

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 4 (50), 2010: 14–23
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 4 (50), 2010)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 4 (50), 2010: 14–23
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 4 (50), 2010)

Katarzyna MARKOWSKA-LECH

Katedra Geoinżynierii SGGW w Warszawie
Department of Geotechnical Engineering WULS – SGGW

Wpływ wskaźnika prekonsolidacji na moduł odkształcenia postaciowego w gruntach spoistych

Influence of overconsolidation ratio on shear modulus in cohesive soils

Słowa kluczowe: moduł odkształcenia postaciowego, prędkość fali poprzecznej, wskaźnik prekonsolidacji, grunty spoiste
Key words: shear modulus, shear wave velocity, overconsolidation ratio, cohesive soils

danego przez Hardina i Richarta (1963), pierwotnie odnoszącego się do piasków, a następnie zaadaptowanego dla ilów:

$$G_{0(ij)} = S_{ij} F(e) (OCR)^k p_r^{(1-ni-nj)} (\sigma_i)^{ni} (\sigma_j)^{nj} \quad (1)$$

Wprowadzenie

Moduł odkształcenia postaciowego (G_0) w gruncie zależy od wielu czynników, takich jak: średnie naprężenie efektywne, wskaźnik porowatości, naprężenie styczne, stopień wilgotności, historia naprężenia, struktura gruntu (kształt i wielkość ziaren, skład mineralny), amplituda odkształcenia, częstotliwość drgań, pełzanie szkieletu, temperatura (Hardin i Black 1968). Czynniki te nie wpływają jednakowo na wartość modułu odkształcenia postaciowego uzyskiwanego w badaniach. W świecie naukowym istnieją dwa kierunki badań tego modułu, wywodzące się od równania po-

gdzie:

S_{ij} – bezwymiarowa stała charakteryzująca strukturę gruntu,
 $F(e)$ – funkcja wskaźnika porowatości,
 OCR – współczynnik prekonsolidacji,
 k – funkcja zależna od wskaźnika plastyczności dla gruntów spoistych; $k = 0$ dla $I_p < 40$, $k = 1$ dla $I_p > 40$,
 p_r – naprężenie referencyjne, $p_r = 1$ kPa,
 ni , nj – wykładniki empiryczne.

Pierwszy z nich wyznaczony przez Jamiolkowskiego i innych (1994), który zakładając przybliżoną równość wykładników empirycznych, wykazał, że $k = 0$, a tym samym brak wpływu współczynnika prekonsolidacji na moduł odkształ-

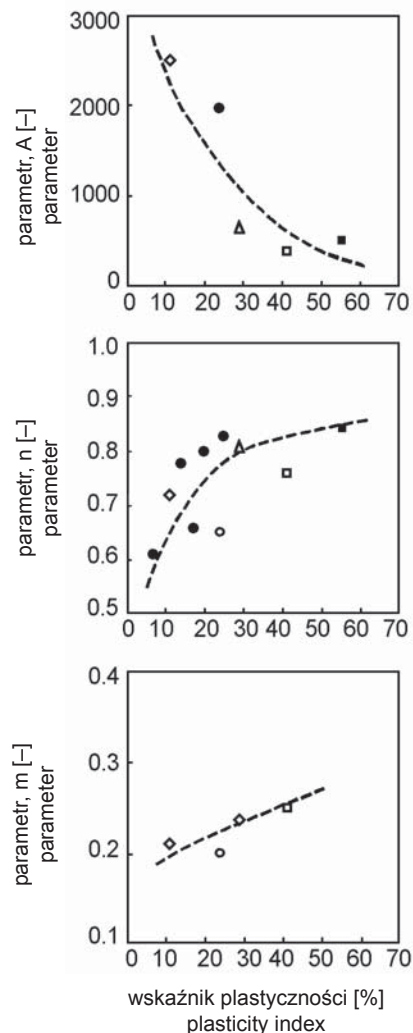
cenia postaciowego, został przybliżony w pracy Markowskiej-Lech (2006b). Druga ścieżka prowadzi w kierunku połączenia równania Hardina i Blanforda (1989) z teorią stanu krytycznego gruntu i uzależnienia modułu sprężystości poprzecznej od średniego naprężenia efektywnego, historii naprężenia oraz stanu gruntu z pominięciem wskaźnika porowatości (Viggiani 1992, Viggiani i Atkinson 1995, Rampello i in. 1997). Podobnie Jovičić i inni (1998) użyli zależności:

$$\frac{G_0}{p_r} = A \left(\frac{p'}{p_r} \right)^n OCR^m \quad (2)$$

gdzie:

p' – średnie naprężenie efektywne [kPa],
 A , n , m – funkcje zależne od wskaźnika plastyczności (I_p).

Badania przeprowadzone w aparacie trójosiowego ściskania z użyciem piezoelementów typu bender (ciśnienie efektywne nie przekraczało 700 MPa) na piaskach, pyłe i iłach pozwoliły na oszacowanie parametrów równania (rys. 1). Wartość parametru A była największa w piaskach i wynosiła 4000, dla pyłu – 2500, natomiast w iłach wahała się od 400 do 2000, zwiększając się wraz ze zwiększaniem plastyczności i rozmiarem ziaren. Parametr n , związany ze średnim naprężeniem efektywnym, najmniejszy był w piaskach – 0,59, w pyłe wynosił 0,72, a w iłach – od 0,65 do 0,84. Wartość parametru n malała wraz ze zmniejszaniem się plastyczności dla gruntów o małych cząstkach i rozmiarem ziaren dla gruntów piaszczystych. Wskaźnik prekonsolidacji największe znaczenie miał w naturalnych piaskach, gdzie parametr m wynosił 0,61, najmniej-



RYSUNEK 1. Parametry materiałowe równania (2) – Viggiani i Atkinson (1995), Atkinson (2000)

FIGURE 1. Material parameters for relationship (2) – Viggiani i Atkinson (1995), Atkinson (2000)

sze w piaskach rekonstruowanych – $m = 0,04$, natomiast dla pyłu $m = 0,21$, a dla iłów $m = 0,19-0,24$.

Rampello i inni (1994) zasugerowali, że dla glin konsolidowanych izotropowo, przy uwzględnieniu zależno-

ści między naprężeniem i wskaźnikiem porowatości, jedna z trzech zmiennych w równaniu (1), tj. p' , e lub OCR , może ulec redukcji. Jeżeli jako zmienne niezależne zostaną wybrane średnie naprężenie efektywne i wskaźnik prekonsolidacji, to moduł sprężystości poprzecznej może być wyrażony przez:

$$G_0 = S^* OCR^m p_a^{(1-n^*)} p'^{n^*} \quad (3)$$

gdzie symbole S^* , n^* i m mają takie samo znaczenie jak S , n , i k w równaniu (1), jednak różnią się od nich wartością. Należy zwrócić uwagę, że wartości stałych S i S^* zależą od przyjętego ciśnienia referencyjnego. Rampello i inni (1994) zaproponowali przyjmowanie ciśnienia $p_a = p_r = 1$ kPa zamiast wcześniej używanego ciśnienia atmosferycznego.

W niniejszej pracy przedstawione zostaną próby oszacowania wpływu wskaźnika prekonsolidacji na moduł odkształcenia postaciowego, zgodnie z sugestią, że dla gruntów konsolidowanych izotropowo zmiennymi niezależnymi mogą być jedynie średnie naprężenie efektywne i wskaźnik prekonsolidacji, natomiast wskaźnik porowatości może zostać zredukowany.

Metodyka przeprowadzonych badań

Badania zaprezentowane w artykule wykonano w aparacie trójosiowego ściskania na próbkach o nienaruszonej strukturze NNS. Badania przeprowadzono na prekonsolidowanych gruntach spoistych zalegających na terenie projektowanej drugiej linii metra w Warszawie. Właściwości fizyczne badanych gruntów przedstawiono w tabeli 1.

Badanie obejmowało trzy podstawowe etapy: nasączenie, konsolidację i ścinanie próbki. Konsolidacja prowadzona była etapowo w warunkach izotropowych. Na każdym etapie badania kontrolowano zmianę wysokości próbki oraz wykonywano pomiary prędkości fali poprzecznej (V_s) rozchodzącej się w próbce gruntu za pomocą przetworników typu bender (Tymiński i Markowska-Lech 2005, Markowska-Lech 2006a, b), a następnie obliczano moduł odkształcenia postaciowego (G_0), zgodnie ze wzorem:

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (4)$$

gdzie:

ρ – gęstość objętościowa gruntu,

V_s – prędkość fali poprzecznej.

TABELA 1. Właściwości fizyczne badanych gruntów

TABLE 1. Index properties of tested soil samples

Próbka Sample	Głębokość [m] Depth	I_p [%]	w_l [%]	w_n [%]	w_p [%]	I_L [%]	ρ_d [t·m ⁻³]	ρ [t·m ⁻³]
S1	22,0–22,5	32,2	56,0	22,5	23,8	–0,04	1,61	1,97
S2	22,5–22,8	26,6	45,7	21,4	19,1	0,09	1,64	1,99
S4	16,0–16,5	36,0	67,0	23,9	31,0	–0,20	1,56	1,93
S5	19,5–19,8	42,0	65,0	22,8	23,0	–0,01	1,62	1,98
S6	17,0–17,4	60,6	88,1	25,9	27,5	–0,03	1,58	1,98

Na podstawie dostępnych wyników badań przeprowadzonych przez Katedrę Geoinżynierii SGGW *in situ* sondami CPT i DMT, dla badanych gruntów obliczono parametry charakteryzujące historię naprężenia. Obliczenia prowadzone były z wykorzystaniem zależności empirycznych proponowanych dla gruntów spoistych przez różnych autorów. W przypadku sondy CPT określono:

- naprężenie prekonsolidacji (σ'_p) ze wzoru (Mayne i Holtz 1988)

$$\sigma'_p = 0,33(q_c - \sigma'_{vo}) \quad (5)$$

- współczynnik parcia spoczynkowego (K_o) ze wzoru (Mayne i Kulhawy 1990)

$$K_o = 0,47OCR^{0,53} \quad (6)$$

- współczynnik prekonsolidacji (OCR) ze wzoru (Borowczyk i Szymański 1995)

$$OCR = \frac{k(q_c - \sigma'_{vo})}{\sigma'_{vo}} \quad (7)$$

Nieco inne wartości uzyskano z badań sondą DMT z zależności proponowanych przez Marchettiego (1980):

- współczynnik parcia spoczynkowego (K_o)

$$K_o = \left(\frac{K_D}{1,5}\right)^{0,47} - 0,6 \quad (8)$$

- współczynnik prekonsolidacji (OCR)

$$OCR = (0,5K_D)^{1,56} \quad (9)$$

Obliczone wartości zestawiono w tabeli 2.

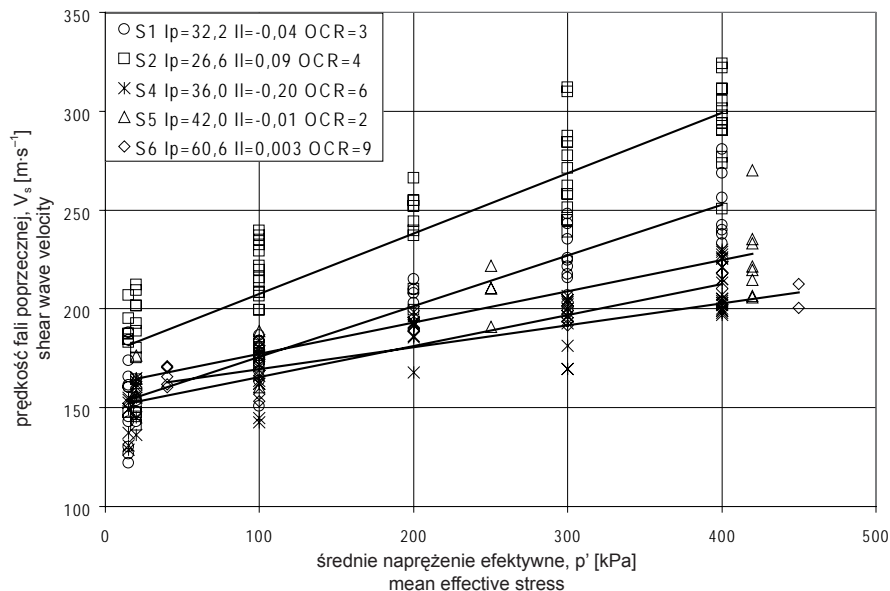
Obliczone dane wykorzystano do oszacowania modułu odkształcenia postaciowego ze wzoru (2), w którym parametry równania: A , n , m , zależne od wskaźnika plastyczności (I_p), przyjęto zgodnie z wynikami badań przeprowadzonych na gruntach spoistych (rys. 1) zaprezentowanych przez Atkinsona (2000).

Wyniki badań

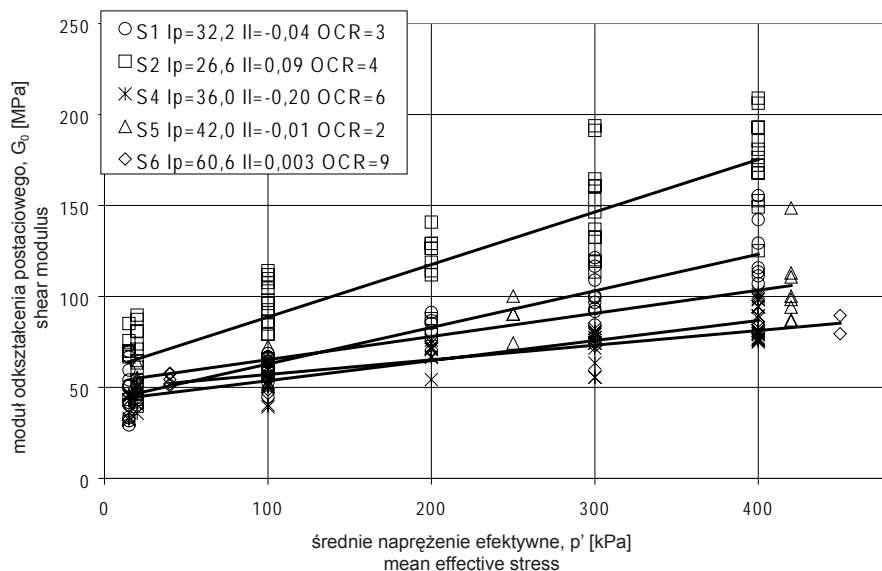
Wyniki uzyskane w badaniach trójosiowego ściskania z wykorzystaniem piezoelementów przedstawione zostały na rysunkach 2 i 3. Wyraźnie widoczne są zależności między średnim naprężeniem efektywnym i prędkością fali poprzecznej a tym samym modułem od-

TABELA 2. Parametry charakteryzujące historię naprężenia badanych gruntów
TABLE 2. Stress history parameters for tested soil

Próbka Sample	Głębokość [m] Depth	I_p [%]	CPT			DMT	
			σ'_p [MPa]	K_o [-]	OCR [-]	K_o [-]	OCR [-]
S1	22,0–22,5	32,2	0,8	0,8	3	0,79	2
S2	22,5–22,8	26,6	1,2	0,9	4	0,82	3
S4	16,0–16,5	36,0	1,5	1,3	6	1,16	4
S5	19,5–19,8	42,0	0,5	0,6	2	–	–
S6	17,0–17,4	60,6	2,2	1,5	9	0,79	2



RYSUNEK 2. Zależność prędkości fali poprzecznej od średniego napężenia efektywnego w badanych gruntach
 FIGURE 2. Shear wave velocity vs. mean effective stress



RYSUNEK 3. Zależność modułu odkształcenia postaciowego od średniego napężenia efektywnego w badanych gruntach
 FIGURE 3. Shear modulus vs. mean effective stress

kształcenia postaciowego. Dla badanych gruntów zależności te mają charakter funkcji liniowych. Wzrost naprężenia podczas kolejnych etapów konsolidacji powoduje zmniejszenie wskaźnika porowatości, natomiast zmniejszanie się wskaźnika porowatości powoduje wzrost prędkości fali poprzecznej. Przyrost wartości prędkości fali poprzecznej jest największy dla próbki S6 o największym wskaźniku plastyczności, wynoszącym 60,6%, natomiast najmniejszy dla próbki o S2 o wskaźniku plastyczności wynoszącym 26,6%. Na wykresie przedstawiającym zależność między prędkością fali poprzecznej i średnim naprężeniem efektywnym o sile wpływu naprężenia mówi kąt pochylenia linii wyrównujących punkty otrzymane z badań.

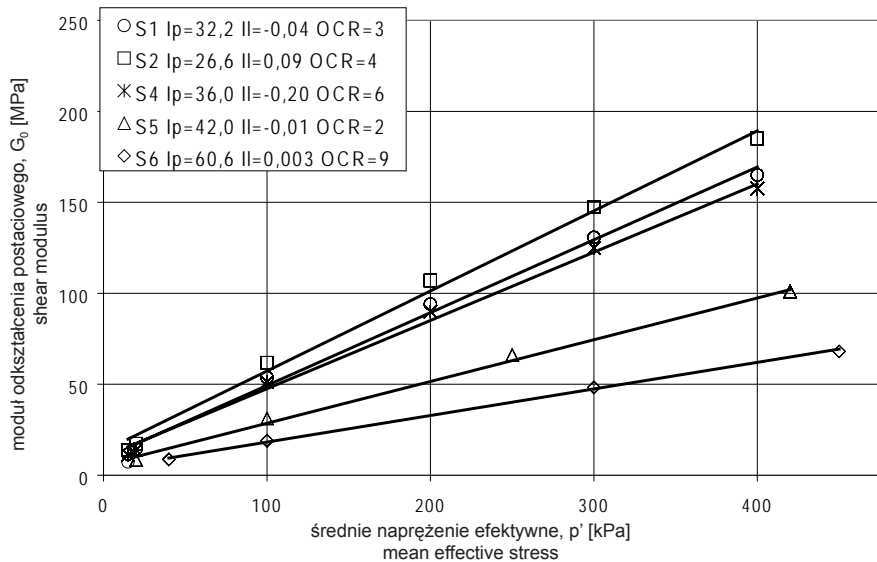
Najbardziej płaskie linie odpowiadają mniejszemu wpływowi zmiany naprężenia na prędkość fali poprzecznej (próbki S4, S5 i S6), natomiast linie bardziej pochylone świadczą o większej wrażliwości gruntu na zmianę warunków badania (próbki S1 i S2). Największe wartości prędkości fali poprzecznej i modułu odkształcenia postaciowego przy takiej samej wartości średniego naprężenia efektywnego zanotowano dla próbek S1 i S2.

W dalszej części pracy przedstawiono wyniki obliczeń modułu odkształcenia postaciowego ze wzoru (2). Zgodnie z rysunkiem 1, w zależności od wskaźnika plastyczności próbki przyjęto odpowiednie wartości parametrów równania dla każdej z badanych próbek. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono obliczone wartości modułu odkształcenia postaciowego przy zastosowaniu danych z sondowań odpowiednio CPT i DMT.

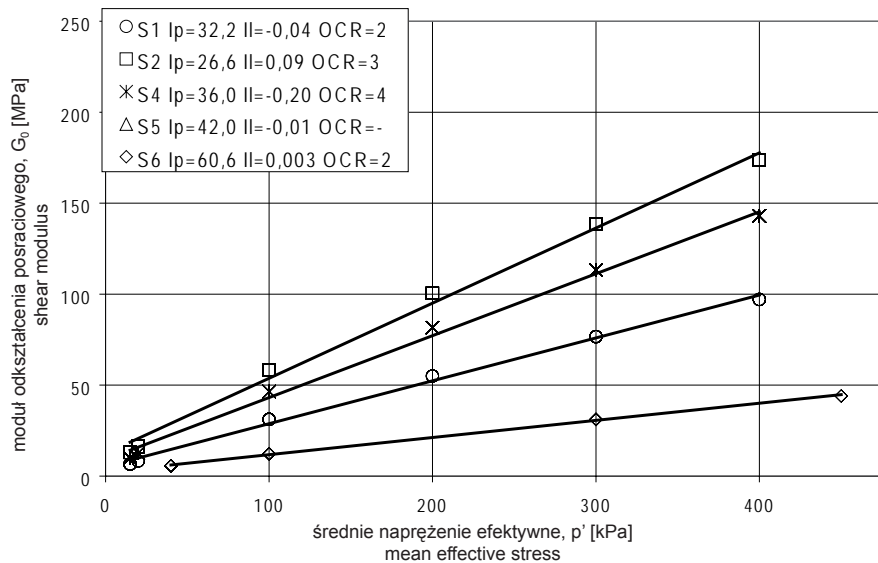
Wartości uzyskane z obliczeń są nieco większe w przypadku zastosowania wskaźnika prekonsolidacji uzyskanego z badań CPT. Poprowadzone linie, wyrównujące wyniki obliczeń, dla wskaźników prekonsolidacji uzyskanych z obu badań terenowych są bardziej strome niż odpowiednie linie obrazujące trendy dla wartości modułów odkształcenia postaciowego uzyskanych w badaniach laboratoryjnych dla poszczególnych próbek. Przy takim samym wzroście naprężenia efektywnego uzyska się więc większy wzrost wartości modułu odkształcenia postaciowego, obliczając go z zastosowaniem powyższego wzoru, niż wynika to z badań. Największe wartości modułu odkształcenia postaciowego przy takiej samej wartości średniego naprężenia efektywnego w przypadku OCR uzyskanego z badań CPT zanotowano dla próbek S1 i S2, w przypadku badań DMT – dla próbek S2 i S4. Najmniejsze wartości, mimo znacznej różnicy liczbowej samego wskaźnika prekonsolidacji, uzyskano dla próbki S6 w obu przypadkach pozyskiwania OCR.

Aby zobrazować wpływ wskaźnika prekonsolidacji na moduł odkształcenia postaciowego, obliczone wartości zostały znormalizowane względem części zależności (2) w postaci członu OCR^m , a wyniki zaprezentowano na rysunkach 6 i 7. Po zredukowaniu modułu odkształcenia postaciowego uzyskano większy rozrzut wyników obliczeń na wykresach. Zaobserwowano mniejsze nachylenia linii trendów opartych na tych wynikach.

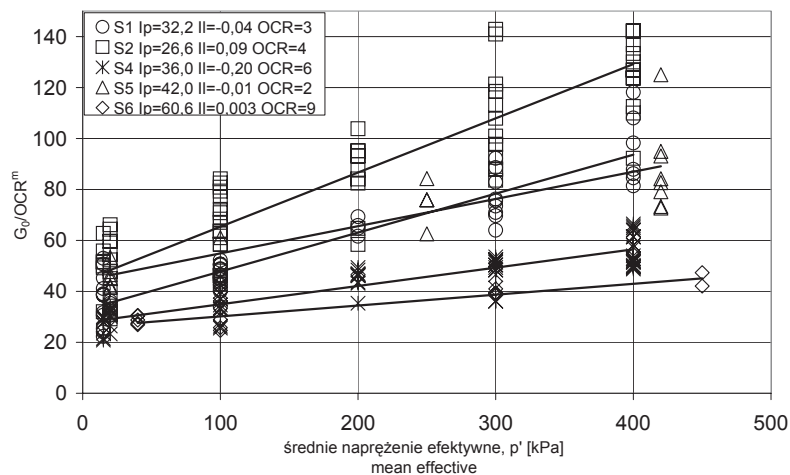
Trudno zauważyć zdecydowany wpływ wskaźnika prekonsolidacji na wartość obliczonego modułu odkształcenia, który mógłby być widoczny na rysunkach w postaci ułożenia wyników



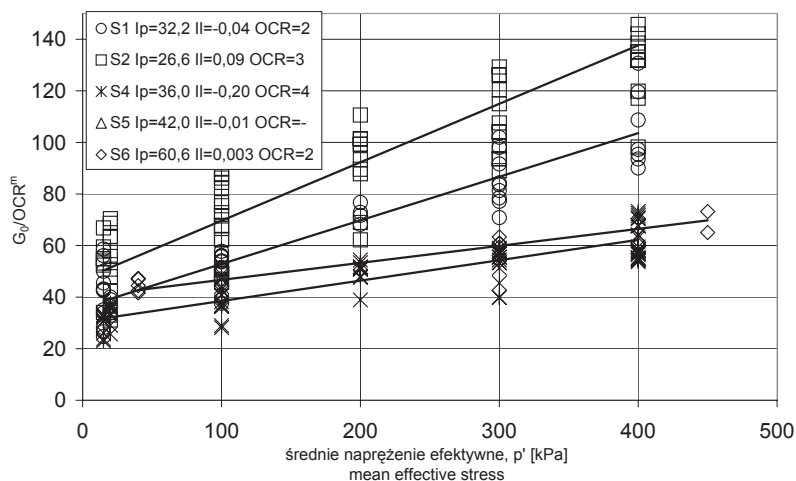
RYSUNEK 4. Moduł odkształcenia postaciowego obliczony ze wzoru (2) – OCR uzyskane z badań sondą CPT
 FIGURE 4. Shear modulus from relationship (2) – OCR from CPT test



RYSUNEK 5. Moduł odkształcenia postaciowego obliczony ze wzoru (2) – OCR uzyskane z badań sondą DMT
 FIGURE 5. Shear modulus from relationship (2) – OCR from DMT test



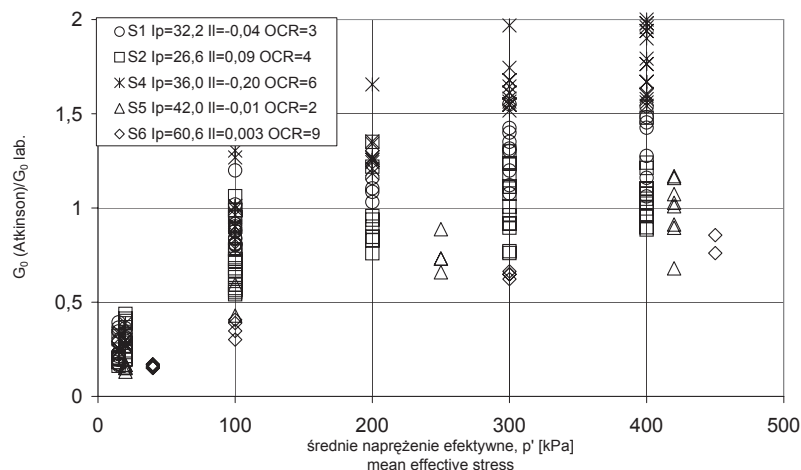
RYSUNEK 6. Zredukowany moduł odkształcenia postaciowego – OCR uzyskane z badań sondą CPT
 FIGURE 6. Reduced shear modulus – OCR from CPT test



RYSUNEK 7. Zredukowany moduł odkształcenia postaciowego – OCR uzyskane z badań sondą DMT
 FIGURE 7. Reduced shear modulus – OCR from DMT test

w kolejności zgodnej z wielkością OCR uzyskanego w badaniach. Może to oznaczać bardzo mały wpływ wskaźnika prekonsolidacji na moduł odkształcenia postaciowego, co w świetle zależności między naprężeniem, wskaźnikiem porowatości i prędkością fali poprzecznej

oraz literatury wydaje się mało prawdopodobnie. Jest to raczej wynik stosowania w obliczeniach parametrów charakteryzujących historię naprężenia w gruntach empirycznych zależności, które mają charakter regionalny.



RYSUNEK 8. Porównanie modułu odkształcenia postaciowego obliczonego ze wzoru (2) i uzyskanego z badań laboratoryjnych
 FIGURE 8. Shear modulus calculated vs. shear modulus from laboratory tests

Na rysunku 8 zestawiono wyniki badań laboratoryjnych z obliczeniami modułu odkształcenia postaciowego według wzoru (2). Widoczne są duże różnice wartości i znaczne rozproszenie wyników. Największe różnice między wartościami modułu odkształcenia postaciowego obliczonego i otrzymanego z badań laboratoryjnych uzyskano dla małych wartości średniego naprężenia efektywnego, przy czym wartości uzyskane w badaniach laboratoryjnych były większe przy małych naprężeniach efektywnych, natomiast przy dużych naprężeniach większe moduły uzyskano z obliczeń. Ze względu na zastosowanie parametrów zależności (2) z literatury, które zostały wyznaczone dla konkretnych gruntów, otrzymane wyniki powinny zostać zestawione z obliczeniami, uwzględniającymi parametry gruntów badanych w laboratorium. Dalsze badania powinny zmierzać w kierunku okre-

ślenia charakterystycznych parametrów n , m i A dla badanych gruntów na większej liczbie danych niż przedstawione w niniejszej pracy.

Wnioski

Z przeprowadzonych badań na naturalnych gruntach spoistych wynika, że na prędkość fali poprzecznej (i moduł odkształcenia postaciowego) w gruntach spoistych największy wpływ ma naprężenie efektywne, a zależność ta ma w badanych gruntach spoistych charakter liniowy. Przedstawione wyniki badań nie są wystarczające do oceny wpływu historii naprężenia na moduł odkształcenia postaciowego, a wpływ wskaźnika prekonsolidacji na moduł ten nie został jednoznacznie wyjaśniony i wymaga kontynuacji badań zarówno w laboratorium, jak i w terenie.

Literatura

- ATKINSON J.H. 2000: Non-linear soil stiffness in routine design. *Geotechnique* 5: 487–508.
- BOROWCZYK M., SZYMAŃSKI A. 1995: The use of in situ tests for determination of stress history. Proc. 11th European Conf. of Soil Mechanics and Found. Engineering, Copenhagen: 117–123.
- HARDIN B.O., BLACK W.L. 1968: Vibration modulus of normally consolidated clay. *Journal of SMF, Div. ASCE* 95, SM6: 1531–1537.
- HARDIN B.O., BLANFORD G.E. 1989: Elasticity of particulate materials. *ASCE Journal Geotechnical Engineering Div.* 115 (6): 788–805.
- HARDIN B.O., RICHART F.E. Jr., 1963: Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Divisions* 89: 33–65.
- JAMIOLKOWSKI M., LANCELOTTA R., LO PRESTI D.C.F. 1994: Remarks on the stiffness at small strains of six Italian clays. *Prefailure Deformation of Geomaterials, Balkema* 2: 817–836.
- JOVIČIĆ V., COOP M.R., ATKINSON J.H. 1998: Laboratory measurements of small strain stiffness of a soft rock. Proceedings 14th International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Balkema, Hamburg: 323–326.
- MARCHETTI S. 1980: In situ tests by flat dilatometer. *J. Geotech. Eng. Div., ASCE* 106, GT3: 299–321.
- MARKOWSKA-LECH K. 2006a: Estimation of deformation parameters in cohesive soils using seismic tests. PhD thesis. Department of Geological Engineering, Warsaw University of Life Sciences – SGGW (in polish).
- MARKOWSKA-LECH K. 2006b: Analiza czynników wpływających na prędkość fali poprzecznej w gruntach spoistych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo* 29: 161–172.
- MAYNE P.W., HOLTZ R.D. 1988: Profiling Stress History From Piezocone Soundings. *Soils and Foundations* 28, 1: 16–28.
- MAYNE P.W., KULHAWY F.H. 1990: Direct and Indirect Measurements of In-Situ K_0 in Clays. Transportation Research Record 1278, Washington, D.C.: 141–149.
- RAMPELLO S., VIGGIANI G., SILVESTRI F. 1994: The dependence of small strain stiffness on stress state and history for fine grained soils. The example of Vallericca clay. In: Pre-failure Deformation of Geomaterials. Eds. Shibuya, Mitachi & Miura. Balkema, Rotterdam: 273–278.
- RAMPELLO S., VIGGIANI G.M.B., AMOROSI A. 1997: Small-strain stiffness of reconstituted clay compressed along constant triaxial effective ratio paths. *Géotechnique* 47 (3): 475–489.
- TYMIŃSKI W., MARKOWSKA-LECH K. 2005: Kryteria pomiaru prędkości fali poprzecznej w gruntach spoistych. 51 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Gdańsk – Krynica: 65–72.
- VIGGIANI G. 1992: Small strain stiffness of fine grained soils. PhD Thesis. City University, London.
- VIGGIANI G., ATKINSON J.H. 1995: Stiffness of fine grained soil at very small strains. *Géotechnique* 45 (2): 249–265.

Summary

Influence of overconsolidation ratio on shear modulus in cohesive soils. The determination of initial shear modulus in soils from shear wave velocity measurements needs the application of bender elements in laboratory investigations. Both shear wave velocity and initial shear modulus depends on many factors, especially mean effective stress, void ratio and stress history. Results of laboratory test performed on cohesive soils samples are presented in this paper.

Autor's address:

Katarzyna Markowska-Lech
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Geoinżynierii
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa
Poland
e-mail: katarzyna_markowska_lech@sggw.pl