

## CHARAKTERYSTYKA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH IŁÓW ZASTOISKOWYCH Z OKOLIC RADZYMINA NA PODSTAWIE BADAŃ PRESJOMETRYCZNYCH

### CHARACTERISTIC OF MECHANICAL PROPERTIES OF ICE-DAMMED CLAYS FROM RADZYMIN AREA BASED ON PRESSUREMETER TESTS

PIOTR ZAWRZYKRAJ<sup>1</sup>, KAMIL KIELBASIŃSKI<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Omówiono wyniki badań geologiczno-inżynierskich iłów zastoiskowych z rejonu Radzymina. Parametry mechaniczne otrzymano w toku badań wykonanych w warunkach *in situ* przy użyciu presjometru Menarda. Do testów zastosowano najnowszy model firmy *Apageo* wyposażony w elektroniczny system rejestracji GeoSPAD. Otrzymane dane zestawiono i porównano z wynikami z sondy statycznej CPT oraz dylatometru Marchettiego DTM. Przy zastosowaniu wspomnianej aparatury dokonano oceny modułu ściśliwości, naprężenia pełzania, naprężenia granicznego, współczynnika parcia gruntu w spoczynku i in. Zwrócono uwagę na rozbieżności w uzyskanych wartościach w zależności od metodyki badań. W artykule przedstawiono także sytuację geologiczną iłów zastoiskowych występujących w badanym rejonie.

**Słowa kluczowe:** iły warwowe, właściwości mechaniczne, presjometr, naprężenie graniczne, naprężenie pełzania, moduł presjometryczny, badania *in situ*.

**Abstract.** The paper presents the results of engineering-geological studies of ice-dammed clays from Radzymin area in Poland. The mechanical parameters were obtained from the *in situ* tests performed with Menard pressuremeter. Tests were carried out using up to date control-test unit GeoSPAD. The results were set and compared with those from static test (CPT) and dilatometer test (DMT). Pressuremeter modulus, creep pressure, limit pressure and coefficient of earth pressure at rest and others parameters were evaluated. The differences between the results obtained from selected method were noticed. Geological conditions of ice-dammed clays in study area were also presented in the paper.

**Key words:** varved clays, mechanical properties, pressuremeter, limit pressure, creep pressure, pressuremeter modulus, *in situ* tests.

### WSTĘP

Opracowanie dotyczy iłów zastoiskowych z okolic Radzymina, zaakumulowanych w okresie zlodowacenia północnopolskiego. Są one wykształcone w postaci tłustych iłów warwowych, horyzontalnie laminowanych, co stanowi odzwierciedlenie specyficznych warunków sedimentacji (Myślińska, 1965). Ich miąższość waha się tu od kilku do kilkunastu metrów.

Iły warwowe „zastoiska warszawskiego” związane z najmłodszym zlodowaceniem występują dość powszechnie na terenie Mazowsza. Często stanowią podłoże obiektów budowlanych. Zatem wydaje się konieczne i celowe przedstawienie charakterystycznych cech fizyczno-mechanicznych w celu ich praktycznego wykorzystania przy realizacji inwestycji budowlanych (Ptaszkiewicz, 2007).

<sup>1</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; piotr.zawrzykraj@uw.edu.pl, k.kielbasinski@uw.edu.pl

Sondowania przeprowadzono w miejscowości Mokre k. Radzimina, gdzie prowadzona jest eksploatacja ilów zastoiskowych na potrzeby przemysłu ceramiki budowlanej. Seria zastoiskowa osiąga tu miąższość od 6 do 8 m i jest reprezentowana głównie przez szare ily warwowe. W stropie serii zastoiskowej notowane są piaski fluwialne i eoliczne barwy żółtej, bardzo drobnoziarniste i pylaste, niekiedy zailone, o miąższości około 2 m.

Poniżej piasków występuje około 20-centymetrowa warstwa mułku niewarstwowanego barwy szarej o strukturze gruzelkowej. Od głębokości około 2,2 m p.p.t. stwierdzono ily warwowe o wyraźnych, lecz zróżnicowanych grubościach warw, najczęściej kilkumilimetrycznych, przechodzące

stopniowo poniżej w mułki niewykazujące struktury warwowej. Warstwa ta osiąga około 1,5 m miąższości.

Na głębokości około 3,2 m p.p.t. znajduje się charakterystyczna warstwa piasku drobnego, barwy szarej, zailonego, około 30-centymetrowej miąższości. Poniżej niej rozpoczyna się główna seria ilów warwowych i występuje ona do głębokości około 9–10 m p.p.t. Cechuje się barwą szarą i zmienną miąższością warw. W stropie seria ta charakteryzuje się strukturą gruzelkową.

Na tym poligonie badawczym przeprowadzono badanie presjometryczne PBP, którego wyniki porównano następnie z wynikami sondowania statycznego CPT i sondowania dylatometrycznego DMT.

## METODYKA BADAŃ

Do określenia właściwości fizyczno-mechanicznych zastosowano presjometr Menarda. Teoretyczne podstawy i zasady badań presjometrycznych zostały opracowane przez Menarda i opublikowane przez Baguelina i in. (1984). Procedury badawcze zawierają także normy dotyczące polowych badań gruntów (AFNOR, ASTM, EN, PN). Presjometr stanowi najbardziej wymagające urządzenie badawcze spośród wymienionych. Jak podkreślają wszyscy badacze (Baguelin i in., 1984; Frankowski, 2003; Tarnawski, 1985, 2007), kluczową rolę odgrywa tutaj przygotowanie odpowiedniego otworu badawczego. Wymagająca szczególnej staranności procedura sprawia, iż często jest on zastępowany innymi sondami. Presjometr Menarda umożliwia uzyskanie charakterystyki odkształcalności w szerokim zakresie obciążeń. Jest to urządzenie o dużym potencjale,

pozwalające przy odpowiednich trybach pracy na uzyskanie wielu cech fizyczno-mechanicznych gruntów. Potwierdzają to sympozja i konferencje poświęcone tym zagadnieniom. Doświadczenia w stosowaniu presjometru zbierane są od ponad pięćdziesięciu lat (Gambin i in., 2005). Procedura badawcza naśladuje stopniowe obciążanie gruntu do momentu zniszczenia jego struktury. Wyniki badań presjometrycznych pozwalają ocenić w sposób ilościowy ściśliwość i nośność gruntu. Charakteryzują reakcję ścian otworu (otaczającego sondę gruntu) na przyrastające stopniowo (etapami) ciśnienie w sondzie. W efekcie uzyskujemy cenny obraz w postaci krzywej presjometrycznej, która obrazuje zachowanie się badanego gruntu w szerokim zakresie ciśnień (obciążeń). Badanie to stanowi próbne obciążenie gruntu w otworze wiertniczym.

## WYNIKI BADAŃ

Do badań presjometrycznych zastosowano aparaturę firmy APAGEO, tj. presjometr typu G wyposażony w elektroniczny system rejestracji GeoSPAD (fig. 1). W trakcie testów użyto sondę o średnicy 58 mm (BX) oraz oryginalny świder ręczny firmy APAGEO. Wiercenie przeprowadzono ręcznie, na sucho, każdorazowo odwiercając kolejny odcinek przed zaplanowaną głębokością badania. Występujące w stropie ilów piaski drobne, w spągu nawodnione, odcięto rurą osłonową.

Do interpretacji wartości podstawowych parametrów wykorzystano program XPressio. Syntetyczne zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 1 oraz na figurze 2, natomiast wybrane krzywe presjometryczne na figurach 3 i 4. Za pomocą badania presjometrycznego wyznaczono następujące parametry w profilu pionowym:

- moduł presjometryczny ( $E_M$ ),
- naprężenie pełzania ( $p_f$ ),
- naprężenie graniczne ( $p_i$ ),
- całkowite naprężenie poziome ( $\sigma_{hs}$ ),
- współczynnik parcia gruntu w spoczynku ( $K_0$ ).

Analizując wyniki badań w odniesieniu do modułu pre-

sjometrycznego ( $E_M$ ), należy zauważyć, iż jego wartość zmienia się w profilu ilów zastoiskowych od około 6,7 do 23,7 MPa, z czego widać, iż wraz z głębokością rośnie, choć na głębokości 4,8 i 5,8 m wartości te nie korespondują z tą tendencją. Do głębokości około 6,0 m wartości modułów odkształcenia z sondowania statycznego (CPT) i dylatometrycznego (DMT) są nieznacznie większe niż z badań presjometrycznych (fig. 6). Jednakże z głębokości poniżej 6,0 m wartości modułu presjometrycznego przewyższają wartości modułów  $E_{CPT}$  i  $E_{DMT}$ . Zdaniem autora, zarejestrowane różnice wynikają z odmiennej metodyki badań, a także ze zmienności przyrodniczej badanych osadów.

Naprężenie pełzania ( $p_f$ ) w badaniu presjometrycznym charakteryzuje początek fazy odkształceń plastycznych. Wartości tego parametru uzyskane dla ilów zastoiskowych z Mokrego zmieniają się od 0,24 do 0,58 MPa (tab. 1, fig. 2 i 5). Wartości  $p_f$  zestawiono z naprężeniem prekonsolidacji ( $\sigma'_p$ ), które w świetle aktualnych badań (Burland i in., 1996; Zawrzykraj, 2007) należy bezpiecznie interpretować jako naprężenie uplastycznienia ( $\sigma'_y$ ). Naprężenie pełzania ( $p_f$ ) odpowiada naprężeniu uplastycznienia ( $\sigma'_y$ ) z badania kon-



Fig. 1. Ogólny widok jednostki kontrolno-pomiarowej w trakcie badania

General view of the control unit during the test

solidometrycznego i poszukiwanie między nimi zależności wydaje się uzasadnione ze względu na podobny sens fizyczny. W obydwu przypadkach oznacza ono obciążenie, przy którym grunt uplastycznia się (kończy się faza odkształceń pseudosprężystych, a rozpoczyna faza odkształceń plastycznych). Autorzy są przekonani, iż na drodze dalszych badań uda się odnaleźć spodziewane zależności i naprężenie pełzania będzie pomocne w szacowaniu naprężenia uplastycznienia. Zbieżność między wartościami presjometrycznego naprężenia pełzania ( $p_f$ ) a naprężeniem prekonsolidacji ( $\sigma'_p$ ) została zauważona m.in. przez japońskich badaczy (Mori, Tajima, 1964). Zaprezentowane przez nich wyniki porównawcze pokazują, iż wartości są zbliżone dla dużych zakresów obciążeń prekonsolidacyjnych. Do podobnych wniosków doszli Lukas i LeClerk de Bussy (1976). Na figurze 5 przedstawiono wartości naprężenia pełzania i naprężenia uplastycznienia w profilu pionowym.

Naprężenie graniczne, nazywane także presjometryczną nośnością graniczną, zostaje osiągnięte w chwili podwojenia objętości poszerzającej się wnęki ( $V_s + 2V_1$ , gdzie:  $V_s$  – objętość komory pomiarowej sondy presjometrycznej w stanie spoczynku,  $V_1$  – standardowa objętość początkowa sondy odpowiadająca początkowi płaskiego odcinka krzywej presjometrycznej) (Baguelin i in., 1984; Tarnawski, 2007). Otrzymane w trakcie badania presjometrycznego wartości naprężenia granicznego ( $p_l$ ) zmieniają się od 0,55 MPa w stropie profilu do 0,87 MPa w jego dolnych partiach (tab. 1, fig. 2). Jego wartości są stosowane do określania nośności podłoża gruntowego (Baguelin i in., 1984; Frankowski, 2003; Tarnawski, 2007).

Tabela 1

Zestawienie uzyskanych parametrów

List of received parameters

Głębokość (m)	Parametry podstawowe			Parametry uzupełniające				
	$p_f$ (MPa)	$p_l$ (MPa)	$E_M$ (MPa)	$\sigma_{hs}$ (MPa)	$p_{l^*}$ (MPa)	$E/p_l$	$E/p_{l^*}$	$K_0$
2,60	0,24	0,55	7,3	0,028	0,52	13,2	13,9	0,49
2,80	0,34	0,64	11,0	0,031	0,61	17,1	17,9	0,59
3,80	0,35	0,61	10,5	0,045	0,56	17,3	18,7	0,60
4,50	0,35	0,63	11,8	0,055	0,57	18,8	20,6	0,64
4,80	0,36	0,62	6,7	0,059	0,56	10,8	11,9	0,66
5,50	0,27	0,63	12,9	0,069	0,56	20,5	23,1	0,67
5,80	0,37	0,72	8,9	0,073	0,65	12,3	13,7	0,68
6,50	0,58	0,87	23,7	0,083	0,79	27,2	30,1	0,68
6,80	0,58	0,86	19,5	0,087	0,77	22,7	25,3	0,69
7,50	0,58	0,82	21,2	0,097	0,73	25,8	29,2	0,69

Objaśnienia symboli w tekście;  $p_{l^*}$  – naprężenie „netto” (naprężenie graniczne pomniejszone o presjometryczne naprężenie poziome  $p_o$ )

Symbols explanations in the text;  $p_{l^*}$  – net pressure (limit pressure decreased by pressuremeter horizontal pressure  $p_o$ )

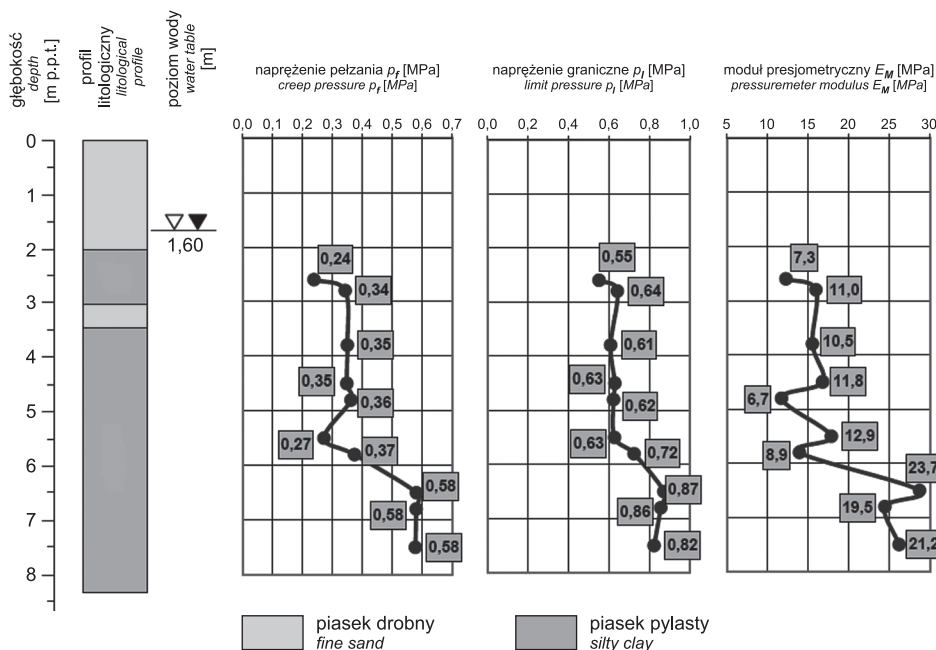


Fig. 2. Podstawowe parametry presjometryczne w profilu pionowym; Mokre k. Radzymina

Basic pressuremeter parameters in the vertical profile; Mokre near Radzymin

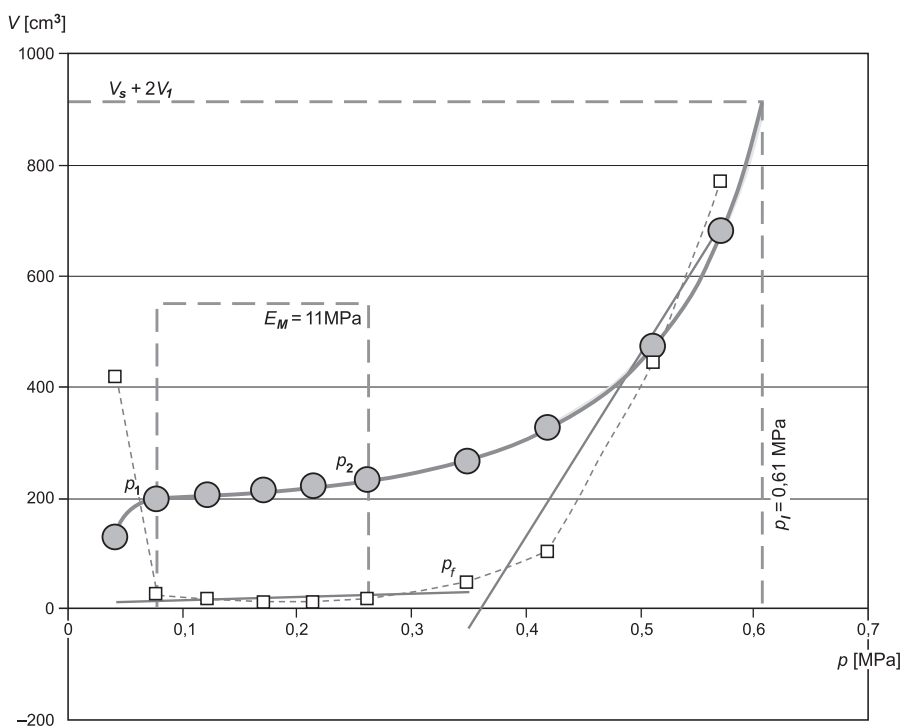


Fig. 3. Krzywa presjometryczna; Mokre k. Radzymina; głęb. 3,8 m

$V_s$  – objętość komory pomiarowej sondy presjometrycznej w stanie spoczynku,  $V_1$  – standardowa objętość początkowa sondy odpowiadająca początkowi płaskiego odcinka krzywej presjometrycznej,  $p_1$  – standardowe ciśnienie odpowiadające początkowi prostoliniowego odcinka krzywej presjometrycznej,  $p_2$  – standardowe ciśnienie odpowiadające końcowi prostoliniowego odcinka krzywej presjometrycznej,  $p_c$  – naprężenie pełzania,  $p_l$  – naprężenie graniczne,  $E_M$  – moduł presjometryczny

Pressuremeter curve; Mokre near Radzymin; depth 3.8 m

$V_s$  – volume of interior measuring cell of pressuremeter at rest,  $V_1$  – standard initial volume of the probe referring to the beginning of the flat section of pressuremeter curve,  $p_1$  – standard pressure referring to the beginning of the flat section of pressuremeter curve,  $p_2$  – standard pressure referring to the end of the flat section of pressuremeter curve,  $p_c$  – creep pressure,  $p_l$  – limit pressure,  $E_M$  – pressuremeter modulus

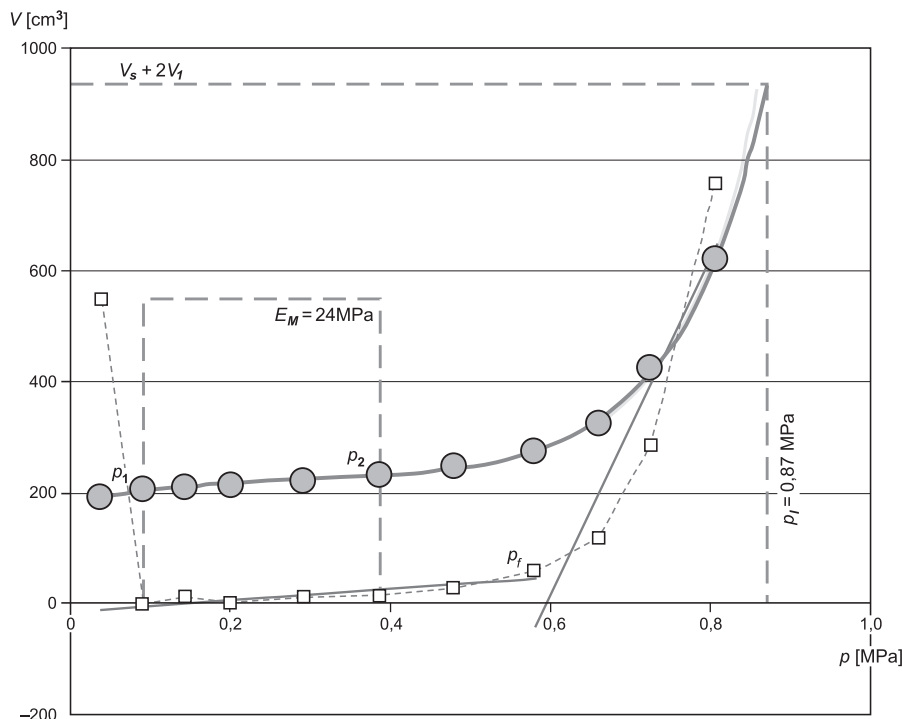


Fig. 4. Krzywa presjometryczna; Mokre k. Radzimina; głęb. 6,5 m

Objaśnienia jak na fig. 3

Pressuremeter curve; Mokre near Radzimin; depth 6.5 m

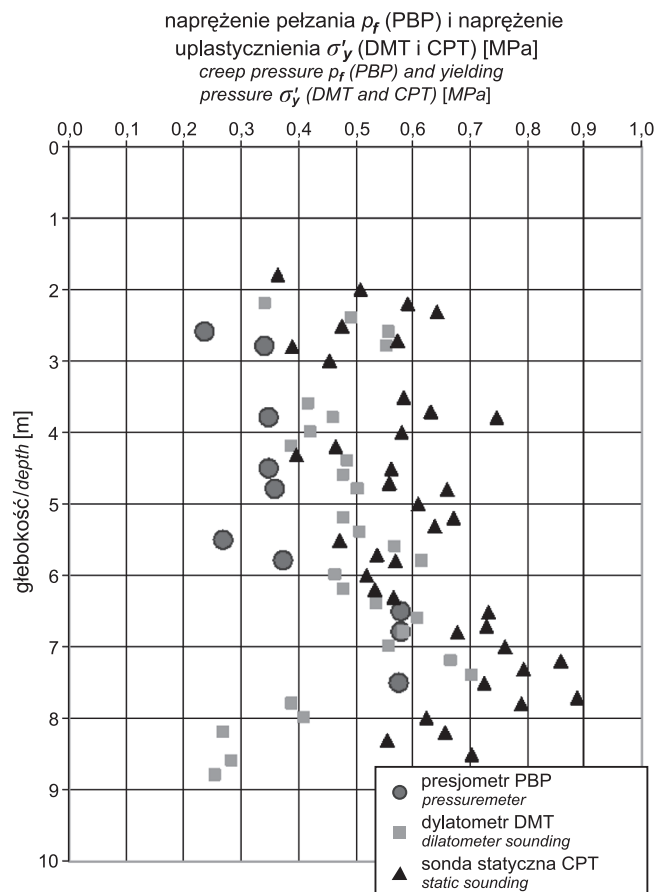
Explanations as in Fig. 3

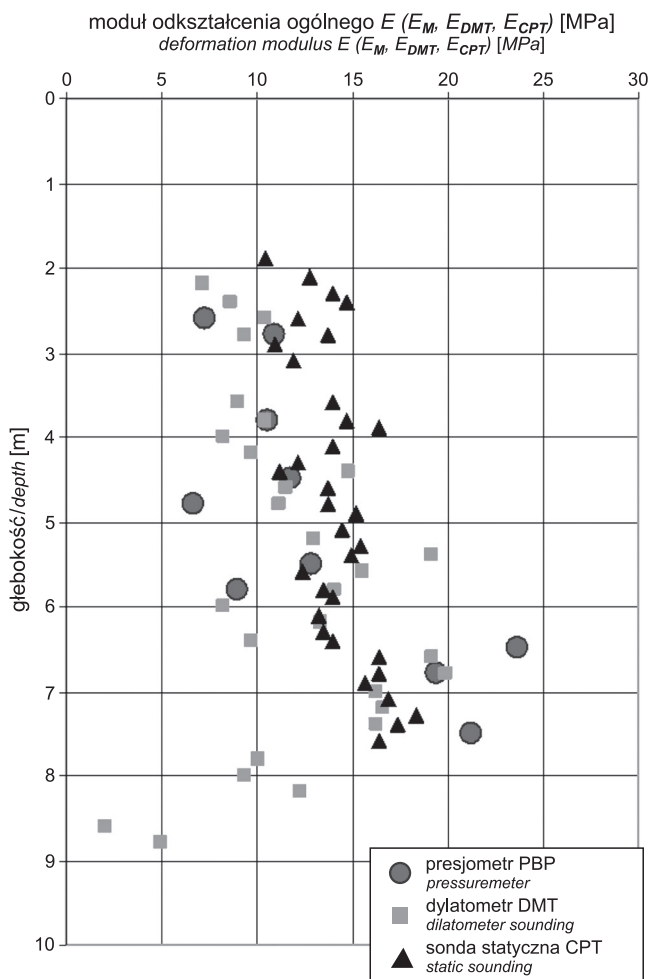
Otrzymane w toku niniejszych badań wartości naprężeń poziomych ( $\sigma_{hs}$ ) zostały następnie wykorzystane do określenia współczynnika parcia gruntu w spoczynku zgodnie ze wzorem:  $K_0 = \sigma_{hs} / \sigma_{vo}$ , gdzie:  $\sigma_{hs}$  – poziome naprężenie na danej głębokości,  $\sigma_{vo}$  – pionowe naprężenie od nadkładu panujące na danej głębokości.

Na figurze 7 porównano obliczone wartości parametru  $K_0$  z uzyskanymi na drodze sondowania statycznego i dylatometrycznego. Wyznaczanie naprężeń poziomych panujących w gruncie, a tym samym współczynnika  $K_0$ , jest zadaniem szczególnie trudnym. Zgodnie z jego definicją wyznacza się go przy wzrastającym naprężeniu pionowym i jednoczesnym braku możliwości odkształceń bocznych. Wyznaczanie naprężenia poziomego w toku badań terenowych odbywa się w odmiennym stanie naprężeń i odkształceń niż w warunkach laboratoryjnych. Opracowane w tym zakresie zależności między badaniami laboratoryjnymi a polowymi dają często niespójne wyniki. Dodatkowo w zależności od zastosowanej procedury badawczej właściwą interpretację utrudniają zmiany strukturalne zachodzące

Fig. 5. Naprężenie pełzania i naprężenie uplastycznienia w profilu pionowym; Mokre k. Radzimina

Creep pressure and yielding pressure in the vertical profile; Mokre near Radzimin

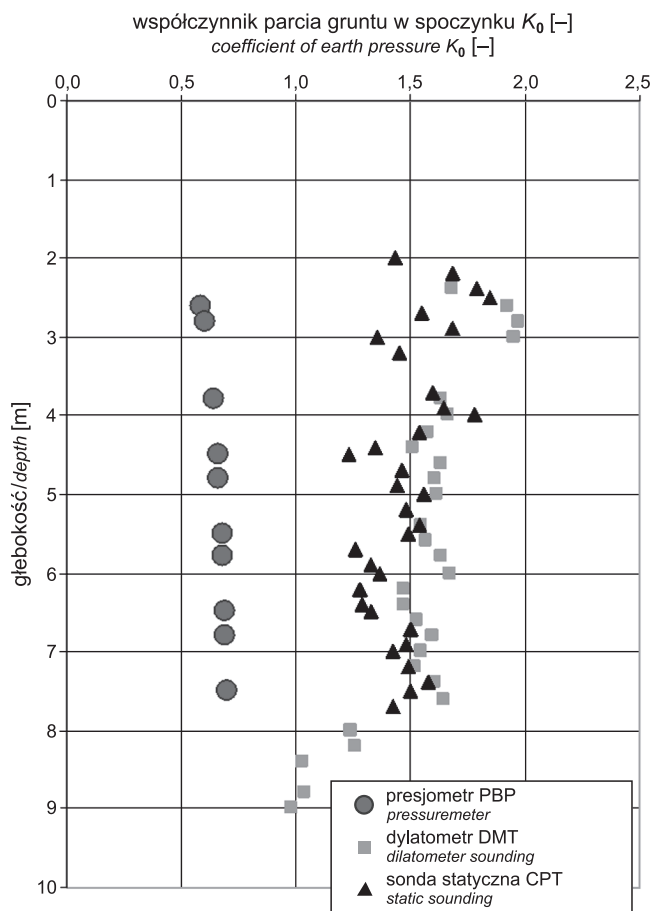




**Fig. 6. Moduły odkształcenia ogólnego w profilu pionowym; Mokre k. Radzymina**

Deformation modulus in the vertical profile;  
Mokre near Radzymin

w osadzie od chwili jego powstania (wietrzenie, diagenaza) (Boone, Lutenegeger, 1997; Zawrzykraj, 2004). Rezultaty otrzymane z wykorzystaniem sondy statycznej i dylatomtru Marchettiego prezentują znacznie wyższe wartości, aniżeli te uzyskane z badania presjometrycznego (fig. 7, tab. 1). Pełne wyjaśnienie przyczyn tych rozbieżności jest trudne. Być może niższe wartości współczynnika  $K_0$  są częściowo związane z odmienną metodyką badań (odprężeniem gruntu w czasie przygotowywania otworu do badania presjome-



**Fig. 7. Współczynnik parcia gruntu w spoczynku w profilu pionowym; Mokre k. Radzymina**

Coefficient of earth pressure at rest in the vertical profile;  
Mokre near Radzymin

trycznego). Należy tu dodać, iż czas, który upłynął od chwili wykonania podwiertu na zaplanowaną głębokość testu do rozpoczęcia cyklu badawczego, wynosił około 5–10 minut.

Nie można także wykluczyć, iż bliższy rzeczywistości jest współczynnik parcia gruntu w spoczynku, otrzymany z badania presjometrycznego. Zdaniem autora, w tym zakresie jednoznaczna odpowiedź jest trudna, a wyjaśnienie istniejących wątpliwości wymaga wielu dalszych badań. Tymczasem należy mieć świadomość istniejących różnic między wartościami współczynnika  $K_0$  w zależności od sposobu jego wyznaczenia.

## PODSUMOWANIE

Iły warwowe są osadami powszechnie występującymi w okolicach Warszawy i często stanowią podłoże obiektów budowlanych. Dlatego wymagają kompleksowej charakterystyki geologiczno-inżynierskiej, w tym z zastosowaniem najnowocześniejszych urządzeń badawczych, takich jak presjometr Menarda wyposażony w system kontrolno-pomiarowy GeoSPAD. W efekcie wykonanych badań okre-

ślono w profilu pionowym podstawowe parametry presjometryczne, tj. naprężenie pełzania, naprężenie graniczne, moduł presjometryczny i całkowite naprężenie poziome. Zestawienie modułów odkształcenia otrzymanych z różnych typów badań polowych pokazało, iż uzyskane wyniki korespondują ze sobą. Analiza wartości naprężenia poziomego i współczynnika parcia gruntu w spoczynku pozwala

na wysunięcie tezy, iż obecnie problem właściwej korelacji między różnymi urządzeniami jest nie do końca rozwiązany. Przekłada się to zatem na wątpliwości co do poprawnej interpretacji danych. Stwierdzono znaczne różnice w wartościach wyżej wymienionych parametrów w zależności od zastosowanego narzędzia badawczego. O ile wartości  $K_0$

otrzymane z sondowania CPT i DMT są zbieżne, to w przypadku badania presjometrycznego współczynnik parcia gruntu w spoczynku przyjmuje wartości około 2-krotnie mniejsze. Wyjaśnienie tych rozbieżności stanowi powód do kontynuacji badań zmierzających do określenia naprężeń w gruntach.

## LITERATURA

- BAGUELIN F., JÉZÉQUEEL J.F., SHIELDS D.H., 1984 — Badania presjometryczne a fundamentowanie. Wyd. Geol., Warszawa.
- BOONE J., LUTENEGGER J., 1997 — Carbonates and cementation of glacially derived cohesive soils in New York State and southern Ontario. *Canadian Geotechn. Jour.*, **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.
- FRANKOWSKI Z., 2003 — Interpretacja wyników sondowań dynamicznych i badań presjometrycznych. W: Seminarium „Nowoczesne Metody Badań Gruntów”. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.
- GAMBIN M., MAGNAN J.P., MESTAT P., 2005 — ISP-Pressio 2005 – International Symposium 50 years of pressuremeters, Marne-la-Vallée, **1**, 2. Presses Ecole Nationale Ponts et Chaussées, Paris.
- LUKAS G.L., LECLERC DE BUSSY B., 1976 — Pressuremeter and laboratory test correlations for clays. *Jour. Geotechn. Engineer. Division, Amer. Soc. Civil Engineers.*, **102**, GT 9, September: 945–963.
- MORI H., TAJIMA S., 1964 — The application of the pressiometre method to the design of deep foundations. *Soil and Foundations, Tokyo*, **4**, 2: 34–44.
- MYŚLIŃSKA E., 1965 — Wpływ warunków sedymentacji i diagenety ilów warwowych zlodowacenia środkowopolskiego na obszarze Mazowsza na ich własności inżyniersko-geologiczne. *Biul. Geol. Wydz. Geol. UW*, **7**.
- PTASZKIEWICZ M., 2007 — Wpływ zróżnicowania litologicznego ilów warwowych na możliwość ich zastosowania jako barier geologicznych, izolacyjnych (praca doktorska). Arch. Wydz. Geol. UW, Warszawa.
- TARNAWSKI M., 1985 — Błędy w badaniach presjometrycznych. *Prz. Geol.*, **1**: 38–41.
- TARNAWSKI M., 2007 — Zastosowanie presjometru w badaniach gruntu. PWN, Warszawa.
- ZAWRZYKRAJ P., 2004 — Analiza stanu skonsolidowania ilów warwowych w rejonie Sochaczewa i Radzymina (praca doktorska). Arch. Wydz. Geol. UW, Warszawa.
- ZAWRZYKRAJ P., 2007 — Ocena efektów prekonsolidacyjnych na podstawie charakterystyki ścisłości ilów zastoiskowych okolic Warszawy. *Geologos*, **11**: 499–508.

## SUMMARY

Ice-dammed clays from Vistula Glaciation occur commonly near Warsaw. Due to the shallow occurrence they are often the subsoil of buildings. It is therefore essential and important to know their mechanical properties based on different research methods. The authors of this paper have presented mechanical characteristics of varved clays based on Menard pressuremeter test. The study was carried out in Mokre near Radzymin. Ten pressuremeter tests were carried out to determine creep pressure ( $p_f$ ), pressuremeter modulus ( $E_p$ ), limit pressure ( $p_l$ ) and many others. The results of pressuremeter tests were compared with other type of *in situ* tests,

i.e. static sounding CPT and dilatometer sounding DMT. The values of creep pressure range from 0.24 to 0.58 MPa. The values of the pressuremeter modulus range from 6.3 to 23.7 MPa, while the values of limit pressure include the interval from 0.55 to 0.87 MPa. Among the soil parameters determined by various *in situ* test, the most significant differences were observed for the values of coefficient of earth pressure at rest  $K_0$ . The results of the pressuremeter tests were twice smaller in average than the values obtained from static tests CPT or dilatometer tests DMT. The proper interpretation of tests results requires the further research.

