

Moduły ściśliwości i ścinania lessów z badań CPTU i SDMT

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Młynarek¹, dr hab. Jędrzej Wierzbicki², prof. UAM, mgr Mateusz Mańka³

¹Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska

²Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych

³Hebo – Poznań sp. z o.o.

Na obszarze Polski w podłożu występują grunty licznych formacji geologicznych o bardzo zróżnicowanej genezie. Parametry geotechniczne części z tych osadów były dobrze rozpoznane poprzez obszerne badania terenowe i laboratoryjne. Współcześnie, za wiodące badanie terenowe uważa się metodę statycznego sondowania oraz badanie dylatometryczne. W przypadku podłoża, które jest zbudowane z gruntów pochodzenia eolicznego, stoją istotne wyzwania, jeśli do wyznaczania parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych lessów będą wykorzystane powyższe metody. W literaturze światowej oraz krajowej znajdują się tylko nieliczne prace poświęcone tym gruntom. Na podstawie literatury można stwierdzić, że kilka zagadnień wymaga ustosunkowania się w kontekście badawczym oraz aplikacyjnym. Do zagadnień tych zalicza się:

- Wpływ efektu makrostruktury na parametry mierzone w badaniach CPTU i SDMT, a także zbadanie, czy makrostruktura w profilu podłoża lessowego jest jednorodna. Badania w pylastych osadach aluwialnych [17] wykazały, że część przypowierzchniowa podłoża charakteryzuje się strefami cementacji i wyraźnym efektem prekonsolidacji.
- Ocenę zgodności genezy lessów ze stopniem ich prekonsolidacji, a także możliwość identyfikacji efektu prekonsolidacji za pomocą systemów klasyfikacyjnych CPTU i DMT.
- Ocenę przydatności formuł z badania CPTU do wyznaczania modułów ściśliwości pierwotnej, które są ustalone dla gruntów spoistych innej genezy.
- Rozpoznanie czynników wpływających na moduły ściśliwości z badań CPTU i SDMT i ustalenie zależności empirycznej, która określa związek pomiędzy tymi modułami.
- Ustalenie związku pomiędzy modułem ścinania G_0 z badania SDMT a parametrami z badania CPTU i DMT.

Ustosunkowanie się do wymienionych kwestii na podstawie badań, które przeprowadzono w podłożu lessowym na obszarze południowej części Polski, stanowi cel niniejszego artykułu.

CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA TERENU BADAŃ

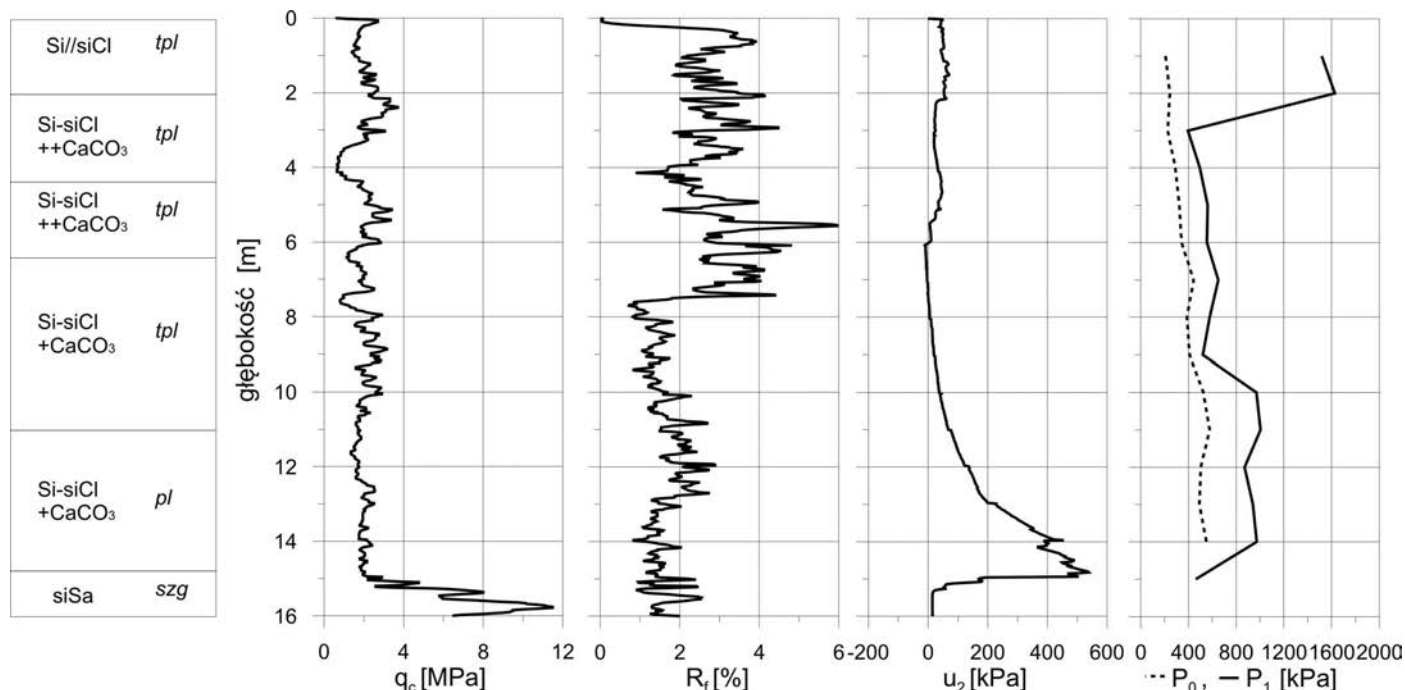
Badania terenowe przeprowadzono w rejonie Łańcuta, na zachodnim krańcu rozległego, ciągnącego się od Ukrainy, pasa pokryw lessowych Wyżyny Podolskiej [2]. Grubość pokrywy lessowej jest w tym rejonie zmienna i waha się od 9 do około 20 metrów (SMGP) (rys. 1). Grunty te, powstałe w środkowym i górnym plejstocenie, spoczywają na starszych utworach glacialnych i fluwioglacjalnych, związanych ze zlodowaceniami południowopolskimi. Badane grunty mają nieznacznie podwyższoną zawartość frakcji ilowej w stosunku do typowego uziarnienia lessów występujących w Polsce południowo-wschodniej [4] (tabl. 1). Badane lessy stanowią w sensie granulometrycznym pyły, pyły piaszczyste i niekiedy gliny pylaste, czyli grunty odpowiadające według PN-ISO gruntom z przedziału mieszanin pylasto ilowych i piaszkowych (saSi – siCl) (tabl. 1).

W przypadku badanych lessów poszczególne frakcje mieściły się w przedziałach: 24 ÷ 33% frakcja piaszkowa, 55 ÷ 71% frakcja pyłowa, 7 ÷ 14% frakcja ilowa. W serii lessowej woda gruntowa występuje jedynie sporadycznie i w postaci lokalnych sączek. Właściwe zwierciadło wód podziemnych jest związane z osadami fluwioglacjalnymi podścielającymi lessy i ma charakter zwierciadła napiętego o kilkumetrowej amplitudzie.

Zarówno Frankowski i inni [4], jak i Bogucki i inni [2] wskazują na co najmniej dwudzielną strukturę profilu lessów Wyżyny Podolskiej. Strefa stropowa profilu (według [4] – do głębokości około 3 m) charakteryzuje się większą zapadowością zarówno przy naprężeniu geostatycznym, jak i przy dodatkowym obciążeniu. Strefa dolna profilu gruntowego, pomimo podobnej genezy

Tabl. 1. Średnia zawartość poszczególnych frakcji badanych lessów na tle typowych wartości podawanych przez Frankowskiego i innych [4]

Frakcja	Piaszkowa [%]	Pyłowa [%]	Ilowa [%]	I_L [–]
Badania „Łańcut”	27,2	60,5	12,3	0,17 ÷ 0,48
Typowy przedział	1,8 ÷ 29,7	61,6 ÷ 91,5	3,9 ÷ 9,9	–



Rys. 1. Wyniki badań CPTU i DMT na tle profilu geotechnicznego przykładowego wężla badawczego

i składu granulometrycznego, cechuje się niższą porowatością, większym stopniem wilgotności i wyraźnie niższą zapadowością [4]. Obie strefy różnią się prawdopodobnie wiekiem [4], a także wpływem procesów postgenetycznych, związanych ze zmianami wilgotnościowymi i powolnym osiadaniem struktury pod wpływem ciężaru nadkładu [3]. Dodatkowym elementem wpływającym na zróżnicowanie profilu lessów jest prawdopodobnie obecność silnej cementacji węglanowej w stropowej partii osadów typowej również dla aluwialnych utworów pylastych [17].

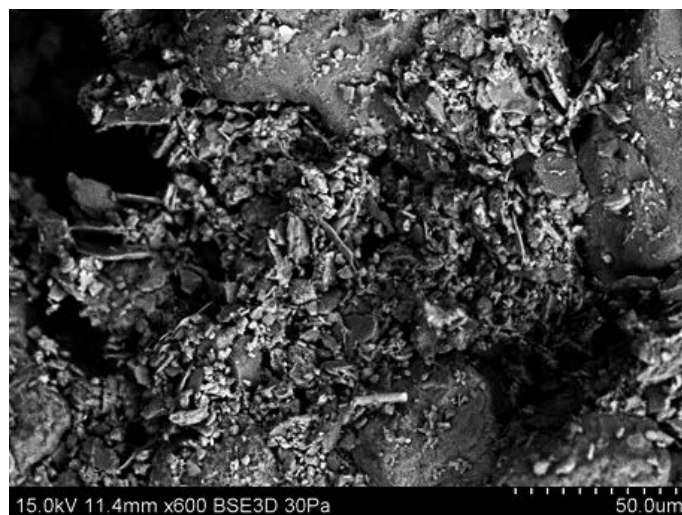
Badania Stefaniak [17] wykazały jednoznacznie, że strefa cementacji charakteryzuje się trzema elementami:

- bardzo dużą niejednorodnością makrostruktury (rys. 2),
- zwiększoną sztywnością w porównaniu ze strefą podłoża poza zasięgiem cementacji,
- efektem quasi-prekonsolidacji.

Występowanie efektu quasi-prekonsolidacji w stropowej partii lessów bardzo dobrze dokumentuje położenie tych gruntów w systemie klasyfikacyjnym CPTU Robertsona (rys. 3). Część lessów, z głębszej części podłoża, reprezentuje osady normalnie konsolidowane, co jest formalnie zgodne z ich genezą. Położenie badanych lessów w systemach klasyfikacyjnych Robertsona [15] i Marchettiego-Crapsa [11] dowodzi o dużej przestrzennej zmienności w uziarnieniu lessów.

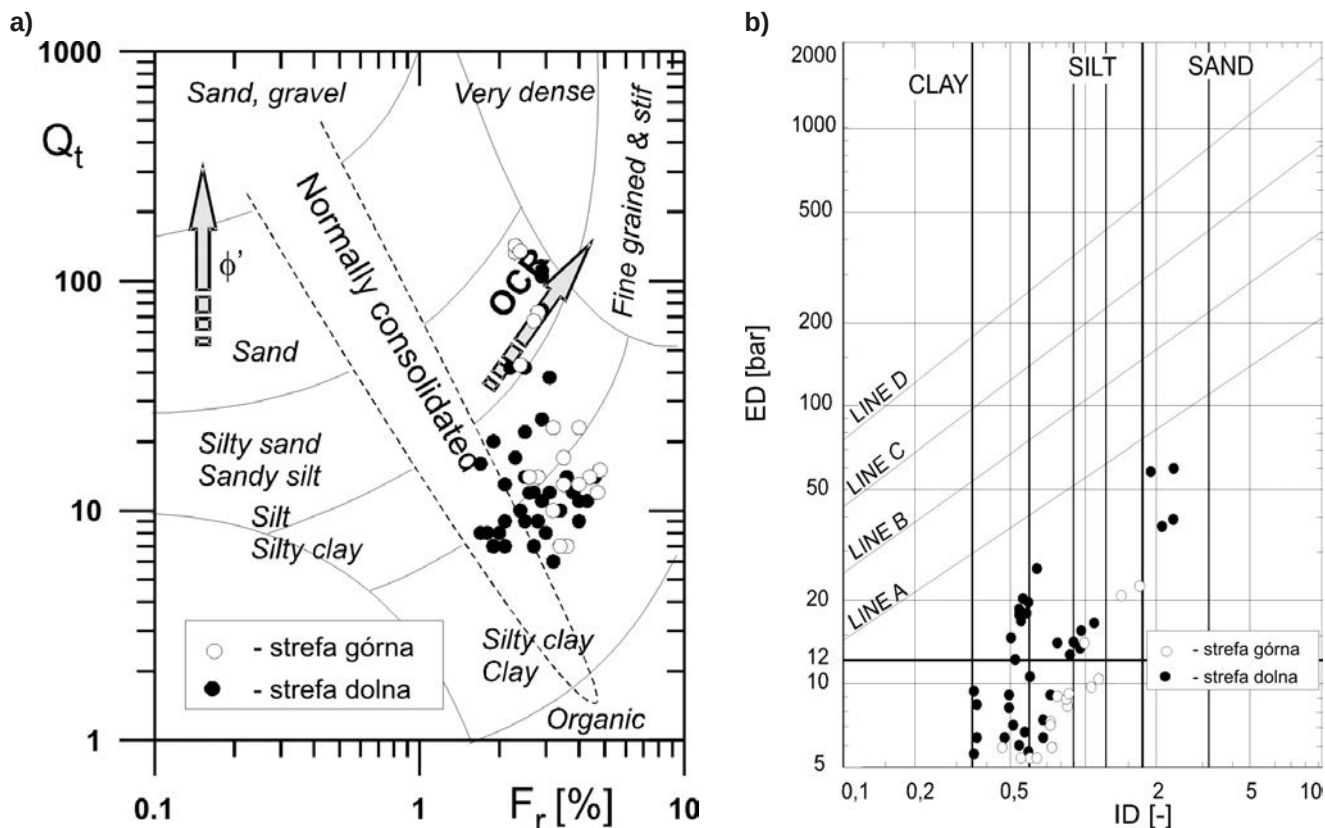
ZAKRES BADAŃ

Badania terenowe przeprowadzono w wężlach, w których wykonano: wiercenie badawcze z poborem prób, sondowanie statyczne (CPTU) oraz badanie dylatometrem sejsmicznym (SDMT). Do sondowań statycznych wykorzystano penetrometr Hyson 200 kN firmy a. p. van den Berg, natomiast do badań



Rys. 2. Występowanie cementacji węglanowej w osadach pylastych [17]

dylatometrycznych oryginalny dylatometr firmy Studio prof. Marchetti. Podczas badań rejestrowano standardowe parametry pozwalające na wyznaczenie podstawowych parametrów badań: p_0 , p_1 , v_s (SDMT) i q_p , f_s , u_2 (CPTU). Parametry te, uzupełnione o dane z profili badawczych, dotyczące litologii, gęstości gruntu, naprężenia geostatycznego i ciśnienia hydrostatycznego, umożliwiły wyznaczenie pochodnych parametrów z obydwu badań: K_D , E_D , I_D (SDMT) i Q_p , F_R , q_{tl} (CPTU). Do wyznaczenia parametrów pochodnych zastosowano standardowe formuły podane, m. in. przez Marchettiego [8], Lunne i innych [7] i Robertsona [16]. Ze względu na skromną literaturę dotyczącą interpretacji badań CPTU i DMT celem uzyskania najkorzystniejszej oceny statystycznej związku pomiędzy parametrami z badań CPTU i DMT a modułem ścisłości M i ścinania G_0 wykorzystano zależności empiryczne sformułowane dla gruntów spoistych. W tym celu skorzystano z następujących zależności:



Rys. 3. Położenie badanych lessów w systemach klasyfikacyjnych CPTU Robertsona [15] (a) oraz DMT Marchettiego-Crapsa [9] (b)

- moduł ścinania:

$$G_0 = \rho v_s^2 \quad (1)$$

- naprężenie prekonsolidacji [18]

$$\sigma_p^{CPTU} = \sigma'_{v0} (5,42 \ln Q_t + 14,97) \quad (\text{dla } I_p = 10) \quad (2)$$

- moduł ściśliwości odpowiadający modułowi edometrycznemu:

$$M_{CPTU} = 8,25(q_t - \sigma'_{v0}) \quad [12] \quad (3)$$

$$M_{DMT} = R_M E_D \quad (4)$$

dla R_M wyznaczony według zależności Marchettiego [8]

gdzie:

ρ – gęstość objętościowa gruntu,

v_s – prędkość fali poprzecznej,

σ'_p – naprężenie prekonsolidacji,

σ'_{v0} – efektywna wartość składowej pionowej naprężenia geostatycznego,

Q_t – znormalizowany opór stożka,

R_m – współczynnik korelacyjny,

E_D – moduł dylatometryczny.

PARAMETRY MECHANICZNE LESSÓW Z BADAŃ SDMT I CPTU

Kluczowym zagadnieniem w wyznaczaniu parametrów mechanicznych lessów za pomocą badań CPTU i DMT jest identyfikacja czynników, które wpływają na mierzone parametry w obydwu badaniach. Do identyfikacji tych czynników można wykorzystać funkcje, którymi opisuje się proces statycznej pe-

netracji i badanie dylatometryczne w gruntach spoistych i organicznych. Postać tych funkcji podał Młynarek [11] oraz Młynarek i inni [12, 14].

W metodzie statycznego sondowania CPTU funkcja ta przedstawia się następująco:

$$F(P_s, V_p, Q_1, Q_2) = 0 \quad (5)$$

gdzie:

P_s – mierzone parametry badania, np.: q_c – opór stożka,

V_p – prędkość penetracji,

Q_1 – parametr charakteryzujący medium gruntowe,

Q_2 – parametr charakteryzujący właściwości stożka.

Proces badania dylatometrycznego opisuje się funkcją:

$$F_2(P_d, V_d, Q_1^d, Q_2^d) = 0 \quad (6)$$

gdzie:

P_d – mierzone parametry procesu, np. ciśnienia p_0, p_1 ,

V_d – prędkość obkurczania membrany dylatometru,

Q_1^d – właściwości membrany.

Parametr Q_2^d jest funkcją wielu zmiennych, a mianowicie:

$$Q_1 = f(X_1, \dots, X_{10}) \quad (7)$$

gdzie:

X_1 – efektywny ciężar objętościowy,

X_2 – wilgotność naturalna lub stopień plastyczności,

X_3 – procentowa zawartość frakcji ilastej, pyłowej i piaskowej,

X_4 – procentowa zawartość CaCO_3 ,

X_5 – procentowa zawartość części organicznych,

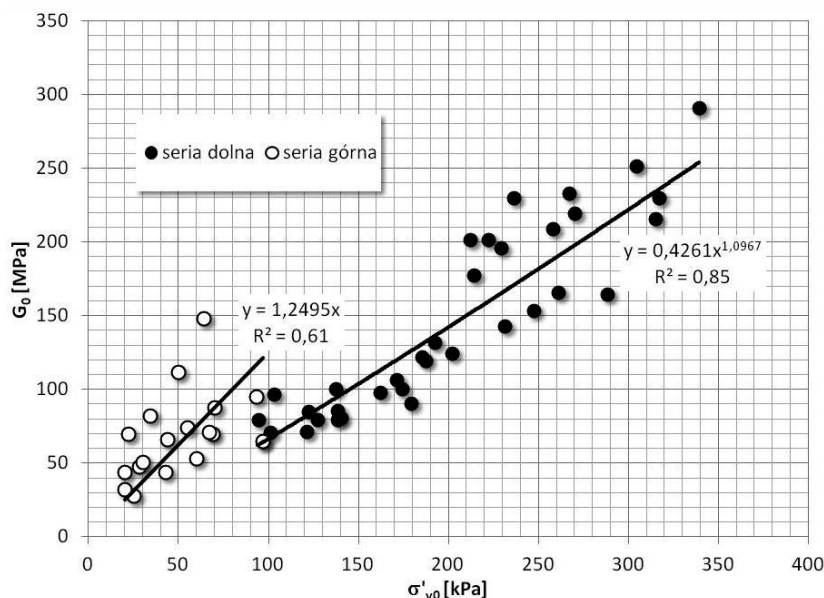
X_6 – parametr opisujący ściśliwość,

X_7 – parametr opisujący wytrzymałość na ścinanie,

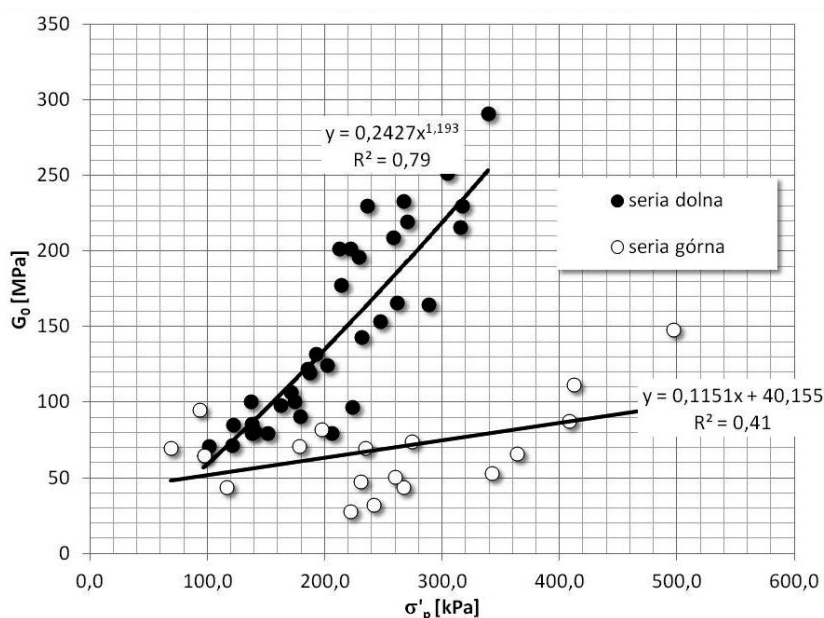
X_8 – parametr określający składową stanu naprężenia geostatycznego np. σ'_{v0} ,

X_9 – parametr określający stopień rozkładu dla podłoża organicznego,

X_{10} – parametr definiujący makrostrukturę gruntu.

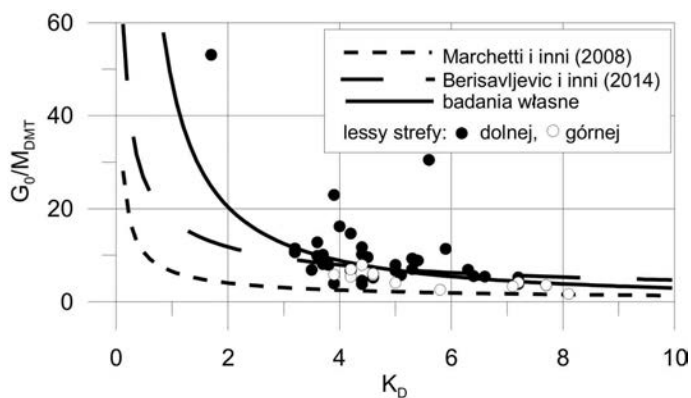


Rys. 4. Zmiana modułu ścinania G_0 ze zmianą σ'_{vo} w strefie górnego i dolnego profilu lessu



Rys. 5. Zależność pomiędzy modułem ścinania G_0 i naprężeniem prekonsolidacyjnym σ'_p w strefie górnej i dolnej profilu lessowego

W przypadku lessów szczególne znaczenie przy wyznaczaniu wpływu czynników na mierzone parametry w badaniach CPTU i DMT ma parametr związany z makrostrukturą i efektem cementacji. Parametr ten jest bezwymiarowy i niemierzalny w przypadku gruntów spoistych z efektem cementacji. Bardzo dobrą identyfikację wpływu tego parametru na charakterystyki z badań CPTU i DMT można uzyskać poprzez ocenę zmienności parametrów mechanicznych w profilu podłoża lessowego. Szczególnie efektywna identyfikacja będzie miała miejsce wtedy, jeśli w profilu pozostałe zmienne, głównie X_3 – proporcje frakcji uziarnienia i X_2 , będą utrzymywały się na zbliżonym poziomie. Tego rodzaju sytuacja występowała na całym badanym obszarze podłoża lessowego. W tabl. 1 podano przedział zmienności parametrów X_2 i X_3 . Nawet niezbyt duża zmienność



Rys. 6. Zależności pomiędzy bezwymiarowym współczynnikiem $G_0 \cdot M_0^{DMT(-1)}$ a współczynnikiem K_D

tych parametrów będzie powodować jednak fluktuację punktów na wykresach, które będą opisywać związki korelacyjne pomiędzy parametrami z badania CPTU i DMT. Szczególnie korzystne jest zatem wykonanie dwóch odmiennych badań do identyfikacji wpływu zmiany struktury na parametry mechaniczne lessów, bowiem badanie CPTU i DMT charakteryzuje odmienna kinematyka badania, różne kierunki prowadzenia pomiaru, różna skala odkształcenia podczas wprowadzania końcówki w podłoże, a także odmiennie warunki badania względem stanu granicznego gruntu [12]. W takim ujęciu przeprowadzono analizę uzyskanych wyników badań.

Moduł ścinania G_0

Lee i Stokes [6] oraz Jamiolkowski i inni [5] usystematyzowali czynniki, które mają wpływ na moduł ścinania G_0 . Czynniki te przedstawiono w oryginalnym zapisie zależności (8).

$$G_0 = f(\sigma'_{v0}, e_0, OCR, S_r, C, K, T) \quad (8)$$

gdzie:

- σ'_{v0} – efektywna wartość składowej pionowej naprężenia geostatycznego,
- e_0 – wskaźnik porowatości naturalnej,
- OCR – wskaźnik prekonsolidacji,
- S_r – stopień wilgotności,
- C – charakterystyki uziarnienia,
- K – struktura gruntu,
- T – temperatura.

Zmiana wartości OCR może być zastąpiona wartością naprężenia prekonsolidacyjnego σ'_p . Różnice w istotności wpływu poszczególnych czynników na moduł G_0 , powodują silną lokalność zależności empirycznych wykorzystywanych do oceny G_0 . Szczególnie może to mieć miejsce w gruntach o wyeksponowanej makrostrukturze, takich jak lessy. W celu zbadania hierarchii wpływu tych zmiennych na moduł G_0 użyto wieloczynnikową analizę korelacji, w której wykorzystano wyniki z badań CPTU i SDMT. Z analizy tej wynika, że statystycznie istotnymi zmiennymi niezależnymi były: σ'_{v0} , σ'_p oraz stopień plastyczności I_L . Mało istotny wpływ pozostałych zmiennych, takich jak uziarnienie i gęstość, był wynikiem wspomnianej małej zmienności w profilu.

Wykazany istotny wpływ zmiennych σ'_{v0} oraz σ'_p na wartości G_0 wskazuje na dwudzielną analizowanego profilu lessów (rys. 4 i 5). Granicę pomiędzy tymi strefami można umieścić na głębokości w przedziale od 4 do 5 m. Zróżnicowanie sztywności tych dwóch stref jest doskonale widoczne w analizie korelacji wartości σ'_p wyznaczonego z badania CPTU i wartości G_0 (rys. 5).

Wpływ efektu quasi-prekonsolidacji na zróżnicowaną sztywność poszczególnych stref podłoża można zbadać również poprzez ocenę związku pomiędzy bezwymiarowym współczynnikiem $G_0 \cdot M_0^{DMT(-1)}$ a współczynnikiem K_D z badania DMT. Wyniki uzyskane dla badanych lessów układają się wzdłuż zależności określonej dla tego rodzaju gruntów przez Berisavljevic i innych [1], jednak nie pozwalają na dokładne rozdzielenie strefy górnej od dolnej w badanym profilu (rys. 6). Fakt ten jest spowodowany dużą niejednorodnością makrostruktury strefy górnej i dużymi niepewnościami pomiarowymi w ocenie modułu M_0^{DMT} . Ten element skomentowano w dalszej części artykułu.

Uzyskane wyniki potwierdzają przyjęte założenie, że w badanych gruntach w przypowierzchniowej strefie profilu podłoża zaznacza się wyraźny wpływ procesów quasi-prekonsolidacji na właściwości lessu oraz jego makrostruktury. Frankowski [3] wyjaśnia, że procesy quasi-prekonsolidacji w dużej mierze są związane z cementacją lessu w tej strefie podłoża. Wniosek taki potwierdza porównanie wartości bezwymiarowego współczynnika G_0 / q_c z wartościami parametru q_{c1} (rys. 7). Uzyskany wyraźny podział rezultatów na dwie grupy jest zbieżny z wynikami uzyskanymi przez Berisavljevic i innych [1] dla lessów w Serbii. Również i w tym przypadku grunty o cechach zapadowych charakteryzują się mniejszą wartością współczynnika G_0 / q_c i większą wartością q_{c1} . Fakt ten potwierdza zróżnicowana makrostruktura strefy górnej i dolnej badanego podłoża lessowego. Obserwowane w przypadku lessów z Serbii i Polski pewne przesunięcie omawianej zależności wskazuje na konieczność uwzględnienia specyficznych, regionalnych właściwości lessów.

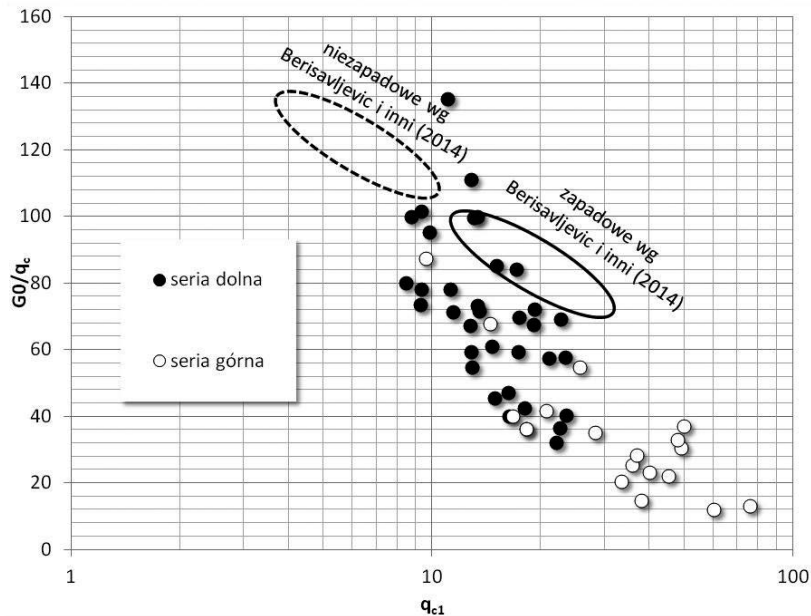
Moduł ściśliwości pierwotnej M

Wyznaczanie modułów ściśliwości, które odpowiadają modułowi edometrycznemu w przypadku badań CPTU i DMT opiera się, jak ogólnie wiadomo, na odmiennych koncepcjach. W badaniu CPTU do wyznaczania modułu M_0 wykorzystuje się zależności empiryczne ze względu na fakt, że pomiar oporu stożka jest rejestrowany w stanie granicznym. Wartości ciśnień p_0 i p_1 w badaniu DMT są rejestrowane przy małych odkształceniach, stąd doświadczenie to pozwala bezpośrednio wyznaczyć moduł ściśliwości. Moduł ściśliwości zależy od kilku zmiennych, stąd podstawą do określenia modułu ściśliwości pierwotnej M z badania DMT jest moduł dylatometryczny E_D i formuły empiryczne podane przez Marchettiego. Jednym z ważnych czynników, które mają wpływ na moduły wyznaczone z badania CPTU i DMT jest makrostruktura gruntu. Ten czynnik silnie wyeksponował się w analizowanych lessach. Na rys. 8 można zauważyć brak korekcji statystycznej pomiędzy modułami z obydwu badań w strefie górnej podłoża lessowego. Na ten fakt miały wpływ następujące czynniki:

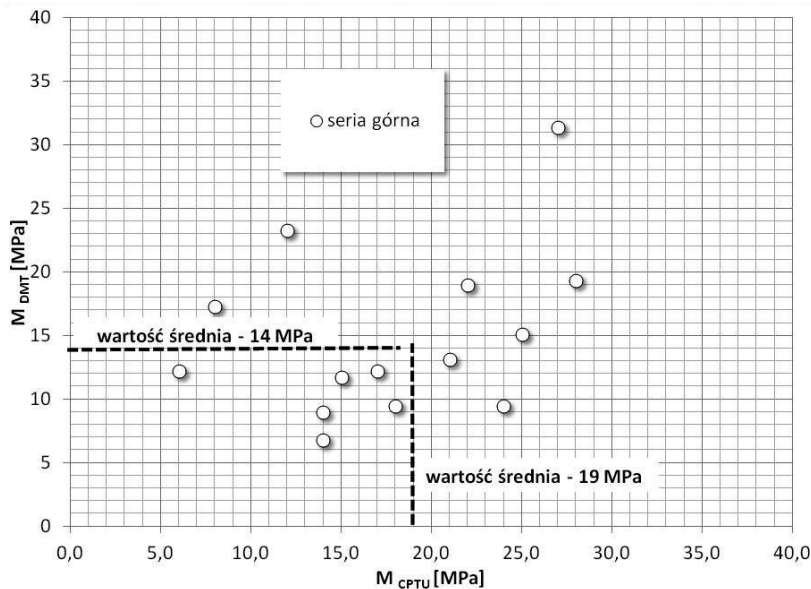
- strefa górna jest silnie niejednorodna ze względu na efekt cementacji; strefy wzmocnienia poprzez cementację są lokalnie zróżnicowane przestrzennie; rezultaty „punktowego” badania DMT są zatem silnie zależne od makrostruktury i sztywności tej strefy;
- fluktuacje punktów na rys. 8 są związane także z lokalnymi zmianami stanu konsystencji i uziarnienia w tej strefie.

Warto zaznaczyć, że identyczny efekt oceny zmienności modułów M^{DMT} i M^{CPTU} uzyskała w strefie cementacji Stefaniak [17] dla pyłów aluwialnych. Sztywność tej strefy może być geotechnicznie zdefiniowana poprzez średnie wartości modułów M . Wartości średnie modułów M_0 z obydwu badań wynoszą odpowiednio $M^{CPTU} = 19$ MPa oraz $M^{DMT} = 14$ MPa.

Zupełnie odmienny opis sztywności podłoża za pomocą badania CPTU i DMT można uzyskać w dolnej strefie podłoża lessowego. Brak efektu cementacji i w miarę jednorodna makrostruktura tej strefy podłoża pozwala dobrze opisać zmianę



Rys. 7. Identyfikacja strefy zapadowej lessów na tle wyników Berisavljevic i innych [1], gdzie: $q_{c1} = (q_c/p_a)(p_a/\sigma'_{v0})^{0.5}$, p_a – ciśnienie atmosferyczne



Rys. 8. Zależność pomiędzy modułami ściśliwości pierwotnej z badań CPTU i DMT w strefie górnej podłoża lessowego

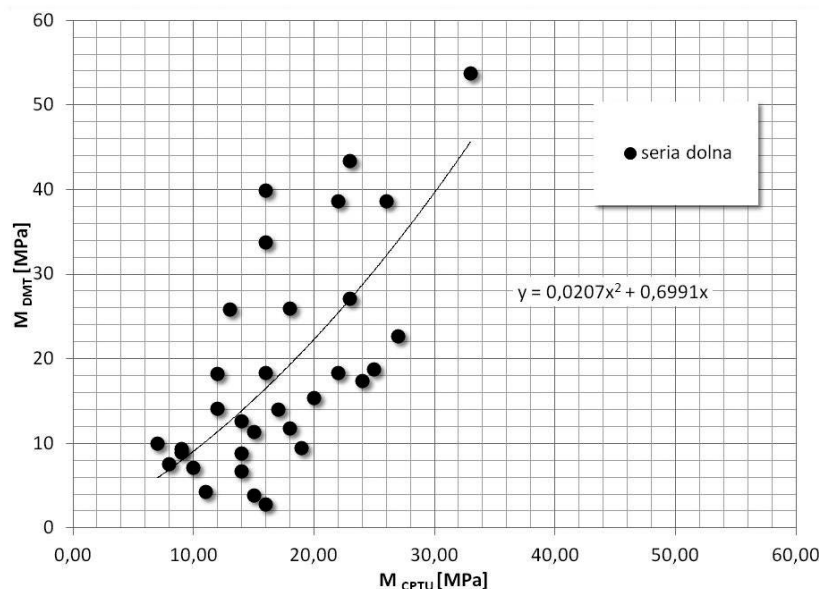
sztywności tej strefy ze zmianą naprężenia geostaticznego σ_{v0} za pomocą modułów M^{DMT} i M^{CPTU} . Jeśli badanie DMT przyjmie się za referencyjne do badania CPTU, to na rys. 9 wskazano, że można przeprowadzić badanie kalibracyjne do obydwu modułów (Młynarek i inni [13]). Fluktuacje punktów są głównie wynikiem zmienności stopnia plastyczności w tej strefie podłoża.

Uzyskany związek korelacyjny pomiędzy modułami z obydwu badań pokazano na rys. 9. Z rysunku tego wynika, że wyniki uzyskane z wzoru Mayne'a, w przypadku podłoża lessowego dolnej strefy, wymagają korekty poprzez zależność (9):

$$M^{DMT} = 0,021M_{CPTU}^2 + 0,7 M_{CPTU} \quad (9)$$

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podłoże gruntowe zbudowane z lessów reprezentuje formalnie jednorodną genetycznie osadę. Liczne procesy geologiczne spowodowały jednak duże zróżnicowanie przestrzenne w makrostrukturze i w konsekwencji właściwościach tych osadów. Dodatkowymi czynnikami, które mają wpływ na zmienność parametrów mechanicznych w podłożu, są czynniki związane z efektem quasy-prekonsolidacji i prawdopodobnie cementacji. Wyjaśnienie występowania tych efektów wymaga z pewnością dalszych badań. Metoda statycznego sondowania i badanie dylatometryczne okazały się bardzo efektywnymi sposobami na



Rys. 9. Zależność pomiędzy modułami ścisłości pierwotnej z badań CPTU i DMT w strefie dolnej podłoża lessowego

zidentyfikowanie stref w podłożu o zasadniczo zróżnicowanych właściwościach. Silnie zróżnicowana makrostruktura w dwóch strefach podłoża spowodowała konieczność zweryfikowania, poprzez kalibrację, standardowych formuł do wyznaczania modułów ścisłości w obydwu strefach.

System klasyfikacyjny Robertsona okazał się również przydatny do wstępnej identyfikacji zróżnicowanego efektu normalnej konsolidacji i quasi-konsolidacji. Efekty te bardzo dobrze potwierdzono badaniem CPTU.

LITERATURA

1. Berisavljevic D., Berisavljevic Z., Čebašek V., Šušić N.: Characterisation of collapsing loess by seismic dilatometer. *Engineering Geology* 181, 2014, 180-189.
2. Bogucki A., Voloshyn P., Tomeniuk O.: Zapadowość plejstocenijskich poziomów lessowo-glebowych i kriogenicznych Wołynia i Podola. *Przegląd Geologiczny* Nr.10/2, t. 62, 2014, 553-559.
3. Frankowski Z.: Effect of lithogenesis on the physico - mechanical properties of loesses determined by field methods. *Proc. III. Inter. Congress IAEG Section II vol.1, Madrid, 1978*, 163-172.
4. Frankowski Z., Majer E., Pietrkowski P.: Geological and geotechnical problem of loess deposits from south-eastern Poland, *Proc. of the International Geotechnical Conference "Geotechnical challenges in megacities", vol. 2, Moscow, 2010*, 546-553.
5. Jamiolkowski M., Lancellotta R., Lo Presti D. C. F.: Remarks on the stiffness at small strain of six Italian clays. *International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials. Hokkaido '94. v.2, 1995*, 817-836.
6. Lee S. H. H., Stoke K. H.: Investigation of low amplitude shear wave velocity in anisotropics materials. *Geotechnical Report No. GR 86-6, Civil Engineering Department, University of Texas, Austin 1986*.
7. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M.: *Cone Penetration Testing in geotechnical practice*. Reprint by E & FN Spon, London 1997.
8. Marchetti S.: *In situ tests by flat dilatometer*. ASCE, JGED, V. 106, No. GT3, 1980, 299-321.
9. Marchetti S., Craps D. K.: *Flat Dilatometer Manual*. Internal Report of G.P.E. Inc, 1981.
10. Mayne P. W.: Integrated ground behavior; in-situ and laboratory test. *Proc. of Conference: Deformation Characteristics of Geomaterials. Lyon 2003, France. Vol. 2. 155-177. Taylor & Francis, London 2005*.
11. Młynarek Z.: Czynniki wpływające na opór stożka podczas statycznego sondowania gruntów spoistych. *Roczniki Akademii Rolniczej*, nr 83, 1978.
12. Młynarek Z.: Site investigation and mapping in urba areas. *Proc. of 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid. Vol. 1. Millpress Rotterdam, 2007*, 175-202.
13. Młynarek Z., Tschuschke W., Wierzbicki J.: Wybrane parametry geotechniczne gruntów strukturalnych na przykładzie lessopodobnych gruntów zastoiskowych Pogórza Rzeszowskiego. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, 2005, Melior. Inż. Środ. 26*, 283-292.
14. Młynarek Z., Wierzbicki J., Long M.: Factors affecting CPTU and DMT characteristics in organic soils. In: *Geotechnical in Maritime Engineering. Proc. of the 11th Baltic Sea Geotechnical Conference*. Ed.: Z. Młynarek, Z. Sikora & E. Dembicki. Vol. 1, 2008, 407-417.
15. Robertson P. K.: Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 1990, 151-158.
16. Robertson P. K.: Interpretation of Cone Penetration Testing – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 49 (11), 2009, 1337-1355.
17. Stefaniak K.: Wybrane osady aluwialne jako podłoże budowlane i materiał do budowli ziemnych. PhD thesis (in Polish). University of Life Science, Poznań, Poland, 2014.
18. Wierzbicki J.: Ocena prekonsolidacji podłoża metodami *in situ* w aspekcie jego genezy. *Rozprawy Naukowe z. 410. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 2010*.

PODZIEKOWANIE: Autorzy artykułu wyrażają podziękowanie firmie HEBO Poznań za wykonanie badań terenowych, a firmie ILF Consulting Engineers Polska za udostępnienie wyników badań.