu 1 minuty), co dało możliwość obróbki i charakterystyki statystycznej wyników sondowań. Znaczna ilość informacji pozwoliła na wykonanie obliczeń statystyczne, które służą poszukiwaniu nowych korelacji;
- dokonanie stosunkowo pełnej przestrzennej charakterystyki zróżnicowania cech mechanicznych ośrodka gruntowego.

Dzięki przeprowadzonym obserwacjom powiązано otrzymane parametry fizyczno-mechaniczne z genezą, strukturą, historią geologiczną i aktualnym stanem badanych osadów. Z praktycznego punktu widzenia wyniki prac badawczych pozwoliły na uściślenie poprawności i bardziej realną ocenę warunków geologiczno-inżynierskich, od których zależą koszty różnorodnych inwestycji budowlanych oraz minimalizacja interwencji w środowisko przyrodnicze (Kaczyński, 2011).

PODSUMOWANIE

W efekcie wykonanych sondowań *in situ* zgrupowanych w czterech węzłach badawczych wyznaczono i przeanalizowano charakterystyki mechaniczne iłów warwowych z poligonu badawczego w Wierzbicy. Wielowątkowej ewaluacji poddano jedno wydzielenie litogenetyczne rozpoznane na obszarze kilkuset metrów kwadratowych. Znaczne zróżnicowanie wartości poszczególnych para-

metrów, wyrażone wysokimi wartościami średnich współczynników zmienności v , tj. 31–43%, zostało udokumentowane. Zmienność własności mechanicznych przedstawiają histogramy oraz zbiorcze wykresy reprezentujące parametry iłów zastoiskowych, m.in. moduł odkształcenia ogólnego E , naprężenie uplastycznienia σ'_p , dylatometryczny moduł ścisłości M_{DMT} . W wyniku analizy porównawczej danych wyznaczono wartości współczynnika α , który pozwala na prognozowanie modułu dylatometrycznego M_{DMT} na podstawie oporu wciskania stożka q_c/q_s podczas sondowań statycznych CPT/CPTU.

Analizując wybrane nomogramy klasyfikacyjne, które służą prognozowaniu rodzaju gruntu w oparciu o wyniki sondowań statycznych CPT(U), stwierdzono, że zarejestrowane punkty nie lokują się w oczekiwanych strefach. Stwierdzono znaczny rozrzut danych pomiarowych oraz ich dyspersję na rozmaitych polach klasyfikacyjnych, co zdaniem autora nie pozwala na stosowanie tych nomogramów do prawdopodobnej prognozy rodzaju gruntu. Wskazuje to na wyraźną złożoność struktury badanych osadów, której zachowanie mechaniczne podczas sondowania CPT(U) nie pozwala na bezpośrednią identyfikację litologiczną badanych osadów.

W efekcie wzajemnego porównania wytrzymałości na ścinanie uzyskiwanej z sondowania dylatometrycznego c_{uDMT} z wytrzymałością na ścinanie, którą określono podczas sondowania statycznego c_{uCPT} , otrzymano zależność o współczynniku dopasowania $R^2 = 0,82$. Mając świadomość zmienności cech mechanicznych i strukturalnych iłów zastoiskowych w obrębie poligonu w Wierzbicy, należy traktować tę korelację jako dobre dopasowanie. Przyjmując współczynnik $N_{KT} = 22$, możemy prognozować wytrzymałość na ścinanie c_{uDMT} w iłach warwowych tego rejonu na podstawie sondowania statycznego CPT.

Autor składa podziękowania Recenzentom za cenne uwagi i komentarze, które przyczyniły się do udoskonalenia niniejszej publikacji, oraz Pani Iwone Pac za zgodę na wykonanie prac badawczych na terenie prywatnych działek.

LITERATURA

- AAS G., LACASSE S., LUNNE T. & HOEG K. 1986 – Use of in situ tests for foundation design on clay. Proceedings of the ASCE Speciality Conference In Situ '86. Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blacksburg. Am. Soc. Engineers (ASCE): 1–30.
- BJERRUM L. & LO K. Y. 1963 – Effect of aging on the shear-strength properties of a normally consolidated clay. Géotechnique, 13 (2): 147–157.
- BOJAKOWSKI T. 1982 – Charakterystyka geologiczno-surowcowa osadów zastoiska warszawskiego oraz ocena ich przydatności dla ceramiki budowlanej. Biul. Inst. Geol., 336 (4): 131–188.
- BOONE J., LUTENEGGER J. 1997. Carbonates and cementation of glacially derived cohesive soils in New York State and southern Ontario. Canadian Geotech. J., 34: 534–550.
- BURLAND J.B., RAMPANELLO S., GEORGIANNOU V.N. & CALABRESHI G. 1996 – A laboratory study of the strength of four stiff clays. Géotechnique, 46 (3): 491–514.
- GRUCZEK M. 2014 – Charakterystyka parametrów fizyczno-mechanicznych iłów zastoiskowych z okolic Wierzbicy k. Serocka. Praca magisterska. Arch. Wydz. Geol. UW, Warszawa
- KACZYŃSKI R.R. 2011 – Akademska geologia inżynierska w Polsce, Biul. Państw. Instyt. Geol., 446 (1): 75–84.
- KACZYŃSKI R.R. i in. 2008 – Stan skonsolidowania i mikrostruktury glin złodowacenia środkowopolskiego rejonu Warszawa-Służew na tle ich geologiczno-inżynierskich właściwości. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN Nr 4 T12B 062 28, Arch. Wydz. Geol. UW, Warszawa.
- LIU M. D. & CARTER J. P. 1999 – Virgin compression of structured soils. Géotechnique, 49 (1): 43–57.

- LUNNE T., ROBERTSON P.K. & POWELL J.J.M. 1997 – Cone Penetration Testing in geotechnical practice. E&FN SPON. London.
- MARCHETTI S. 1999 – The Flat Dilatometer and its applications to Geotechnical Design, International Seminar on DMT held at the Japanese Geot. Society, Tokyo, 12 Feb 1999, s. 90.
- MARCHETTI S. 1980 – In Situ Tests by Flat Dilatometer. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT3, Proc. Paper 15290, 299–321.
- MAYNE P.W. & HOLTZ R.D. 1988 – Profiling stress history from piezocone soundings. Soils and Foundations, 28 (1): 16–28.
- MŁYNAREK Z., TSCHUSCHKE W. & WIERZBICKI J. 2003 – Wykorzystanie metody sondowania statycznego i badania dylatometrycznego do oceny parametrów geotechnicznych odpadów kopalnianych, Nowoczesne metody badań gruntów, Seminarium ITB, 23–35.
- MŁYNAREK Z. & WIERZBICKI J. 2005 – Nowoczesne metody rozpoznawania podłoża dla potrzeb budowy mostów i tuneli, Geoinżynieria i Tunelowanie, 2 (5): 46–55.
- NOWAK J. 1969 – Objaśnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1 : 50 000 – arkusz Serock N34-127A. Instytut Geologiczny. PN-B-04450:2002 – Geotechnika – Badania polowe
- PTASZKIEWICZ M. 2008 – Wpływ zróżnicowania litologicznego ilów warwowych na możliwość ich zastosowania jako barier geologicznych, izolacyjnych. Praca doktorska, Arch. Wydz. Geol. UW, Warszawa
- SANGLERAT G. 1972 – The penetrometer and soil exploration. Elsevier. Amsterdam-Oxford-New York.
- SENNESET K., SANDVEN R. & JANBU N. 1989 – The evaluation of soil parameters from piezocone tests. Transport. Res. Record., 1235: 24–37.
- ZAWRZYKRAJ P. 2004 – Analiza stanu skonsolidowania ilów warwowych w rejonie Sochaczewa i Radzimina. Praca doktorska, Arch. Wydz. Geol. UW, Warszawa.
- ZAWRZYKRAJ P. 2007 – Ocena efektów prekonsolidacyjnych na podstawie charakterystyki ścisłości ilów zastoiszkowych okolic Warszawy. Geologos, 11: 499–508.

Praca wpłynęła do redakcji 14.07.2012 r.

Akceptowano do druku 19.08.2016 r.