

## KONCEPCJA OCENY MODUŁU ODKSZTAŁCENIA POSTACIOWEGO W GRUNTACH SPOISTYCH NA PODSTAWIE PRĘDKOŚCI FALI POPRZECZNEJ

Katarzyna Markowska-Lech, Jakub Gromek  
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W niniejszej pracy zaproponowano empiryczne związki umożliwiające szacowanie modułu odkształcenia postaciowego ( $G_{\text{Max}}$ ) gruntu na podstawie standardowo określanych w badaniach parametrów geotechnicznych. Praca zawiera analizę wyników pomiarów prędkości fali poprzecznej w aparacie trójosiowego ściskania z piezoelementami typu bender, wykonanych na próbkach gruntów spoistych.

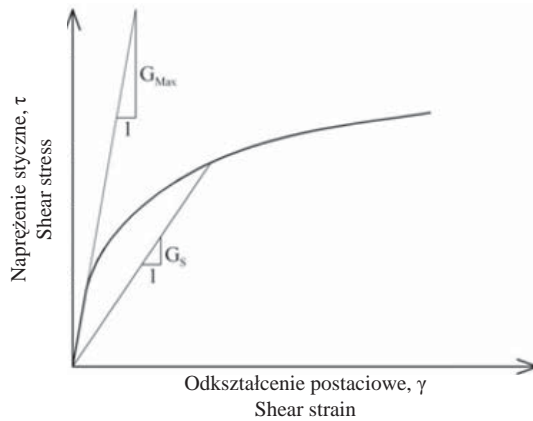
**Słowa kluczowe:** sztywność gruntu, moduł odkształcenia postaciowego, piezoelementy typu bender, grunty spoiste

### WSTĘP

Bezpieczne projektowanie konstrukcji posadowionych na gruntach powinno opierać się na wiarygodnym określeniu związków pomiędzy naprężeniami i odkształceniami. Jednym z kluczowych parametrów gruntu, określających tę zależność, jest moduł odkształcenia postaciowego ( $G$ ). W przypadku materiałów izotropowych i liniowo sprężystych moduł odkształcenia postaciowego jest stałą materiałową. Podczas odkształcania gruntu mamy do czynienia zarówno z odkształceniami sprężystymi, jak i plastycznymi, zachodzącymi jednocześnie. Ponadto sztywność gruntu maleje nieliniowo wraz ze wzrostem zakresu rozpatrywanych odkształceń (rys. 1).

Przy niskim poziomie odkształcenia wartość modułu  $G$  jest duża, a zależność  $\tau - \gamma$  jest liniowa. Wartość ta określana jest jako początkowy moduł odkształcenia postaciowego ( $G_{\text{Max}}$  lub  $G_0$ ). Wraz ze wzrostem odkształcenia zależność  $\tau - \gamma$  staje się nieliniowa, sztywność gruntu maleje, a moduł związany z tym zakresem odkształcenia znany jest jako moduł ścieczny ( $G_S$ ). W analizach, które dążą do wiarygodnych prognoz odkształceń gruntu, powinna być zatem uwzględniana początkowa sztywność gruntu i jej nieliniowa zależność od zakresu odkształceń.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Katarzyna Markowska-Lech, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Laboratorium Centrum Wodne, ul. Ciszewskiego 6, 02-776 Warszawa, e-mail: katarzyna\_markowska\_lech@sggw.pl



Rys. 1. Zależność pomiędzy napężeniem stycznym ( $\tau$ ) i odkształceniem postaciowym ( $\gamma$ ) w gruntach

Fig. 1. Shear stress ( $\tau$ ) and shear strain ( $\gamma$ ) relationship for soils

W badaniach laboratoryjnych do określania parametrów gruntów z zakresu odkształceń rzędu  $10^{-6}$ – $10^{-5}$ , określanych jako początkowe [Lipiński 2006, 2013], służy m.in. zmodyfikowany aparat trójosiowy wyposażony w system do pomiaru prędkości propagacji fal akustycznych. Modyfikacja polega na umieszczeniu wewnątrz komory aparatu (w jego kopolach lub bezpośrednio na próbce, po przeciwnych jej stronach) odpowiednio zorientowanych par piezoelementów, umożliwiających pomiar prędkości fali poprzecznej przechodzącej przez próbkę.

Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że wiele parametrów gruntu w różnym stopniu wpływa na jego początkową sztywność. Liczne badania wykazały, że największy wpływ na wartość początkowej sztywności gruntu mają średnie napężenie efektywne  $\sigma'_m$  i początkowy wskaźnik porowatości ( $e_0$ ) – tabela 1. Następnym istotnym parametrem wpływającym na wartość  $G_{Max}$  jest wiek geologiczny gruntu ( $t_g$ ). Nieco mniejszy wpływ autorzy przypisują wskaźnikowi prekonsolidacji ( $OCR$ ) i częstotliwości obciążeń podczas badania ( $f$ ), natomiast wpływ stopnia plastyczności ( $I_L$ ) i liczby cykli obciążeń uznają za nieistotny. Zaznaczają jednak, że wpływ stopnia plastyczności ( $I_L$ ) na wartość  $G_{Max}$  jest tematem wielkiej debaty. W literaturze można spotkać badania stwierdzające zarówno dodatni, jak i ujemny wpływ tego parametru na początkową sztywność gruntu oraz takie, w których wpływ stopnia plastyczności jest nieistotny [Carlton i Pestana 2012].

W tabeli 1 strzałka w górę oznacza, że wraz ze wzrostem parametru zwiększa się wartość  $G_{Max}$ , a strzałka w dół – że zraz ze wzrostem parametru wartość  $G_{Max}$  maleje, natomiast  $NE$  oznacza, że dany parametr ma nieznaczny wpływ na wartość  $G_{Max}$ . Liczba strzałek wskazuje względny wpływ danego parametru. Po prawej stronie tabeli 1 przedstawiono krzyżowe korelacje pomiędzy parametrami, na przykład strzałka w górę pomiędzy  $OCR$  i  $\sigma'_m$  oznacza, że przy wzroście  $OCR$  wpływ  $\sigma'_m$  na wartość  $G_{Max}$  zwiększa się.

Tabela 1. Wpływ parametrów gruntu na wartość  $G_{Max}$  w gruntach spoistych [Carlton i Pestana 2012]Table 1. Influence and relative importance of parameters that control  $G_{Max}$  of cohesive soils [Carlton and Pestana 2012]

Increasing Parameter	$G_{max}$	Cross Correlations	
		$OCR$	$PI$
$\sigma'_m$	↑↑↑	↑	
$e_0$	↓↓↓		
$t_g$	↑↑	↑	↑
$OCR$	↑		↑
$f$	↑		
$PI$	NE		
$N$	NE		

Objaśnienia: increasing parameter – parametr wzrastający; cross correlations – zależność krzyżowa.

## METODYKA BADAŃ

Badanie z wykorzystaniem piezoelementów typu bender polega na pomiarze czasu przejścia sygnału od nadajnika do odbiornika przez umieszczoną w komorze aparatu próbkę gruntu. Prędkość propagacji fali akustycznej przez grunt oblicza się, dzieląc odległość pomiędzy piezoelementami przez pomierzony czas propagacji sygnału. Impuls elektryczny jest generowany przez generator fali zsynchronizowany z piezoelementem nadawczym i z oscyloskopem, dzięki czemu wejście sygnału widoczne na oscyloskopie odpowiada wejściu sygnału do próbki gruntu. Następnie wygenerowany impuls elektryczny zamieniany jest przez piezoelement nadawczy na impuls mechaniczny, który propagowany jest przez grunt i po pewnym czasie dociera do piezoelementu odbiorczego. Odebrany w ten sposób sygnał jest ponownie zamieniany na sygnał elektryczny, który po wzmacnieniu i oczyszczeniu dociera do oscyloskopu. Czas przejścia sygnału od nadajnika do odbiornika odczytywany jest z obrazu uzyskanego na ekranie. W celu precyzyjnego ustalenia prędkości propagacji fali przez próbkę gruntu konieczne jest precyzyjne określenie czasu przejścia fali przez próbkę oraz dokładne określenie drogi propagacji. W tym celu należy od wysokości próbki odjąć głębokość umieszczenia piezoelementów w próbce [Viggiani i Atkinson 1995]. Prędkość propagacji fali poprzecznej oblicza się z wzoru:

$$v_s = \frac{h_p - 2 \cdot h_e}{t_s} \quad (1)$$

gdzie:  $h_p$  – wysokość badanej próbki gruntu,

$h_e$  – odległość, na jaką zagłębiony jest w próbce piezoelement,

$t_s$  – czas propagacji fali.

Szczegółowy opis stanowiska badawczego i metodyki badań można znaleźć w pracach Tymińskiego i Markowskiej-Lech [2005] oraz [Markowskiej-Lech [2006].

## WYNIKI BADAŃ

Badania przeprowadzono na próbkach naturalnych gruntów spoistych o nienaruszonej strukturze, pochodzących z terenu Warszawy. Określono parametry fizyczne próbek: gęstość objętościową gruntu ( $\rho$ ), wilgotność naturalną ( $w_n$ ), a także granicę plastyczności ( $w_p$ ) i granicę płynności ( $w_L$ ), na podstawie których określono wskaźnik plastyczności ( $I_p$ ) i stopień plastyczności ( $I_L$ ). Dokonano także analizy uziarnienia tych gruntów i sklasyfikowano je na podstawie normy PN-EN ISO 14688. Właściwości badanych gruntów zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości fizyczne próbek  
Table 2. Index properties of tested soil samples

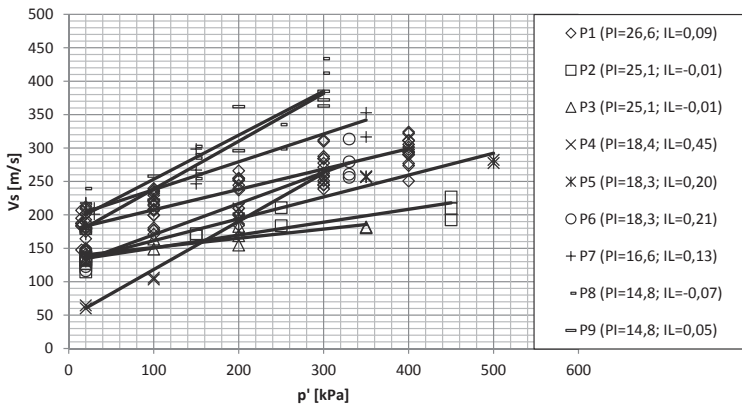
Próbka Sample	Głębokość Depth [m]	cl [%]	si [%]	sa [%]	Nazwa gruntu Soil	$w_n$ [%]	$w_L$ LL [%]	$w_p$ PL [%]	$I_p$ PI [-]	$I_L$ IL [-]	$e_0$ [-]
P1	22,5–23,0	28	60	12	siCl	21,5	45,7	19,1	26,6	0,09	0,644
P2	21,5–22,2	25	57	18	siCl	17,4	42,8	17,7	25,1	-0,01	0,620
P3	21,5–22,3	25	57	18	siCl	17,4	42,8	17,7	25,1	-0,01	0,630
P4	2,0–2,4	19	52	29	siCl	26,3	36,4	18	18,4	0,45	0,980
P5	17,0–17,5	22	51	27	siCl	22,1	36,9	18,6	18,3	0,19	0,697
P6	14,0–14,5	17	74	9	clSi	22,5	36,9	18,6	18,3	0,21	0,650
P7	3,0–3,7	10	35	55	sasiCl	12,05	26,5	9,9	16,6	0,13	0,370
P8	3,0–3,7	11	42	47	sacsiSi	10,73	26,5	11,7	14,8	-0,07	0,360
P9	3,0–3,7	11	42	47	sacsiSi	12,42	26,5	11,7	14,8	0,05	0,390

Badane próbki gruntu zostały pobrane z różnych głębokości, wahającej się od 2,0 m p.p.t. w przypadku próbki P4, aż do głębokości 23,0 m p.p.t. w przypadku próbki P1. Pięć spośród badanych gruntów zostało sklasyfikowanych jako ły pylaste (siCl), dwa jako pyły ilasto-piaszczyste (sacsiSi) oraz pył ilasty (clSi) i ły pylasto-piaszczysty (sasiCl). Plastyczność zbadanych gruntów waha się od  $I_p = 14,8\%$  do  $I_p = 26,6\%$ . Stan badanych gruntów jest zróżnicowany – od stanu półzwartego do stanu plastycznego.

Próbki do badań w aparacie trójosiowym miały wymiary: średnica –  $d \approx 50$  mm i wysokość –  $h \approx 100$  mm. Pomiarów prędkości fali dokonywano kilkakrotnie, przy każdej zmianie naprężenia, zarówno podczas etapu nasączenia, jak i konsolidacji.

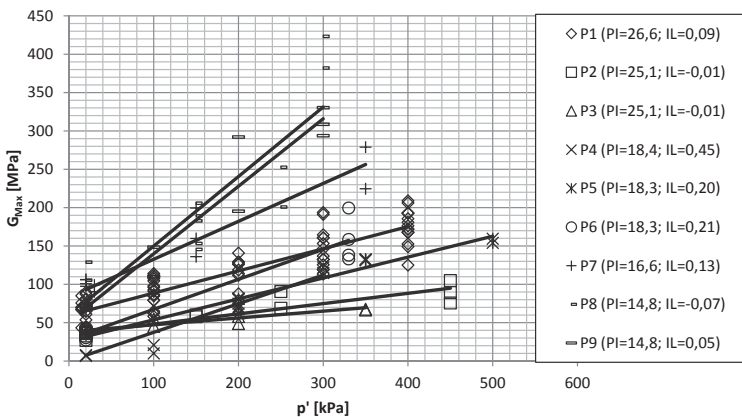
Na rysunkach 2 i 3 zaprezentowano otrzymane wyniki pomiarów prędkości fali poprzecznej ( $V_S$ ), w zależności od średniego naprężenia efektywnego ( $p'$ ), oraz obliczone na tej podstawie wartości początkowego modułu odkształcenia postaciowego ( $G_{Max}$ ).

Wartość prędkości propagacji fali poprzecznej w gruncie, a co za tym idzie – wartość początkowego modułu odkształcenia postaciowego, jest skorelowana z wartością śred-



Rys. 2. Zależność prędkości fali poprzecznej ( $V_s$ ) od średniego naprężenia efektywnego ( $p'$ ) w badanych próbkach

Fig. 2. Shear wave velocity ( $V_s$ ) vs. mean effective stress ( $p'$ ) in tested soils



Rys. 3. Zależność wartości początkowego modułu odkształcenia postaciowego ( $G_{Max}$ ) od średniego naprężenia efektywnego ( $p'$ ) w badanych próbkach

Fig. 3. Shear modulus ( $G_{Max}$ ) vs. mean effective stress ( $p'$ ) in tested soils

niego naprężenia efektywnego. Otrzymane wyniki pomiaru prędkości fali w poszczególnych próbkach gruntu, przy stałym naprężeniu efektywnym, są rozproszone. Może być to spowodowane zróżnicowaną częstotliwością nadawanego sygnału. Im mniejszy wskaźnik porowatości i im większe średnie naprężenie efektywne, tym lepszy kontakt pomiędzy cząsteczkami gruntu, a co za tym idzie – większa prędkość propagacji fali poprzecznej.

Próba wyznaczenia prostego i praktycznego związku służącego do oszacowania wartości  $G_{Max}$  na podstawie łatwych do określenia parametrów oparta została na najbardziej powszechnym w literaturze zmodyfikowanym równaniu Hardina i Blacka [1968] w postaci:

$$G_{\text{Max}} = A \cdot f(e) \cdot OCR^k \cdot \left( \frac{p'}{p_{\text{ref}}} \right)^m \quad (2)$$

gdzie:  $A$  – bezwymiarowa stała charakteryzująca strukturę gruntu,

$m$  – wykładnik empiryczny,

$f(e)$  – funkcja wskaźnika porowatości,

$OCR$  – współczynnik prekonsolidacji,

$k$  – funkcja zależna od wskaźnika plastyczności dla gruntów spoistych;  $k = 0$  dla

$I_p < 40$ ,  $k = 1$  dla  $I_p > 40$ ,

$p_{\text{ref}}$  – ciśnienie referencyjne [kPa],

$p'$  – średnie naprężenie efektywne [kPa].

W obliczeniach przyjmuje się wartość parametru  $k = 0$ , zgodnie z założeniem, że wskaźnik prekonsolidacji  $OCR$  nie ma wpływu na wartość  $G_{\text{Max}}$  [Jamiolkowski i in. 1994]. Wartość ciśnienia referencyjnego przyjęto  $p_{\text{ref}} = 100$  kPa. Dokładny opis toku postępowania można znaleźć w pracach Massarch [2004] i Gromek [2014].

Wskaźnik porowatości zapisany został jako funkcja w dwóch wariantach:

$$f_1(e_0) = \frac{(2,97 - e_0)^2}{1 + e_0} \quad (3)$$

$$f_2(e_0) = \frac{1}{e_0} \quad (4)$$

Wobec tego zakładane równania przyjmują postać:

$$G_{\text{Max}}^{\text{I}} = A_1 \cdot \frac{(2,97 - e_0)^2}{1 + e_0} \cdot \left( \frac{p'}{100} \right)^{m_1} \quad (5)$$

$$G_{\text{Max}}^{\text{II}} = A_2 \cdot \frac{1}{e_0} \cdot \left( \frac{p'}{100} \right)^{m_2} \quad (6)$$

Zadanie sprowadza się do uzależnienia stałych  $A$  i  $m$  od znanych parametrów gruntów. W tym celu dobrano wyżej wymienione stałe dla każdej z badanych próbek, aby otrzymać jak najbardziej zbliżoną charakterystykę  $G_{\text{Max}} - p'$  do otrzymanych wyników, które zostały pokazane na rysunku 3. W tabeli 3 przedstawiono uzyskane wyniki.

W celu ustalenia związku uzależniającego parametr  $m$  od rodzaju gruntu, określono dwa dodatkowe parametry: stopień konsystencji ( $I_C$ ) i względną aktywność gruntu ( $RA$ ), które zestawiono w tabeli 4:

$$I_C = 1 - I_L \quad (7)$$

$$RA = \frac{(w_L - I_p)}{w_L} \quad (8)$$

Tabela 3. Zestawienie stałych  $A$  i  $m$  dopasowanych do otrzymanych wyników badań  
 Table 3. Values of  $A$  and  $m$  parameters for tested samples

Próbka Sample	$G_{\text{Max}}^I = A \cdot \frac{(2,97 - e_0)^2}{1 + e_0} \cdot \left(\frac{p'}{p_{\text{ref}}}\right)^m$		$G_{\text{Max}}^{II} = A \cdot \frac{1}{e_0} \cdot \left(\frac{p'}{p_{\text{ref}}}\right)^m$	
	$A_1$	$m_1$	$A_2$	$m_2$
P1	57	0,48	27	0,48
P2	30	0,42	14	0,42
P3	29	0,33	14	0,33
P4	37	1,00	19	1,00
P5	38	0,65	18	0,65
P6	44	0,70	21	0,70
P7	50	0,51	27	0,51
P8	55	0,73	30	0,73
P9	55	0,75	29	0,75

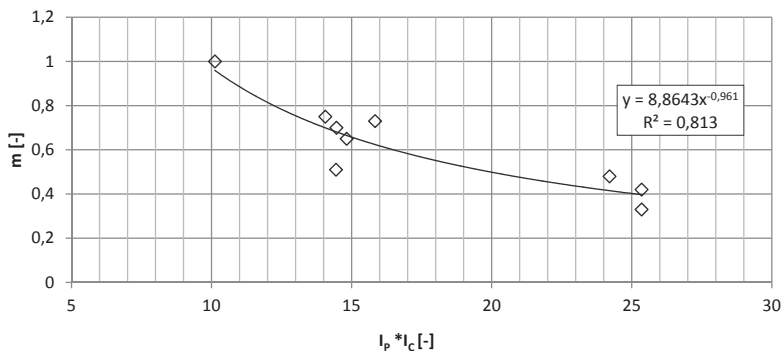
Tabela 4. Zestawienie wartości  $I_C$  i  $RA$  dla poszczególnych próbek  
 Table 4. Values of  $I_C$  and  $RA$  for tested samples

Parametry Parameters	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
$I_C$	0,91	1,01	1,01	0,55	0,81	0,79	0,87	1,07	0,95
$RA$	0,418	0,414	0,414	0,495	0,504	0,504	0,374	0,442	0,442

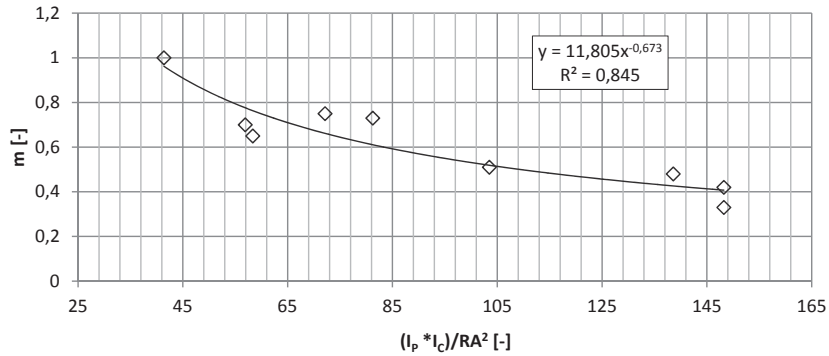
Dobre korelacje uzyskano, uzależniając parametr  $m$  od iloczynu wskaźnika plastyczności i stopnia konsystencji (rys. 4) oraz wyrażenia  $(I_p \cdot I_C)/RA^2$  (rys. 5). Można zatem określać parametr  $m$  z następujących wzorów:

$$m = 8,864 \cdot (I_p \cdot I_C)^{-0,96} \tag{9}$$

$$m = 11,80 \cdot \left(\frac{I_p \cdot I_C}{RA^2}\right)^{-0,67} \tag{10}$$

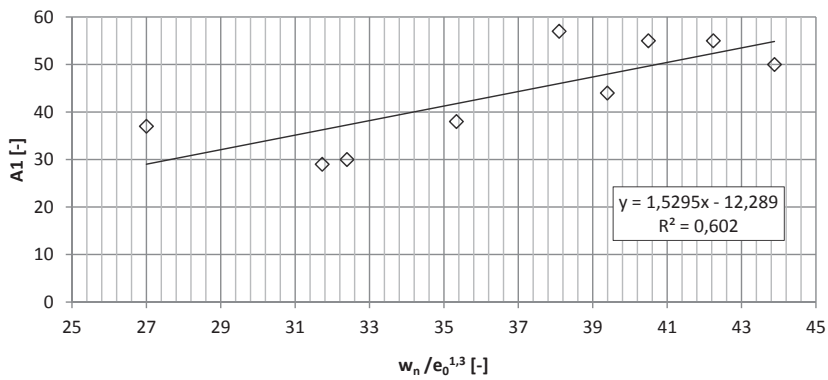


Rys. 4. Zależność parametru  $m$  od iloczynu wskaźnika plastyczności ( $I_p$ ) i stopnia konsystencji ( $I_C$ )  
 Fig. 4. Correlation of parameter  $m$  and  $(I_p \cdot I_C)$  values for tested soils

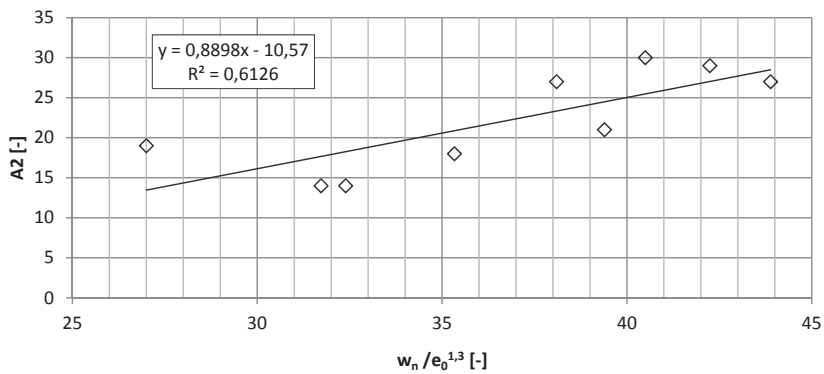


Rys. 5. Zależność parametru  $m$  od wyrażenia  $(I_p * I_C) / RA^2$   
 Fig. 5. Correlation of parameter  $m$  and  $(I_p * I_C) / RA^2$  values

Gorszą korelację uzyskano przy próbie określenia stałych  $A_1$  i  $A_2$ , których wartości najlepiej korelowały ze związkiem:  $w_n / e_0^{1,3}$  (rys. 6 i 7).



Rys. 6. Zależność parametru  $A_1$  od wyrażenia  $w_n / e_0^{1,3}$   
 Fig. 6. Correlation of parameter  $A_1$  and  $w_n / e_0^{1,3}$  values



Rys. 7. Zależność parametru  $A_2$  od wyrażenia  $w_n / e_0^{1,3}$   
 Fig. 7. Correlation of parameter  $A_2$  and  $w_n / e_0^{1,3}$  values



Można zatem przyjąć że:

$$A_1 = 1,53 \cdot \frac{w_n}{e_0^{1,3}} - 12,29 \quad (11)$$

$$A_2 = 0,89 \cdot \frac{w_n}{e_0^{1,3}} - 10,57 \quad (12)$$

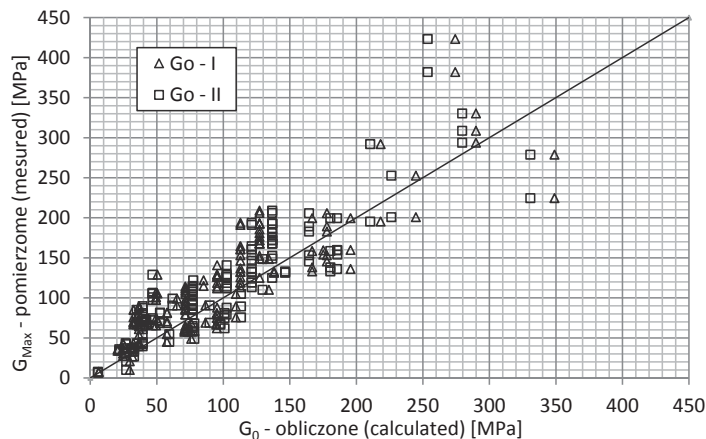
gdzie:  $w_n$  – wilgotność naturalna [-].

Równania do oszacowania wartości  $G_0$  przyjmują następujące postaci:

$$G_0^I = \left( 1,53 \cdot \frac{w_n}{e_0^{1,3}} - 12,29 \right) \cdot \frac{(2,97 - e_0)^2}{1 + e_0} \cdot \left( \frac{p'}{100} \right)^{8,864 \cdot (I_p \cdot I_c)^{-0,96}} \quad (13)$$

$$G_0^{II} = \left( 0,89 \cdot \frac{w_n}{e_0^{1,3}} - 10,57 \right) \cdot \frac{1}{e_0} \cdot \left( \frac{p'}{100} \right)^{8,864 \cdot (I_p \cdot I_c)^{-0,96}} \quad (14)$$

Na rysunku 8 zaprezentowano porównanie wartości  $G_0$ , obliczonych za pomocą równań (13) i (14), z wartościami  $G_0$  pomierzonymi podczas badań.



Rys. 8. Zależność pomiędzy pomierzonymi wartościami  $G_0$  a wartościami obliczonymi za pomocą równań (13) i (14)

Fig. 8. Correlation of experimental and estimated values of shear modulus for tested soils

## PODSUMOWANIE

Czynnikiem mającym największy wpływ na prędkość propagacji fali poprzecznej w gruncie, a co za tym idzie – na wartość  $G_{Max}$ , jest bez wątpienia średnie naprężenie efektywne ( $p'$ ). Fala poprzeczna propagowana jest przez grunt poprzez kontakty między

jego cząsteczkami, na które naprężenie efektywne ma oczywisty wpływ. Związek pomiędzy średnim naprężeniem efektywnym i wartością  $G_{\text{Max}}$ , w badanych gruntach spoistych przyjmuje charakter liniowy.

Parametrem, który również ma istotny wpływ na wartość  $G_{\text{Max}}$  jest wskaźnik plastyczności  $I_p$ . Co prawda nie wykazano związku pomiędzy wartością  $I_p$  i prędkością propagacji fali poprzecznej, ale zauważono, że dla gruntów o małej plastyczności wzrasta wpływ średniego naprężenia efektywnego na wartość  $G_{\text{Max}}$ . Podobną zależność zauważono również dla zawartości frakcji drobnej, która jest w dobrej korelacji ze wskaźnikiem plastyczności.

Po przeanalizowaniu wyników badań zaproponowano następujące związki empiryczne, na podstawie których można oszacować wartość  $G_{\text{Max}}$ :

$$G_0^I = \left( 1,53 \cdot \frac{w_n}{e_0^{1,3}} - 12,29 \right) \cdot \frac{(2,97 - e_0)^2}{1 + e_0} \cdot \left( \frac{p'}{100} \right)^{8,864 \cdot (I_p \cdot I_c)^{-0,1}}$$

$$G_0^{II} = \left( 0,89 \cdot \frac{w_n}{e_0^{1,3}} - 10,57 \right) \cdot \frac{1}{e_0} \cdot \left( \frac{p'}{100} \right)^{8,864 \cdot (I_p \cdot I_c)^p}$$

Porównanie wartości  $G_0$  pomierzonych w laboratorium z wartościami uzyskanymi za pomocą zaproponowanych równań pokazano na rysunku 8. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że powyższe równania mogą służyć do określania szacunkowej wielkości  $G_{\text{Max}}$  w gruntach spoistych o plastyczności  $I_p < 27\%$ . Zaproponowane związki oparte są na łatwych do określenia parametrach geotechnicznych, takich jak: początkowy wskaźnik porowatości ( $e_0$ ), wskaźnik plastyczności ( $I_p$ ), wskaźnik konsystencji ( $I_c$ ), a także wilgotność naturalna ( $w_n$ ), i uzależnione od średniego naprężenia efektywnego ( $p'$ ). Związki empiryczne zaproponowane w pracy powinny zostać zweryfikowane w dalszej kolejności.

## ADNOTACJA

Projekt został częściowo finansowany przez NCN (nr um. 0467/B/T02/2011/40).

## PIŚMIENNICTWO

- Carlton, B.D., Pestana, J.M. (2012). Small strain modulus of high and low plasticity clays and silts. 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 24–28 September, Lisbon.
- Gromek, J. (2014). Ocena modułu odkształcenia postaciowego gruntów spoistych na podstawie pomiaru prędkości fali poprzecznej. Praca magisterska. SGGW, Warszawa.
- Hardin, B.O., Black, W.L. (1968). Vibration modulus of normally consolidated clay. Journal of SMF, Div. ASCE, 95, SM6, 1531–1537.
- 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.
- Lipiński, M.J. (2006). Małe... ale jak bardzo istotne. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo, 28, 1, 191–200.

- Lipiński, M.J. (2013). Kryteria wyznaczania parametrów geotechnicznych. Rozprawa habilitacyjna. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Markowska-Lech, K. (2006). Analiza czynników wpływających na prędkość fali poprzecznej w gruntach spoistych. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo, 29, 161–172.
- Massarch, K.R. (2004). Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests. Keynote lecture of International Conference on Site Characterization. ICS'2, Porto, September 19–22.
- PN-EN ISO 14688-1 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1. Oznaczanie i opis.
- PN-EN ISO 14688-2 Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 2. Zasady klasyfikowania.
- Tymiński, W., Markowska-Lech, K. (2005). Kryteria pomiaru prędkości fali poprzecznej w gruntach spoistych. 51 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Gdańsk – Krynica, 65–72.
- Viggiani, G., Atkinson, J.H. (1995). Stiffness of fine grained soil at very small strains. Géotechnique, 45 (2), 249–265.

## EVALUATION OF SHEAR MODULUS BASED ON SHEAR WAVE VELOCITY TESTS FOR COHESIVE SOILS

**Abstract.** This work contains proposition of the empirical relationship based on a standard laboratory tests for the estimation the initial shear modulus ( $G_{Max}$ ) for cohesive soils. The analysis of the results of measurements shear wave velocity from bender elements tests was presented.

**Key words:** soil stiffness, shear modulus, bender elements, cohesive soils

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.09.2015

Cytowanie: Markowska-Lech, K., Gromek, J. (2015). Koncepcja oceny modułu odkształcenia postaciowego w gruntach spoistych na podstawie prędkości fali poprzecznej. Acta Sci. Pol., Architectura, 14 (3), 45–55.