

Współczynnik konsolidacji c_h i współczynnik filtracji k_h ilów warwowych z Plecewic k. Sochaczewa w świetle badań dylatometrycznych

Piotr Zawrzykraj*

Coefficient of consolidation c_h and coefficient of permeability k_h of varved clays from Plecewice near Sochaczew (Central Poland) in the light of dilatometer test. Prz. Geol., 52: 1067–1070.

Summary. The paper presents the results of the field testing obtained from DMT (Flat Dilatometer Test) soundings carried out in Plecewice near Sochaczew, where an open pit of varved clays is situated. The horizontal coefficient of consolidation c_h and horizontal coefficient of permeability k_h were determined at six depth levels with DMTA method. It is a new way of determination of the rate of consolidation and permeability in the field proposed by Marchetti and Totani in 1989. In this paper the geological situation, method and procedure of investigation were presented.

Key words: consolidation, permeability, dissipation, varved clays, dilatometer

Podczas badań terenowych podłoża gruntowego z zastosowaniem różnego rodzaju sond wciskanych oraz wbijanych generuje się w ośrodku gruntowym dodatkowe ciśnienie wody porowej. Jest ono związane z obecnością różnego typu końcówek pomiarowych oraz ze sposobem wprowadzania ich w badane podłoże. W gruntach o niskim współczynniku filtracji (pyły, ily) nadciśnienie wody porowej rozprasa się bardzo powoli. Wówczas istnieje możliwość oszacowania parametrów konsolidacji i filtracji poprzez zastosowanie nowoczesnej aparatury do badań *in situ* umożliwiającej monitoring ciśnienia porowego. Prezentowane badania przeprowadzono w Plecewicach k. Sochaczewa (ryc. 1).

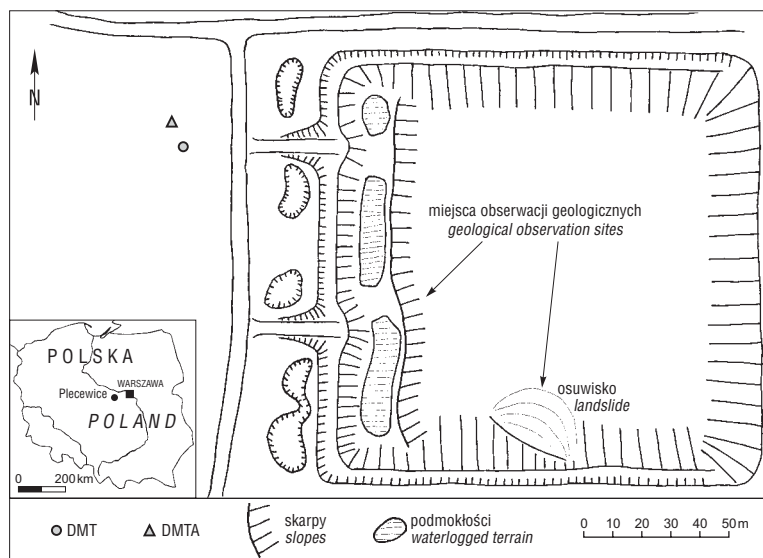
Podstawy metody i przebieg badania

Dużą wiarygodność i powtarzalność uzyskiwanych wyników badań ma dylatometr Marchettiego. Jego szczególną przydatność do oceny parametrów gruntu potwierdzają liczne publikacje oraz konferencje międzynarodowe organizowane w związku z jego zastosowaniem w badaniach gruntów. Obecnie jest jednym z najpopularniejszych w Unii Europejskiej i w USA aparatem do oceny podłoża *in situ*, zarazem w Polsce nadal rzadko stosowany. Jest zalecany przez współczesne amerykańskie i europejskie normy. Należy niewątpliwie do najnowocześniejszych urządzeń służących do badań polowych podłoża gruntowego, charakteryzującym się bogatym spektrum uzyskiwanych parametrów. Mimo to dylatometr Marchettiego jest rzadko wymieniany w polskiej literaturze jako sprzęt do oceny parametrów gruntów w warunkach terenowych.

W skład urządzenia wchodzi stalowa, płaska łopata, wyposażona w kołową membranę, oraz centralną jednostką pomiarową. Ostrze wprowadza się w grunt poprzez wciskanie ze stałą prędkością, wykorzystując do tego celu np. urządzenie hydrauliczne sondy statycznej. Na zaplanowanej głębokości zatrzymuje się pogrążanie łopaty dylatometru rozpoczynając jednocześnie cykl pomiarowy. Standardowe badanie DMT polega na rejestracji dwóch war-

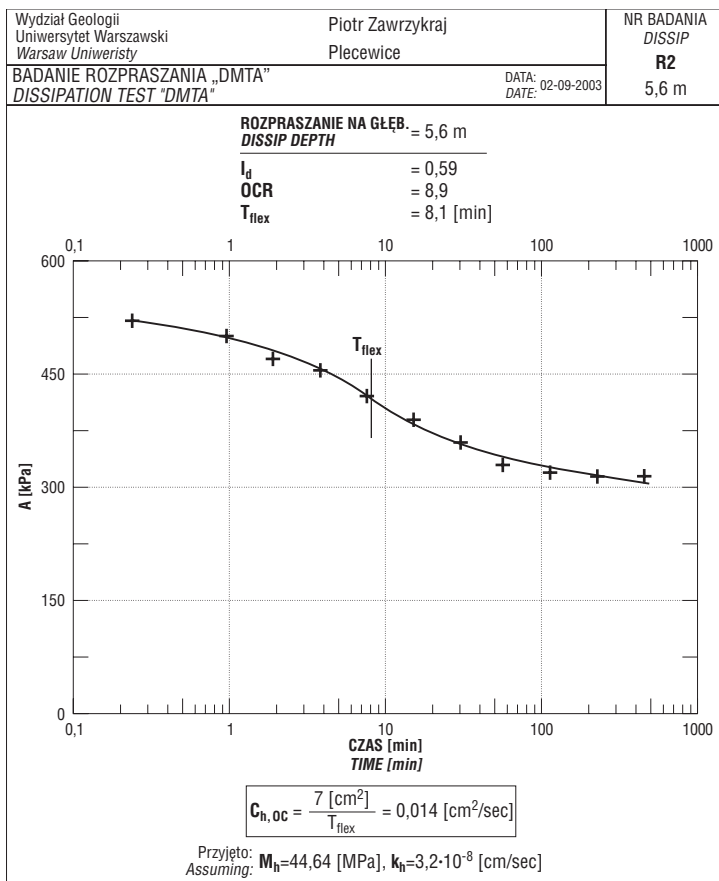
tości ciśnień: p_0 — ciśnienie powietrza w układzie pomiarowym konieczne do rozpoczęcia ekspansji membrany w kierunku gruntu, skorygowane na bezwładność membrany i „zero” manometru; p_1 — ciśnienie, przy którym odchylenie membrany w kierunku gruntu (względem położenia przy ciśnieniu p_0) wynosi 1,1 mm, skorygowane na bezwładność membrany i „zero” manometru. Te dwie wartości są podstawą do dalszych obliczeń. Procedurę tą powtarza się co 20 cm.

Badanie dyssypacji nadciśnienia wody porowej dylatometrem Marchettiego, w skrócie określane jako DMTA (Marchetti & Totani, 1989), polega na wykonaniu na zaplanowanej głębokości pomiaru całkowitego naprężenia poziomego σ_h i jego relaksacji w czasie. Odbywa się to poprzez rejestrację odczytu A . Jest to ciśnienie gazu wywierane na membranę, konieczne do przesunięcia jej środka o 0,05 mm w kierunku otaczającego gruntu. Pomiarów dokonuje się w logarytmicznej skali czasowej. Tak dobieramy odstępy między kolejnymi odczytami, aby uzyskać odpowiednią liczbę pomiarów do wyznaczenia krzywej i jej punktu przegięcia oznaczonego jako T_{flex} (ryc. 2, 3). Jest to czas odpowiadający zmniejszeniu się nadciśnienia wody porowej o 50% w danym cyklu badawczym. Ta wartość parametru jest wykorzystywana do oceny współczynnika



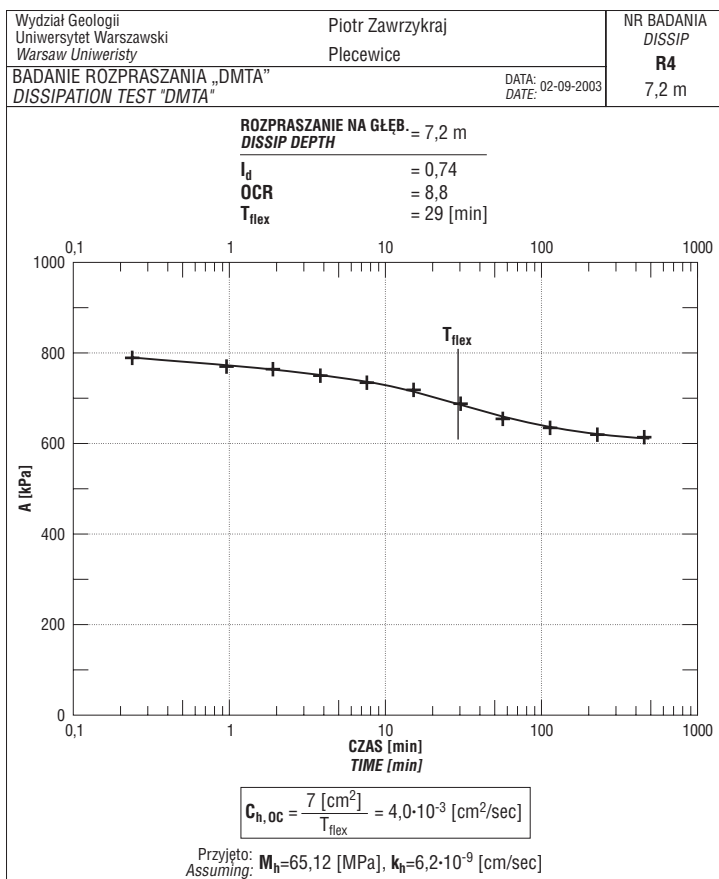
Ryc. 1. Lokalizacja terenu badań i sondowań w Plecewicach
Fig. 1. Location of soundings in Plecewice clay pit

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; Piotr.Zawrzykraj@uw.edu.pl



Ryc. 2. Badanie rozpraszania, głębokość 5,6 m

Fig. 2. Dissipation test, depth 5,6 m



Ryc. 3. Badanie rozpraszania, głębokość 7,2 m

Fig. 3. Dissipation test, depth 7,2 m

konsolidacji i filtracji, zgodnie z poniższymi empirycznymi wzorami:

$$c_{h,OC} \approx 7 \text{ cm}^2 / T_{flex}$$

gdzie: $c_{h,OC}$ — współczynnik konsolidacji gruntów umiarkowanie przekonsolidowanych.

$$k_h = c_h \cdot \gamma_w / M_h$$

gdzie: k_h — współczynnik filtracji,
 γ_w — ciężar właściwy wody.

$$M_h = K_0 \cdot M_{DMT}$$

K_0 — współczynnik parcia gruntu w spoczynku,
 M_{DMT} — dylatometryczny moduł ścisłości pionowej.

Należy zaznaczyć, iż zależność ta odnosi się do gruntów należących do umiarkowanie przekonsolidowanych (OCR 1,5–3,0). Współczynnik prekonsolidacji OCR dla iłłów warwowych określony z badania DMT waha się między 4 i 9. Wyniki te nie uwzględniają jednak wpływu struktury gruntu na wartości OCR. Należy je traktować z pewną rezerwą.

Wyznaczenie T_{flex} (dla A_{50}) nie wymaga znajomości odczytu A początkowego (A_0) ani też wartości A po całkowitym rozproszeniu nadciśnienia porowego (A_{100}). Nie musimy zatem przeprowadzać badania aż do całkowitego rozproszenia nadciśnienia wody porowej. Jest to niewątpliwie ogromna zaleta tego badania, gdyż unikamy czasochłonnych obserwacji. Pomiary prowadzimy do momentu kiedy jednoznacznie możemy wyznaczyć punkt T_{flex} , co zazwyczaj osiągamy w ciągu kilku godzin.

Zadawane pneumatycznie na membranę ciśnienie w chwili odczytu A , pokonuje całkowite naprężenia poziome wywierane przez grunt na tą membranę. Wartość odczytu A to minimalne ciśnienie konieczne, aby membrana rozpoczęła ekspansję w kierunku otaczającego ją gruntu, co jest sygnalizowane wyłączeniem sygnału akustycznego.

Na wartość całkowitego naprężenia poziomego σ_h składa się naprężenie poziome pochodzące od szkieletu gruntowego σ_{hg} , ciśnienie wody porowej u , oraz nadciśnienie (względem pierwotnego ciśnienia porowego u) wywołane penetracją sondy dylatometru Δu .

$$\sigma_h = \sigma_{hg} + u + \Delta u$$

Prędkość dyssypacji σ_h w gruntach o różnym współczynniku filtracji jest różna. Istnieje wyraźna zależność między tempem rozpraszania się ciśnienia wody porowej i tempem rozpraszania całkowitego naprężenia poziomego wywieranego na membranę. W szerokim zakresie przebieg krzywych dyssypacji σ_h i u jest współkształtny. Zatem należy się spodziewać, iż istnieje związek między tempem dyssypacji σ_h i c_h (Marchetti i in., 1986; Marchetti & Totani, 1989).

Ogólna charakterystyka badanych gruntów

Iły warwowe, nazywane również wstęgowymi, mają duży udział wśród gruntów występujących w obrębie Kotliny Warszawskiej. Przedstawione w artykule wyniki badań dotyczą iłłów tzw. poziomym łożyskiem powstałych w zbiorniku zastojowym w okresie zlodowacenia wisły. Wówczas, w wyniku zahamowania odpływu wód przez czoło lądolodu, na

terenie dzisiejszej Kotliny Warszawskiej utworzyło się zastoisko. Ten płytki, rozległy zbiornik o urozmaiconej linii brzegowej był obszarem akumulacji zwięzłych, tłustych iłów warwowych, silnie wapnitych, barwy czekoladowej. Ich charakterystyczna struktura i tekstura (warwowa) wynika ze specyficznych warunków sedymentacji w klimacie peryglacjalnym (Myślińska, 1965; Merta, 1978). Omawiane grunty najczęściej składają się z warstewki pylastej, jaśniejszej, której powstanie wiąże się z intensywniejszą dostawą materiału w okresie letnim, oraz warstewki ciemniejszej, tworzącej się w wyniku sedymentacji w okresie zimowym w warunkach redukcyjnych. Układ dwóch warstewek, jaśniejszej i ciemniejszej nazywamy warwą. Obserwacje kontaktu warstewki jasnej i ciemnej pozwalają stwierdzić, że kontakt między górną powierzchnią jasnej i dolną ciemnej jest płynny. Wyróżnienie granicy między warstwą jasną a ciemną jest często subiektywne. Natomiast kontakt między stropem ciemnej a spągiem jasnej jest najczęściej wyraźny i ostry.

Wyniki badań

Miejscowość Plecewice znajduje się ok. 6 km na północ od Sochaczewa. Miąższość serii osadów zastoiskowych jest zmienna i wynosi od 9 do 16 m. W stropie znajdują się piaski rzeczne 2-metrowej miąższości, spąg ograniczają piaski fluwioglacjalne. Iły warwowe charakteryzują się zmienną miąższością warw; od kilku milimetrów do kilku centymetrów (ryc. 5, 6). Tym niemniej obserwuje się wyraźną zależność zwiększania się zawartości frakcji iłowej wraz z głębokością. Pod względem granulometrycznym badane grunty są iłami oraz w mniejszym stopniu iłami pylastymi (rodzaj gruntu określono wg PN-86/B-02480). Zawartość frakcji iłowej określona dla

próbek bruzdowych waha się między 34 a 84%. Wilgotność naturalna zmienia się w granicach 34–41%, natomiast ciężar właściwy szkieletu gruntowego w przedziale 2,74–2,78 G/cm³.

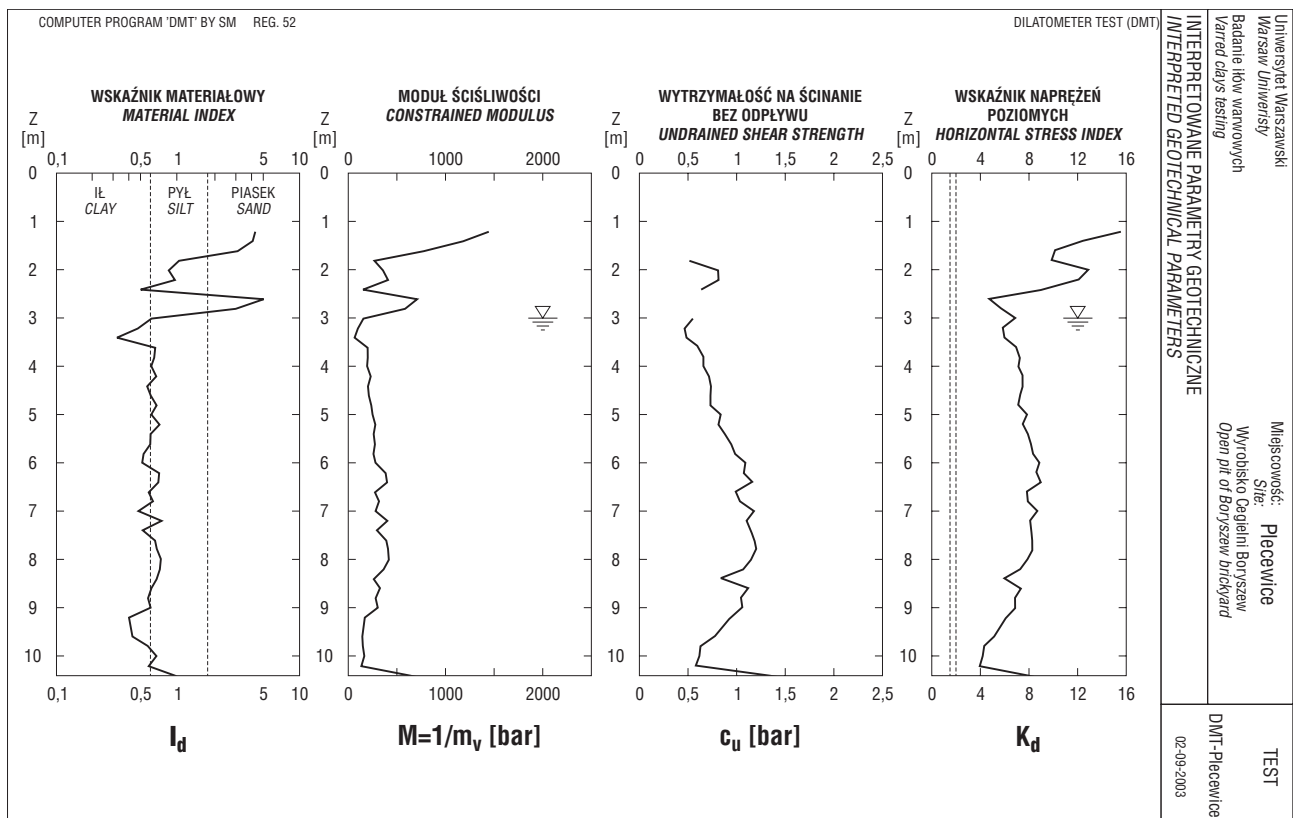
Badania zostały przeprowadzone obok wyrobiska wykorzystywanego do niedawna przez cegielnię „Boryszew” (ryc. 1).

Badanie rozpraszania nadciśnienia wody porowej przeprowadzono na 6 poziomach. Głębokości te zostały wytypowane na podstawie zmienności miąższości warw obserwowanej w ścianach glinianki oraz na podstawie zmienności litologicznej gruntu tak, aby przeprowadzić badanie na najbardziej charakterystycznych i w miarę jednorodnych poziomach. Zmienność litologiczną profilu można było ocenić na podstawie wskaźnika materiałowego I_d z wcześniej przeprowadzonego badania dylatometrycznego, którego wynik prezentuje ryc. 4. Obliczenia współczynnika konsolidacji c_h i współczynnika filtracji k_h wraz z wyznaczeniem punktu T_{flex} przeprowadzono w oryginalnym programie Marchetti'ego (przykład stanowi ryc. 2, 3).

Zestawienie wyników badań prezentuje tabela 1.

Tab. 1. Zestawienie wyników badań (metoda DMTA)
Table 1. Results of the tests (DMTA method)

Głębokość Depth [m]	T_{flex} [min]	$c_{h,oc}$ [cm ² /s]	k_h [cm/s]
2,2	23	$5,2 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^{-9}$
5,6	8,1	$1,4 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-8}$
6,6	42	$2,8 \times 10^{-3}$	$6,1 \times 10^{-9}$
7,2	29	$4,0 \times 10^{-3}$	$6,2 \times 10^{-9}$
8,4	64	$1,8 \times 10^{-3}$	$5,4 \times 10^{-9}$
9,5	1,7	$7,0 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-7}$



Ryc. 4. Wyniki badania dylatometrycznego DMT
Fig. 4. Results of the dilatometer test DMT



Ryc. 5. Ił warwowy z Plecewic, głębokość ok. 6 m
Fig. 5. Varved clay from Plecewice, depth about 6 m



Ryc. 6. Ił warwowy z Plecewic, głębokość ok. 7 m
Fig. 6. Varved clay from Plecewice, depth about 7 m

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można zauważyć, iż zmienność wartości współczynnika konsolidacji i filtracji w kierunku poziomym otrzymana na podstawie badania DMTA zamyka się w wąskim przedziale. Wyraźnie odbiegają jedynie wartości c_h i k_h na głębokości 9,5 m. Jednakże jest to głębokość na której warstwy jasne stanowią wyraźne pylasto-piaszczyste przewarstwienia, dodatkowo w spagu iłów zmniejsza się spójność, co bezpośrednio zwiększa tempo rozpraszania nadciśnienia porowego.

Należy podkreślić znaczną zmienność granulometryczną iłów warwowych w profilu pionowym, toteż niezmiernie trudno jest reprezentatywnie ocenić wynikające częściowo z tego właściwości fizyczno-mechaniczne przedstawionych gruntów. Największy rozrzut uziarnienia zaznacza się w obrębie pojedynczej warwy — od frakcji piaskowej w spagu do frakcji ilastej w stropie warwy. Gdy jednak rozpatrujemy zmienność uziarnienia w nieco większej skali, kiedy porównujemy warwy lub zespoły warw między sobą, różnice te drastycznie zmniejszają się. Próba oceny parametrów konsolidacji i filtracji w tej skali daje znacznie bardziej obiektywne i zbieżne rezultaty. Zatem za zasadnością stosowania metody DMTA do iłów warwowych w Plecewicach przemawia także fakt, iż średnica membrany (6 cm) jest ponad dwukrotnie większa niż średnica miąższość warwy (2,3 cm).

Podsumowując należy uznać metodę DMTA za reprezentatywną i wiarygodną. Z badania otrzymujemy wypadkową tempa rozpraszania się nadciśnienia wody porowej, gdyż receptorem jest cała powierzchnia membrany, która odbiera zmniejszanie się ciśnienia całą powierzchnią i nie jest wrażliwa na punktowe spadki nadciśnienia. Metoda ta daje uśrednione tempo dyssypacji ciśnienia dla przekroju gruntu o powierzchni membrany dylatometru. Zatem wyniki są bardziej spójne i mniej rozbieżne niż dane uzyskane z

badania dyssypacji ciśnienia metodą CPTU. Należy pamiętać, iż w przypadku charakterystycznej struktury iłu warwowego wyniki badań zaniżają rzeczywistą wartość współczynnika filtracji w kierunku poziomym, co wynika ze specyfiki badania. Wyniki więc mają charakter pośredni między wartościami minimalnymi (w kierunku pionowym) a maksymalnymi (w kierunku poziomym).

Brak konieczności wykonywania wykopów, pobierania próbek w połączeniu ze stosunkowo krótkim czasem badania sprawia, iż badanie DMTA jest łatwą i stosunkowo szybką metodą do oceny współczynnika konsolidacji i filtracji w warunkach polowych.

Literatura

- BOJAKOWSKI T. 1982 — Charakterystyka geologiczno-surowcowa osadów zastoiska warszawskiego oraz ocena ich przydatności dla ceramiki budowlanej. *Biul. Inst. Geol.*, 336: 131–188.
- KROGULEC E. 1994 — Wpływ metodyki badań na otrzymywane wartości współczynnika filtracji osadów słabo przepuszczalnych. *Prz. Geol.*, 42: 276–279.
- MARCHETTI S. & TOTANI, G. 1989 — C_h Evaluations from DMTA Dissipation Curves. *Proc. XII ICSMFE, Rio de Janeiro, vol. 1*: 281–286.
- MERTA T. 1978 — Extraglacial varved deposits of the Warsaw Ice-Dammed Lake (younger Pleistocene), Mazovia Lowland, Central Poland. *Acta. Geol. Pol.*, 28: 241–271.
- MYŚLIŃSKA E. 1965 — Wpływ warunków sedimentacji i diagenety iłów warwowych zlodowacenia środkowopolskiego na obszarze Mazowsza na ich własności inżyniersko-geologiczne. *Biul. Geol. UW*, 7: 3–106.
- Polska Norma PN-B-04452/2002 — Geotechnika. Badania polowe. PKNiM, Warszawa.
- SOBOLEWSKI M. 2002 — Określanie charakterystyk przepływu wody w gruntach spoistych na podstawie badań *in situ*. Arch. SGGW, Warszawa.
- The Flat Dilatometer Test (DMT) Report of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) Technical Committee 16 on Ground Property Characterization from In-situ Testing 2001, Bali, Indonesia. www.marchetti-dmt.it