

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA OCENĘ WSKAŹNIKA SZTYWNOŚCI (I_R) Z BADAŃ *IN SITU*

Zbigniew Młynarek¹, Jędrzej Wierzbicki²✉, Katarzyna Stefaniak²

¹ Wydział Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Poznań

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

STRESZCZENIE

W artykule podjęto próbę ustalenia istotności wpływu następujących zmiennych na wskaźnik sztywności gruntu: stopnia plastyczności, wskaźnika plastyczności, współczynnika prekonsolidacji i pionowej składowej efektywnego naprężenia geostaticznego (σ'_{v0}). Wyznaczono funkcje cząstkowe, które pozwalają prognozować wartości początkowego modułu ścinania (G_0) na podstawie oporu stożka dla poszczególnych grup gruntów o zróżnicowanych wartościach współczynnika *OCR*. Zbadano także istotność wpływu analizowanych zmiennych na zmienność wskaźnika sztywności (I_R). Do analizy wykorzystano wyniki ponad 100 sondowań statycznych SCPTU i badań SDMT. Badania przeprowadzono w kilku miejscowościach na obszarze Polski, gdzie podłoże jest zbudowane z gruntów o różnym pochodzeniu geologicznym.

Słowa kluczowe: SDMT, SCPTU, początkowy moduł ścinania (G_0)

WSTĘP

Wskaźnik sztywności (ang. *rigidity index*) jest chętnie wykorzystywanym współczynnikiem do oceny sztywności podłoża. Znane są także koncepcje wykorzystania wskaźnika sztywności do prognozy zmian wytrzymałości na ścinanie bez odpływu gruntów w podłożu lub początkowego modułu ścinania, jeśli nie jest wykonane badanie typu SDMT lub SCPTU. Stosunkowo mało jest jednak rozpoznany zakres zmienności tego wskaźnika oraz jakościowy wpływ czynników, które o tej zmienności decydują. Podstawę do takiej analizy mogą stanowić prace, które dokumentują wpływ czynników na składowe elementy wskaźnika sztywności, tj. wartość początkowego modułu ścinania (G_0) i wytrzymałości na ścinanie bez odpływu gruntu (s_u). Do wyznaczenia obydwu parametrów, które definiują wskaźnik sztywności, za bardzo korzystne metody uważa się badania *in situ*, w tym metodę statycznego

sondowania CPTU i badanie dylatometrem sejsmicznym SDMT. Metody te pozwalają bowiem wyznaczyć ciągły obraz zmian wskaźnika sztywności, zgodny ze zmieniającymi się parametrami gruntów, które występują w podłożu. Bardzo dobrym materiałem dla przeprowadzenia tego typu analizy są grunty, które występują na obszarze Polski. Osady te charakteryzują się dużą zmiennością w uziarnieniu i silnie zróżnicowanymi efektami prekonsolidacji. Badaniami objęto gliny morenowe, ropy „plioceńskie”, pyły zastoiskowe oraz lessy. Do jakościowej analizy czynników wpływających na wskaźnik sztywności tych osadów wykorzystano wielozmienną analizę wariancji.

CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA MIEJSC BADAŃ

Badania przeprowadzono w 10 lokalizacjach, znajdujących się na terenie północnej, zachodniej i po-

✉jwi@amu.edu.pl

łudniowej Polski. W każdej z lokalizacji wykonano badania CPTU, badania sejsmiczne typu *downhole* (SCPTU lub SDMT) oraz wiercenia, które posłużyły poborowi próbek w celu ustalenia podstawowych właściwości gruntów w profilu. W efekcie uzyskano zbiór danych charakteryzujących 230 warstw geotechnicznych. Najstarszymi badanymi osadami były prekonsolidowane ropy „plioceńskie”, występujące w rejonie Bydgoszczy i Warszawy (Barański, Godlewski, Szczepański, 2010; Kumor, 2016). Do grupy osadów prekonsolidowanych można także zaliczyć gliny lodowcowe zlodowacenia Warty, występujące w rejonie miejscowości Derkacze. Z kolei utwory lodowcowe najmłodszego ze zlodowaceń na terenie Polski – Wisły, w zależności od fazy zlodowacenia, reprezentowane są zarówno przez młode grunty prekonsolidowane (faza poznańska: Jarocin, Marszew), jak i normalnie konsolidowane (faza pomorska: Batkowo, Rzepin, Boryszewo). Wśród gruntów tych dominują gliny piaszczyste oraz, szczególnie wśród gruntów normalnie konsolidowanych, gliny piaszczyste i piaski gliniaste. Kolejną analizowaną grupą gruntów są eoliczne osady lessowe występujące w rejonie Łañcuta. Utwory te reprezentowane są głównie przez pyły i pyły piaszczyste normalnie konsolidowane. Jednak, jak zaobserwowali Frankowski, Majer i Pietrzykowski (2010) oraz Młynarek, Wierzbicki i Mańka (2015), w strefie przypowierzchniowej w osadach tych obecna jest silna cementacja węglanowa, która daje efekt quasi-prekonsolidacji. Odrębną grupę stanowią grunty spoiste i organiczne, zdeponowane w warunkach zastoisk proglacialnych funkcjonujących w północnej Polsce we wczesnym holocenie. Grunty te cechują się dużą porowatością oraz nieraz znaczną zawartością części organicznych. Ze względu na rodzaj gruntu dominują wśród nich gliny pylaste oraz grunty nisko organiczne i organiczne.

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA ZMIENNOŚĆ WSKAŹNIKA SZTYWNOŚCI (I_R)

Metodyka wyznaczenia parametrów do obliczenia wskaźnika sztywności

Wskaźnik sztywności zdefiniowany jest formułą (Vesic 1972; Lunne, Robertson i Powell, 1997):

$$I_R = \frac{G}{s_u} \quad (1)$$

gdzie:

G – moduł ścinania przy ustalonym odkształceniu;

s_u – wytrzymałość na ścinanie bez odpływu.

Do wyznaczenia wartości s_u wykorzystuje się różne badania referencyjne, z których uzyskuje się zróżnicowane wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu (Mayne, 2006; De Groot, 2014).

W przeprowadzonych badaniach wartości s_u wyznaczono z badania CPTU, wykorzystując formułę (Lunne i in., 1997):

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (2)$$

gdzie:

q_t – skorygowany opór stożka;

σ_{v0} – pionowa składowa naprężenia geostaticznego;

N_{kt} – współczynnik oporu stożka.

Kluczowym parametrem do wyznaczenia wartości s_u ze wzoru (2) jest ustalenie współczynnika N_{kt} . Wartości tego współczynnika przyjęto w zależności od rodzaju genezy gruntów i stopnia prekonsolidacji (Młynarek, Wierzbicki i Stefaniak, 2018): 18 dla ropy „plioceńskich”, 16 dla lessów, 14,5 dla glin lodowcowych prekonsolidowanych, 14 dla glin lodowcowych normalnie konsolidowanych, 12 dla gruntów organicznych. Współczynnik ten odniesiono do wartości wytrzymałości na ścinanie bez odpływu z badania poziomą sondą obrotową (FVT).

Do wyznaczenia drugiego komponentu wzoru (2), modułu ścinania G , wykorzystuje się współczynnik α i oblicza się ten moduł na podstawie pomierzonych wartości początkowego modułu ścinania (G_0):

$$\alpha = \frac{G}{G_0} \quad (3)$$

Odnosnie współczynnika α jest kilka propozycji w definiowaniu jego wartości „obliczeniowej”. Ze względu na zależność wartości modułu G od wielkości odkształcenia – γ (Drnevich i Massarsch, 1979),

ważnym elementem jest przyjęcie określonego poziomu odkształcenia dla wyznaczenia tego modułu. Hardin (1978) i Massarsch (2004) uznają, że dla analiz geotechnicznych właściwe jest przyjęcie wartości $\gamma = 0,5\%$. Wartość ta odpowiada również odkształceniom obserwowanym w gruncie podczas wykonywania badań penetracyjnych, takich jak CPTU (Mayne, 2001). Na podstawie sejsmicznych badań *in situ* możliwe jest określenie wartości G_0 jedynie przy bardzo małych odkształceniach $\gamma = 10^{-6}\%$. Zachodzi więc potrzeba korekty uzyskanych wyników poprzez wykorzystanie zależności G/G_0 , która była wielokrotnie badana, także w kontekście charakteru obciążenia gruntu (Vucetic i Dobry, 1991; Massarsch, 2004). W opracowaniach o charakterze instrukcji do celów projektowych, dotyczących konkretnych konstrukcji pojawia się stała wartość współczynnika α . W instrukcji DNV/Risø (2002) zaleca się wartość $\alpha = 0,35$. Podobną wartość sugeruje Mayne (2006), a Robertson (2009) rekomenduje wartość w przedziale 0,30–0,38, podobnie jak opracowanie Working Group „Wind turbine foundations” (2012). Należy zauważyć, że przyjęcie stałej wartości współczynnika α związane jest z typowym dla danej konstrukcji zakresem odkształ-

cenia podłoża. Fakt ten dokumentuje przyjęcie poziomu odkształceń dla modułów G i G_0 , które wynoszą odpowiednio 10^{-2} i 10^{-4} . Massarsch (2004) podaje, że współczynnik α jest w istotny sposób uzależniony od rodzaju gruntu, a w szczególności wartości wskaźnika plastyczności. W związku z powyższym, w analizie przyjęto, że wartość współczynnika $\alpha = G/G_0$, oznaczona jako R_M (Massarsch, 2004), zostanie także określona na podstawie wzoru (4) (Massarsch, 2004).

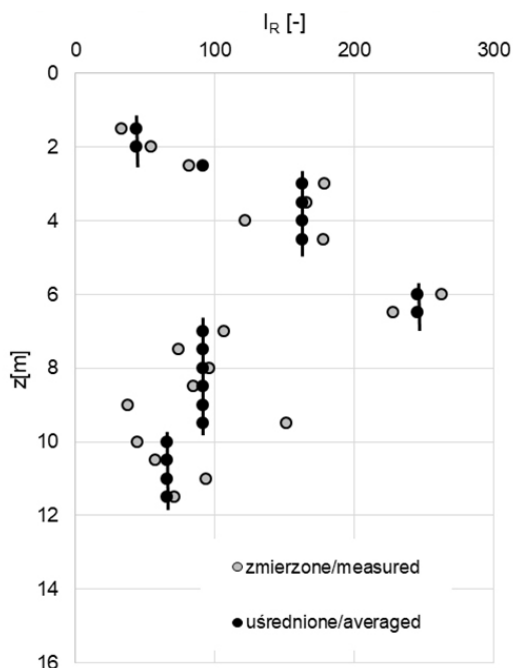
$$R_M = 0,0043PI + 0,103 \quad (4)$$

gdzie:

PI – wskaźnik plastyczności.

Dane do obliczenia wartości wskaźnika I_R oraz modułu G ze wzoru (4) przygotowano w postaci par pomiarów $G_{0-s_{ur}}$, w poziomie średniej wartości naprężenia σ_{v0} w profilu podłoża dla wydzielonej jednorodnej warstwy gruntu.

Za kryterium jednorodności przyjęto zbliżone do stałej w warstwie wartości stopnia plastyczności i wskaźnika plastyczności. Na rysunku 1 pokazano przykład uśrednienia danych pomiarowych dla wydzielonych warstw w podłożu (miejsceowość Batkowo).



Rys. 1. Porównanie wartości wskaźnika sztywności (I_R) wyznaczonych na podstawie danych z pomiarów bezpośrednich i danych uśrednionych wzdłuż głębokości (z), lokalizacja Batkowo

Fig. 1. Comparison between measured values of rigidity index (I_R) and values averaged within geotechnical layers along depth (z), Batkowo profile

Ogółem w analizie wykorzystano 230 par pomiarów s_u i G_0 . Do ustalenia jakościowego wpływu przyjętych do analizy cech ośrodka gruntowego na zmienność wskaźnika sztywności zastosowano wielozmienną analizę regresji.

Koncepcja przygotowania danych do analizy

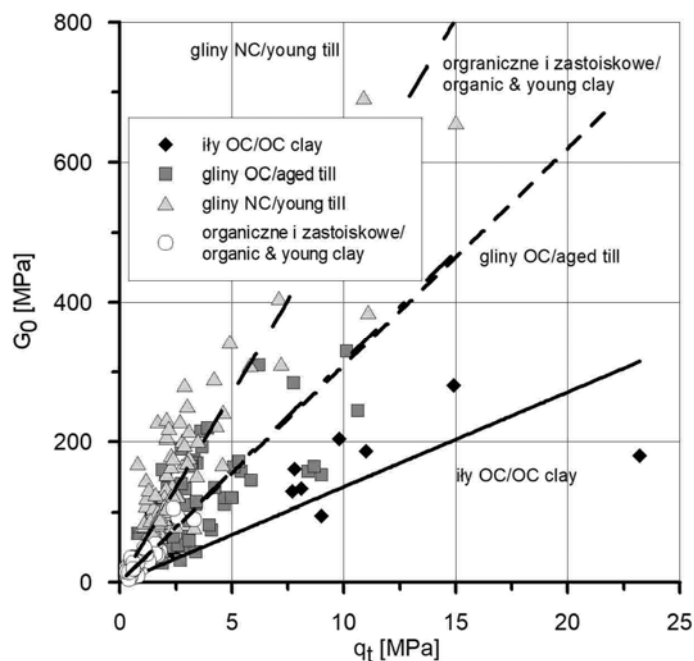
Ze zmodyfikowanego równania (5) (Hardin, 1978) wynika, że na wartość początkowego modułu ścinania (G_0) wpływ ma wiele cech podłoża, związanych z jego strukturą, litologią (wskaźnik plastyczności – PI), stanem naprężenia (σ_{v0}), konsystencją (stopień plastyczności – LI) i genezą (naprężenie prekonsolidacji – σ'_p , współczynnik prekonsolidacji OCR).

$$G_0 = f(LI, PI, OCR, \sigma'_p, \sigma'_{v0}) \quad (5)$$

Podobne cechy wpływają na zmienność wartości oporu stożka (q_t) w badaniu CPTU (Młynarek, Wierzbicki i Stefaniak, 2012). Na tej podstawie przeprowadzono wstępną analizę zgromadzonych danych, zestawiając wyniki pomiarów sejsmicznych i CPTU dla

wszystkich wydzielonych warstw. Uzyskane rezultaty wskazują na wyraźny trend zależności, jednak odrębny dla poszczególnych miejsc badań. Prowadzi to do wniosku, że jednym z dominujących czynników wpływających na zależność między G_0 i q_t jest geneza gruntu, na którą składa się zarówno środowisko powstania (facja), jak i wpływ procesów postdepozycyjnych (cementacja, prekonsolidacja). Uwzględnienie tak pojmowanej „lokalności”, wymagało przyjęcia kryterium geologiczno-genetycznego podziału danych, jako istotnego w prowadzonej analizie. W związku z powyższym wszystkie dostępne dane podzielono na 4 główne grupy genetyczne, które jednocześnie cechowały się widoczną koherentnością trendu (rys. 2). Wyodrębnione grupy stanowiły podstawę do dalszej analizy wpływu innych, mierzalnych właściwości podłoża na jego sztywność.

O trafności dokonanego podziału w kontekście wpływu pozostałych cech gruntu na analizowaną zależność, mogą świadczyć wyniki analizy regresji wielowymiarowej, wskazujące na statystycznie istotną korelację między początkowym modułem ścinania (G_0) i oporem stożka (q_t) w poszczególnych grupach (tab. 1).



Rys. 2. Zależność między początkowym modułem ścinania (G_0) a oporem stożka w badaniu CPTU (q_t), z uwzględnieniem podziału danych na 4 grupy genetyczne

Fig. 2. Relationship between the shear strength modulus (G_0) and the cone resistance (q_t), assuming the division of data into 4 genetic groups

Tabela 1. Wartości współczynnika korelacji liniowej uzyskane w wielozmiennej analizie regresji dla różnych grup gruntów

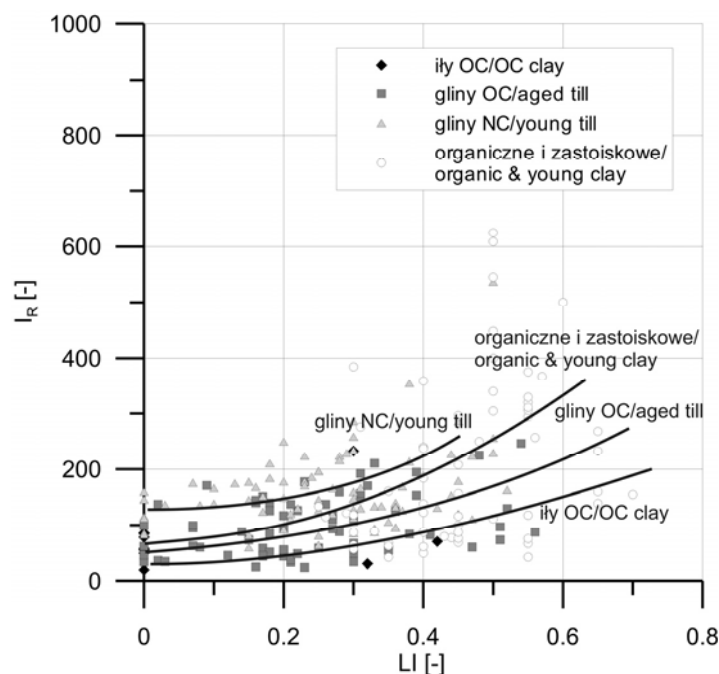
Table 1. Values of linear correlation coefficient obtained in multidimensional regression analysis for different genetic groups

Grupa gruntów – Group soils	Współczynnik korelacji Correlation coefficient (R^2)	Równanie Equation
Iły OC – OC & aged clay	0,96	$G_0 = 13,56 q_t$ (6)
Gliny OC – aged till	0,69	$G_0 = 53,68 q_t$ (7)
Gliny NC – young till	0,81	$G_0 = 30,98 q_t$ (8)
Organiczne i zastoiskowe – organic and young clay	0,71	$G_0 = 31,52 q_t$ (9)

ANALIZA WYNIKÓW

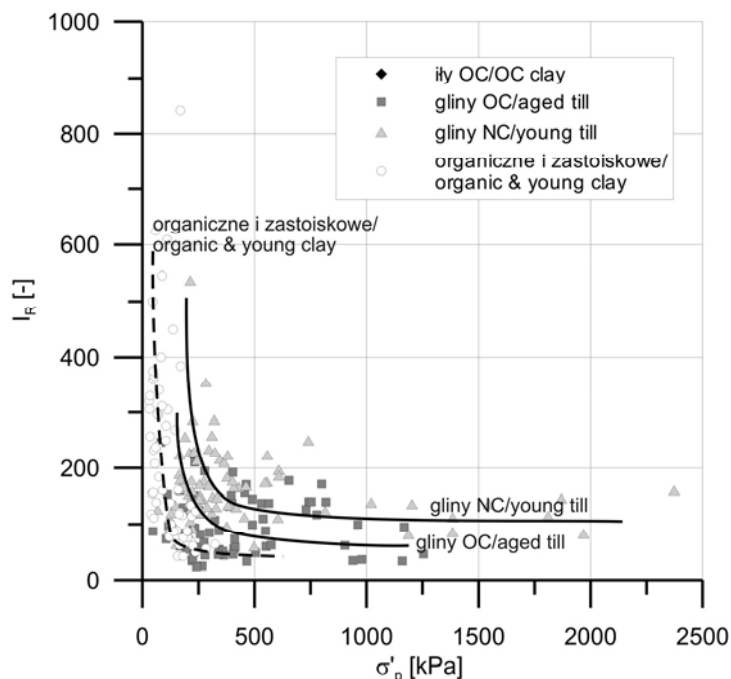
W koncepcji oceny zmienności wskaźnika sztywności eksponują się, jak wcześniej wspomniano, dwa elementy. Pierwszym z nich jest ocena wartości średniej wskaźnika I_R dla populacji jego wartości w wydzielonych grupach gruntów. Tego typu analiza pozwala ustosunkować się do zakresu zmienności I_R

w poszczególnych grupach gruntów. Drugi element dotyczy hierarchii wpływu zmiennych, które występują w równaniu (4) na zmienność wskaźnika sztywności. Badanie korelacji dwuczynnikowych wskazuje na istnienie zależności pomiędzy I_R i wybranymi parametrami gruntu, takimi jak stopień plastyczności (LI) – rysunek 3, wskaźnik plastyczności (PI) czy naprężenie prekonsolidacji (σ'_p) – rysunek 4.



Rys. 3. Zależność między wskaźnikiem sztywności (I_R) i stopniem plastyczności (LI)

Fig. 3. Rigidity index (I_R) vs liquidity index (LI)

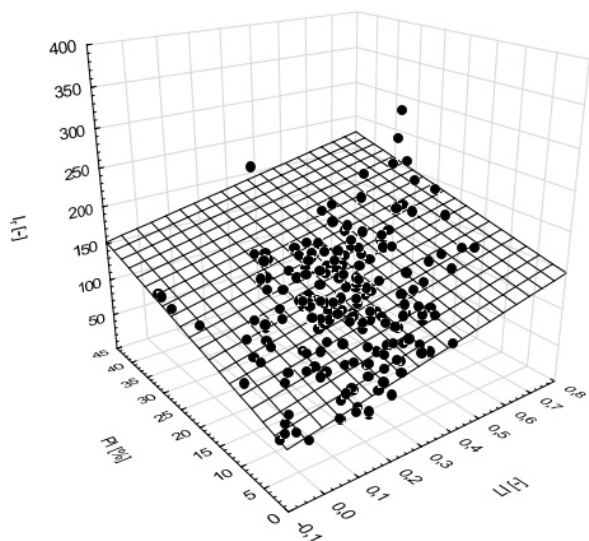


Rys. 4. Zależność pomiędzy wskaźnikiem sztywności (I_R) i naprężeniem prekonsolidacji (σ'_p)

Fig. 4. Rigidity index (I_R) vs preconsolidation pressure (σ'_p)

Jednocześnie wyniki te potwierdziły konieczność prowadzenia analizy odrębnie w różnych grupach genetycznych. Łączny wpływ stopnia plastyczności i wskaźnika plastyczności na zmienność wskaźnika sztywności (I_R) pokazano na rysunku 5.

Jakościową ocenę wpływu trzech podstawowych zmiennych w równaniu 5 na zmienność wskaźnika sztywności wyznaczonego według wzoru (1), przyjmując wartość współczynnika R_M według wzoru (4) oraz przyjmując jego stałą wartość równą 0,35, można



Rys. 5. Graficzny obraz zależności między wskaźnikiem sztywności (I_R) a wskaźnikami plastyczności (PI) i stopniem plastyczności (LI) uzyskany dla całego zbioru danych

Fig. 5. Three-dimensional illustration of the relationship between rigidity index (I_R), plasticity index (PI) and liquidity index (LI) determined for the entire data set

uzyskać za pomocą analizy regresji wielokrotnej (Dra-
per i Smith, 1981). Dla poszczególnych grup gruntów
uzyskano następujące zakresy:

iły OC:

$$I_R = -38,16 + 3,81PI + 231,78LI$$

$$R^2 = 0,64 \quad (10a)$$

$$I_{R(RM=0,35)} = 1,84 + 361,79LI + 3,58PI$$

$$R^2 = 0,56 \quad (10b)$$

gliny OCl:

$$I_R = -7,21 + 8,80PI - 7,89OCR + 149,19LI$$

$$R^2 = 0,54 \quad (11a)$$

$$I_{R(RM=0,35)} = -44,72 + 317,15LI + 15,24PI -$$

$$- 17,34OCR$$

$$R^2 = 0,47 \quad (11b)$$

gliny NC:

$$I_R = -128,05 + 386,05LI + 0,60\sigma'_{v0} + 9,45OCR +$$

$$+ 4,75PI$$

$$R^2 = 0,26 \quad (12a)$$

$$I_{R(RM=0,35)} = -149,52 + 1,18\sigma'_{v0} + 840,83LI + 3,29PI +$$

$$+ 13,43OCR$$

$$R^2 = 0,28 \quad (12b)$$

organiczne i zastoiskowe:

$$I_R = -14,04 + 4,73PI - 4,78OCR + 151,74LI$$

$$R^2 = 0,51 \quad (13a)$$

$$I_{R(RM=0,35)} = 75,67 + 267,33LI + 3,63PI - 3,17OCR$$

$$R^2 = 0,45 \quad (13b)$$

W wyznaczaniu średniej wartości wskaźnika sztywności przyjęto, że rozkład tego wskaźnika, podobnie jak parametrów wytrzymałości na ścinanie i modułu odkształceniowego, jest normalny (Lumb, 1974). Wówczas zakres zmienności współczynnika I_R można opisać poprzez wyznaczenie przedziałów ufności na poziomie $\alpha = 0,05$. Dla poszczególnych grup gruntów uzyskano następującą ocenę wartości średniej I_R (tab. 2).

W przypadku ilów „plioceńskich” wartości współczynnika OCR zmieniały się w bardzo małym zakresie, stąd wpływ tej zmiennej na wskaźnik sztywności był statystycznie nieistotny (równania 10a i 10b). Zmienność wskaźnika sztywności glin prekonsolidowanych w przedziale aż od 42 do 64% była związana ze zmiennością stopnia plastyczności. W przypadku glin normalnie konsolidowanych oraz gruntów zastoiskowych i organicznych zmienność wskaźnika sztywności na poziomie 50% była uzależniona od zmienności stopnia plastyczności i współczynnika OCR .

Bardzo istotna informacja wynika z obliczonej wartości współczynnika regresji wielokrotnej (R^2)

Tabela 2. Średnia wartość wskaźnika sztywności wraz z 95% przedziałami ufności dla poszczególnych grup gruntów

Table 2. Mean rigidity index values and 95% I_R confidence intervals determined for individual genetic groups

Grupa gruntów Group soils	Ilość danych Data numer N	Średnia Mean \bar{x}	-95% przedział ufności Confidence interval	+95% przedział ufności Confidence interval
Iły OC – OC & aged clay	11	76,97	39,19	114,76
Gliny OC – Aged till	68	99,28	86,34	112,22
Gliny NC – Young till	93	166,68	153,38	180,57
Organiczne i zastoiskowe Organic and young clay	48	167,05	135,83	198,28

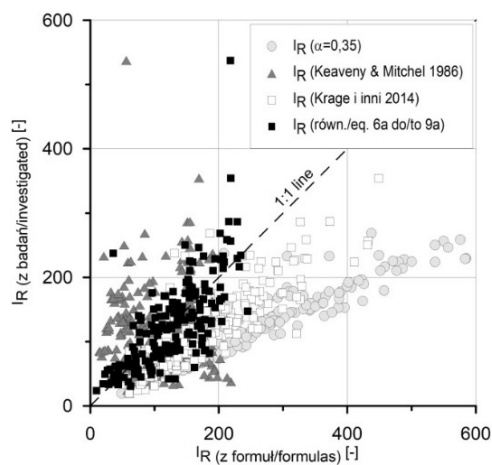
w poszczególnych grupach gruntów. Wartości współczynnika R^2 dowodzą, że w przedziale od 45 do 64% statystycznie istotny wpływ na zmienność wskaźnika sztywności mają zmienne, które znajdują się w równaniach od (10) do (13), niezależnie od przyjętej wartości współczynnika α lub R_M . Oznacza to, że istotny udział w zmienności wskaźnika sztywności mają inne zmienne. Ten wynik potwierdza sformułowane wcześniej stwierdzenie, że wskaźnik sztywności zależy także od efektu cementacji, zawartości węgla wapnia i anizotropowej makrostruktury osadów. Szczególnie wyraźnie występuje ten proces w glinach normalnie konsolidowanych, w których anizotropia makrostruktury związana jest z cienkimi przewarstwieniami drobnoziarnistych piasków w warstwie glin. Wpływ tych czynników na wartości modułu G_0 został wcześniej wykazany przez Młynarka i innych (2012).

Za ważne można uznać ocenę przydatności dostępnych w literaturze zależności dla wyznaczenia wskaźnika sztywności dla badanych gruntów z obszaru Polski. Do tych zależności zalicza się wzory Keaveny'ego i Mitchella (1986) (równ. 14), Krage'a, Broussarda i DeJonga (2014) (równ. 15).

$$I_R = 0,26 \left(\frac{G_0}{\sigma'_{vo}} \right) \left(\frac{1}{0,33(0,33Q_t)^{0,75}} \right) \quad (14)$$

gdzie:

Q_t – znormalizowany opór stożka.



Rys. 6. Porównanie wyników zastosowania różnych wzorów na współczynnik sztywności (I_R) z wartościami określonymi na podstawie badań

Fig. 6. Comparison of rigidity index (I_R) determined with different formulas and obtained from investigations

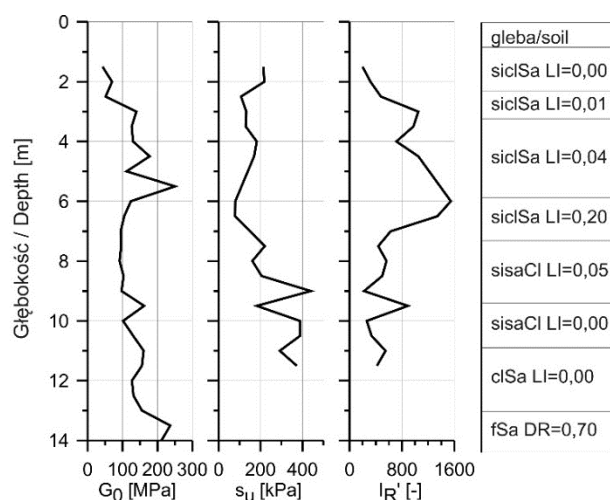
$$I_R \approx \frac{\exp\left(\frac{137 - PI}{23}\right)}{1 + \ln\left[1 + \frac{(OCR + 1)^{3,2}}{26}\right]^{0,8}} \quad (15)$$

Rysunek 6 dobrze dokumentuje to, że w zakresie wartości do $I_R = 200$, wskaźnik ten obliczony na podstawie równań od (10) do (13) oraz równania Krage'a i innych (2014), jest co do wartości zbliżony i skoncentrowany wzdłuż linii kalibracyjnej 1 : 1. Poza tym zakresem, zależność pomiędzy wartościami uzyskanymi na podstawie różnych równań zależy już od analizowanej grupy gruntów.

Wskaźnik sztywności (I_R) zapisany wzorem (16) jest często wykorzystywany do prognozy zmian w podłożu początkowego modułu ścinania (G_0) na podstawie wartości wytrzymałości na ścinanie bez wpływu (s_u).

$$I'_R = G_0/s_u \quad (16)$$

Najczęściej w tym celu wykorzystuje się wartości s_u otrzymane z badania CPTU (Lunne i in., 1997). Rysunek 7 wskazuje, że wartości I'_R są podobnie zależne od właściwości gruntu jak współczynnik sztywności (I_R). Przyjęcie wartości I'_R na poziomie np. 2600 (DNV/Risø 2002) jest wysoce ryzykowne,



Rys. 7. Zmiany wartości początkowego modułu ścinania (G_0), wytrzymałości na ścinanie (s_u) oraz wskaźnika sztywności (I_R') wraz z głębokością na przykładzie profilu Batkowo (LI – stopień plastyczności, DR – stopień zagęszczenia)
Fig. 7. Changes in shear strength modulus (G_0), undrained shear strength (s_u) and the rigidity index (I_R') with depth in young till subsoil (location: Batkowo)

szczególnie w podłożu o dużej zmienności makrostruktury, cementacji oraz z widocznym efektem prekonsolidacji.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować podstawowy wniosek, że wskaźnik sztywności jest parametrem, który zmienia się w szerokim zakresie. Zmienność wskaźnika sztywności związana jest z właściwościami gruntów, których wpływ na ten wskaźnik jest jakościowo różny i związany z genezą gruntów. W przypadku gruntów z obszaru Polski bardzo istotny wpływ na wartość wskaźnika sztywności ma efekt cementacji i anizotropowość makrostruktury osadu. W tym kontekście za najbardziej efektywne zależności do wyznaczenia zmienności wskaźnika sztywności w podłożu należy uznać lokalne zależności korelacyjne, które będą uwzględniać zróżnicowaną genezę gruntów na badanym obszarze.

PIŚMIENNICTWO

Barański, M., Godlewski, T. i Szczepański, T. (2010). Determination of soil stiffness parameters on chosen test sites, using in situ seismic methods. W E. Dembicki

i J. Komisarek (red.), *Soil parameters from in situ and laboratory tests* (strony 149–157). Poznań: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego.

De Groot, D. (2014). Evaluation of soft clay properties from interpretation of CPTU data within a SHANSEP framework. W Z. Młynarek i J. Wierzbicki (red.), *CPTU and DMT in soft clays and organic soils* (strony 79–94). Poznań: Exemplum.

DNV/Risø (2002). *Guidelines for Design of Wind Turbines*. Copenhagen: Jydsk Centraltrykkeri.

Draper, N.R. i Smith, H. (1981). *Applied regression analysis*. New York: Wiley.

Drnevich, V.P. i Massarsch, K.R. (1979). Sample Disturbance and Stress – Strain Behaviour. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105 (GT 9), 1001–1016.

Frankowski, Z., Majer, E. i Pietrzykowski, P. (2010). Geological and geotechnical problem of loess deposits from south-eastern Poland. W *Proceedings of the International Geotechnical Conference Geotechnical Challenges in Megacities*. Vol. 2 (strony 546–553). Moskwa.

Hardin, B.O. (1978). The nature of stress-strain behavior for soils. W *Proceedings ASCE Geotechnical Division Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. Vol. 1. Pasadena (strony 3–90).

Keaveny, J. i Mitchell, J.K. (1986). Strength of fine-grained soils using the piezocone. W *Use of In-Situ Tests in Geotechnical Engineering (GSP 6)*, ASCE, 668–685.

- Krage, C.P., Broussard, N.S. i DeJong, J.T. (2014). Estimating rigidity index (I_R) based on CPT measurements. W *Proceedings of 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing*. Las Vegas, Nevada (strony 727–735).
- Kumor, M.K. (2008). Selected geotechnical problems of expansive clays in the area of Poland. *Architecture Civil Engineering Environment*, 4, 75–92.
- Lumb, P. (1974). Applications of Statistics in Soil Mechanics. W J.K. Lee (red.), *Soil Mechanics – New Horizons*. London: Newness-Batterworth.
- Lunne, T., Robertson, P.K. i Powell, J.J.M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. New York: Blackie Academic, EF Spon/Routledge Publ.
- Massarsch, K.R. (2004). Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests. Viana da Fonseca i P. Mayne (red.) *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. W *Proceedings International Conference on Site Characterization, ISC'2*, Porto (strony 133–146). Rotterdam: Millpress.
- Mayne, P.W. (2001). Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests. W *Proceedings of International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties & Case Histories [In-Situ 2001]*, Bali, Indonesia (strony 27–48).
- Mayne, P.W. (2006). In-Situ Test Calibrations for Evaluating Soil Parameters. W T.S. Tan, K.K. Phoon, D.W. Hight i S. Leroueil (red.), *Characterisation and engineering properties of natural soil. Proceedings In-Situ Testing – Singapore Workshop*, Singapore (strony 1–56).
- Młynarek, Z., Wierzbicki, J. i Stefaniak, K. (2012). Deformation characteristics of overconsolidated subsoil from CPTU and SDMT tests. W R.Q. Coutinho i P.W. Mayne (red.). *Proceedings of 4th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Investigations*, Porto de Galinhas (strony 1189–1193). London: Taylor & Francis Group.
- Młynarek, Z., Wierzbicki, J. i Mańka, M. (2015). Geotechnical parameters of loess soils from CPTU and SDMT. W *Proceedings of International Conference on the Flat Dilatometer DMT'15*, Rome (strony 481–489), Rome.
- Młynarek, Z., Wierzbicki, J. i Stefaniak, K. (2018). Interrelationship between undrained shear strength from DMT and CPTU tests for soils of different origin. *Geotechnical Testing Journal* (in print).
- Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration tests – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, 1337–1355.
- Vesic, A.S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98 (3), 265–290.
- Vucetic, M. i Dobry, R. (1991). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1 (117), 89–107.
- Working Group „Wind turbine foundations” (2012). Recommendations for the design, calculation, installation and inspection of wind-turbine foundations (2012). *Revue Française de Géotechnique*, 138–139, 51–97.

FACTORS INFLUENCING EVALUATION OF RIGIDITY INDEX FROM *IN SITU* TESTS

ABSTRACT

The article attempts to determine the significance of the influence of the following variables on the rigidity index: liquidity index, plasticity index, overconsolidation ratio and effective vertical stress (σ'_{v0}). A global function was defined, as well as partial functions, which predict shear strength modulus G_0 values based on cone resistance for different soil groups with varying *OCR* values. The significance of the influence of the analyzed variables on the variability of the rigidity index (I_R) was also examined. The analysis used the results of more than 100 static SCPTU and SDMT tests. Investigations were conducted in several locations in Poland, where the subsoil is constructed from soils of different geological origin.

Key words: SDMT, SCPTU, shear strength modulus G_0