

ANNA BOROWIEC*

MODUŁ G_{MAX} NA TLE STATYCZNYCH PARAMETRÓW GEOTECHNICZNYCH DLA GRUNTÓW SŁABYCH ORAZ POCHODZENIA ORGANICZNEGO

G_{MAX} WITH REFERENCE TO STATIC PARAMETERS OF THE ORGANIC AND WEAK SOILS

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów „dynamicznego” modułu sprężystości G_{max} dla wybranych gruntów pylastych oraz gytii, w odniesieniu do wyliczonego z teorii sprężystości statycznego modułu G . Ukazano również jak parametry wytrzymałościowe, otrzymane z badań, różnią się od używanych w projektowaniu wartości normowych. Całość uzupełniono wstępem teoretycznym oraz opisem złożeń, z których pochodzą badane próby.

Słowa kluczowe: elementy typu bender, pomiar G_{max} , gytie, dynamiczne parametry gruntu

Abstract

The paper deals with the results of laboratory G_{max} measurements of soft soils and gyttja in comparison with its static value calculated according to theory of elasticity. The differences between values measured and recommended by Polish standards are also presented.

Keywords: bender elements, G_{max} measurement, gyttja, soil dynamic parameters

* Dr inż. Anna Borowiec, Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

G_{\max}	–	maksymalny moduł ścinania (moduł „dynamiczny”)
G	–	moduł ścinania (moduł „statyczny”)
ρ	–	gęstość objętościowa
v_s	–	prędkość fali poprzecznej
ν	–	współczynnik Poissona
E	–	moduł Younga
E_0	–	moduł pierwotnego odkształcenia gruntu
M_0	–	edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej

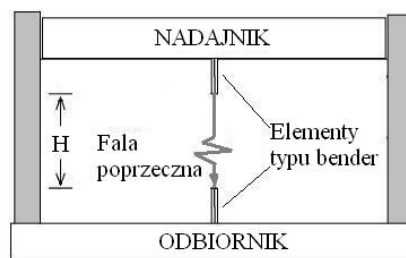
1. Zasada wyznaczenia G_{\max}

Zgodnie z teorią małych odkształceń wartość modułu ścinania G , w ośrodku o znanej gęstości ρ , można wyznaczyć, znając prędkości fali poprzecznej v_s

$$G_{\max} = \rho v_s^2 \quad (1)$$

Fala poprzeczna w próbce gruntu, w warunkach laboratoryjnych, jest generowana w sposób dynamiczny przez źródło drgań (nadajnik na rys. 1) [1]. Oznacza to, że wartości modułu ścinania G osiągną wielkość maksymalną. Stąd we wzorze (1) użyto oznaczenia G_{\max} . W celu zmierzenia prędkość fali najczęściej stosuje się elementy typu bender. Są to wielowarstwowe epoksydowo-ceramiczne płytki piezoelektryczne niewielkiej wielkości, które na skutek dostarczonego napięcia ulegają wygięciu i na odwrót – przy wyginaniu generują napięcie. Pozwala to na zastosowanie ich zarówno jako elementów generujących, jak i odbierających fale.

Prostota budowy i zasady działania elementów typu bender przyczyniła się do ich rozpowszechnienia w geotechnicznej aparaturze laboratoryjnej, głównie w aparatach trójosiowego ściskania. Typowy sposób umieszczenia piezoelementów w próbce gruntu oraz zasadę pomiaru przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Zasada pomiaru prędkości fali z użyciem elementów typu bender

Fig. 1. The idea of shear wave velocity measurement using the bender elements

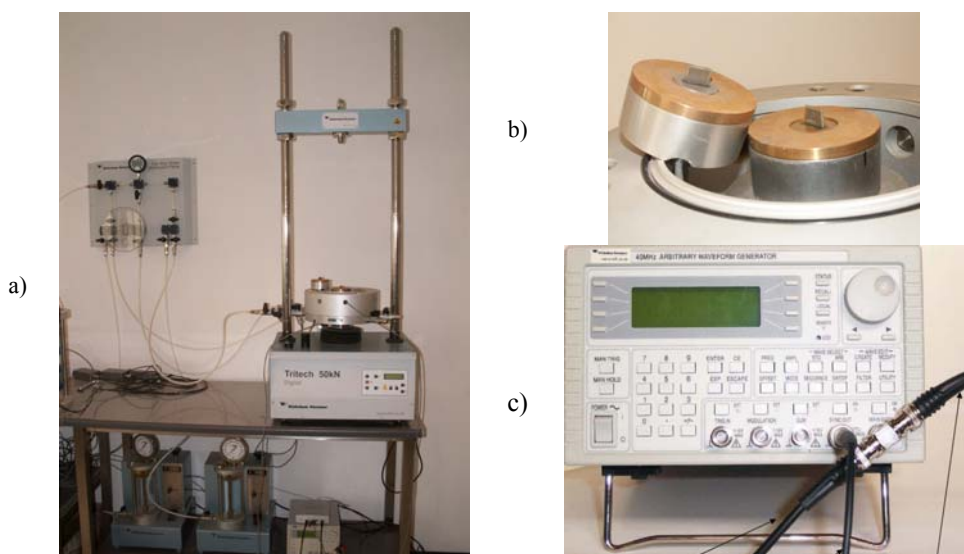
2. Pomiar modułu G_{\max} w aparacie trójosiowego ściskania

W opisywanych badaniach zastosowano aparat trójosiowy firmy Wykeham Farrance (rys. 2a) wyposażony w elementy typu bender (rys. 2b). Ścieżka pomiarowa składała się również z generatora fal (rys. 2c) oraz oscyloskopu cyfrowego, który umożliwiał bezpośrednie podpięcie do komputera przez łącze USB.

W praktyce cały pomiar sprowadzał się do odczytania czasu t dojścia fali poprzecznej do odbiornika z zastosowaniem oscyloskopów lub oscylografów. Znając odległość pomiędzy piezoelementami (por. rys. 1), jesteśmy w stanie wyznaczyć prędkość fali z podstawowej zależności

$$v_s = H/t \quad (2)$$

Oprogramowanie dołączone do wspomnianej ścieżki pomiarowej pozwalało na graficzny zapis fali generowanej i odbieranej przez piezoelementy. Sterowanie parametrami generowanej fali odbywało się na samym generatorze (rys. 2c). Przez większość próbek gruntu przepuszczono fale sinusoidalne o częstotliwościach w zakresie od 800 Hz do 10 kHz i mocy 20 Vpp każda.



Rys. 2. Aparat trójosiowy a), piezoelementy b), generator fal c)

Fig. 2. Triaxial apparatus a), bender elements b), waveform generator c)

Zarówno ścieżka pomiarowa, jak i same piezoelementy powodowały pewne trudności. Dostarczone ze wspomnianą aparaturą elementy typu bender ze względu na swoją wysokość (10 mm) nie pozwalały na badanie gruntów sypkich i spoiстых bardzo zwartych. Brak możliwości wzmocnienia odbieranego sygnału zmuszała do stosowania wyższych częstotliwości generowanej fali poprzecznej.

3. Opis prób

Poglądową lokalizację złóż na tle mapy Polski wraz z uwzględnieniem kategorii pobranych prób przedstawiono poniżej (rys. 3).



Rys. 3. Lokalizacja złóż z uwzględnieniem kategorii prób

Fig. 3. Location of deposits with the soil sample classes

Ze złoża w Płusowicach pochodzi grunt sklasyfikowany jako pył i glina pylasta o barwie jasnobrązowej, w której oprócz kwarcu występują minerały ilaste: smektyt i kaolinit. Złoże, stratygraficznie pochodzące z plejstocenu, rozciąga się na powierzchni 11,8 ha na Płaskowyżu Nałęczowskim, województwo lubelskie (por. rys. 3), i osiąga miąższość od 6 do 10 m.

Charakterystyczny jasnobrązowy il pstry ze złoża w Pogalewie Małym, na Dolnym Śląsku (por. rys. 3), pochodzi z neogenu. Składa się on głównie z kaolinitu oraz beidelitu jako składnika mineralnego drugorzędowego. Złoże, o średniej miąższości 10 m, zajmuje powierzchnię 10 ha, w północnej części Pradoliny Wrocławskiej.

Dla powyższych gruntów zawartość węglanów nie przekracza 6%, a części organicznych – 1%.

Plejstoceniński il warwowy z Murzynowa, w województwie lubuskim, zawdzięcza swoją szarą barwę głównemu składnikowi mineralnemu – kaolinitowi. Oprócz minerałów ilastych il ten wykazuje znaczną zawartość węglanów (do 20%). Złoże Murzynowo zajmuje powierzchnię około 42 ha i jest usytuowane w Kotlinie Gorzowskiej (por. rys. 3).

W złożu Złotonia, podobnie jak w Murzynowie, zalega pochodzący z plejstocenu il warwowy. Odróżnia się on jednak brązową barwą i zróżnicowaniem w składzie mineralnym. Oprócz minerałów ilastych, takich jak smektyt, zawiera znaczne ilości kwarcu i węglanów, oba dochodzące do 20%. Geograficznie złoże usytuowane jest w Dolinie Górnej Narwi, w województwie Podlaskim i rozciąga się na obszarze 9 ha (por. rys. 3).

Z wymienionych do tej pory złóż dostępne były tylko próby NU (kategorii C) – zestawienie wilgotności i stanów dla tych gruntów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Porównanie parametrów geotechnicznych dla prób NU

Rodzaj gruntu	Wilgotność naturalna	Wilgotność optymalna	Stopień plastyczności	Stan gruntu
	w_n [%]	w_{opt} [%]	I_L [-]	
Lessy (Płuszwice)	12,74	14,7	-0,65	pzw
II (Pogalewo Małe)	30,99	24,1	0,06	tpl
II pylasty (Złotoria)	26,08	21,1	0,34	pl
II pylasty (Murzynowo)	28,41	20,1	0,47	pl

Należące do gruntów organicznych gytie reprezentują osady interglacjalne eemskiego [2] wykształcone w facji jeziornej. Wypełniają one tzw. rynną żoliborską, czyli obniżenie o szerokości 300–500 m rozciągające się od Żoliborza po Okęcie (por. rys. 5) [5], na lewo-brzeżnej części Warszawy. Czarno-brunatna gytia torfiasta, o przeważającym składzie organicznym, sięgająca do głębokości 9,5 m, przechodzi stopniowo w jasnoszarą (lub wręcz zielonkawą) gytie detrytusowo-wapienną (rys. 4).



Rys. 4. Przygotowane do badań NNSy: a) gytia torfiasta, b) gytia detrytusowo-wapienna

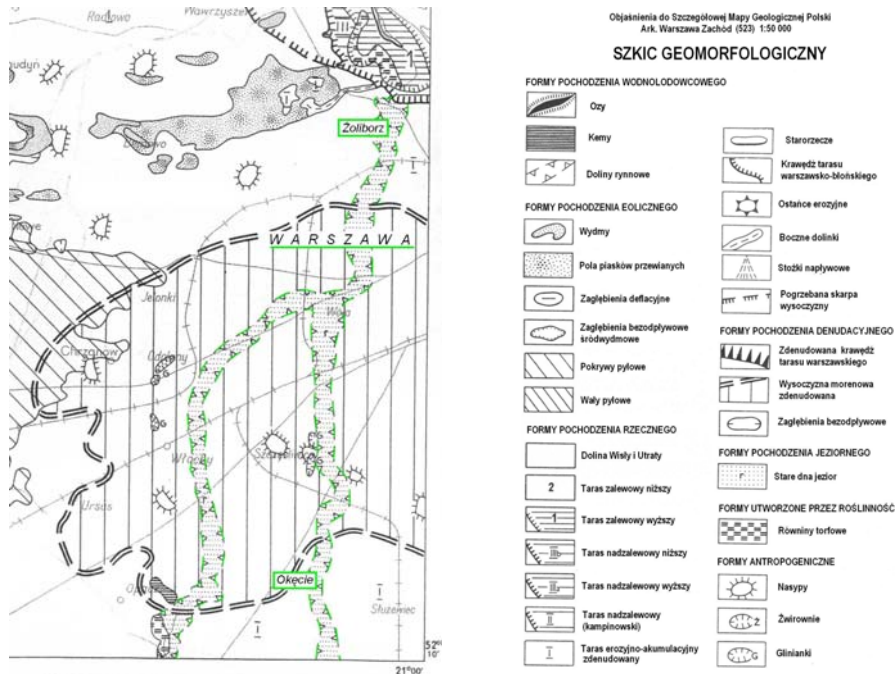
Fig. 4. Soil sample for testing: a) peaty gyttja, b) detritus-calciferous gyttja

Zestawienie wszystkich opisywanych gruntów wraz z ich klasyfikacją, pochodzeniem i kategorią prób zawarto w tab. 2 [6, 7].

Tabela 2

Zestawienie badanych gruntów

Rodzaj gruntu wg analizy makroskopowej	Nazwa wg [7] (nazwa wg [6])	Nazwa złoża	Kategoria próby
Gytia detrytusowo-wapienna	Gy (Or)	rynna żoliborska	NNS (A)
Gytia torfiasta	Gy (Or)	rynna żoliborska	NNS (A)
II	I (Cl)	Pogalewo Małe	NU (C)
Pył/glina pylasta (lessy)	G_n/G_{nz} (clSi/siCl)	Płuszwice	NU (C)
II pylasty przewarst. pyłem	G_{nz} (siCl)	Murzynowo	NU (C)
II pylasty	I (Cl)	Złotoria	NU(C)



Rys. 5. Szkic geomorfologiczny osadów rynny zoliborskiej

Fig. 5. Aggragate formation of organic soils in Warsaw

4. Analiza wyników w odniesieniu do parametrów statycznych

W przypadku prób o naturalnym uziarnieniu pomiar modułu sprężystości G_{max} przeprowadzono na pastach gruntowych o wilgotności możliwie jak najbardziej zbliżonej do naturalnej. Parametry statyczne, wyznaczone na próbach NNS, zaczerpnięto z wcześniejszych badań [3], gdzie edometryczny moduł ścisłości pierwotnej M_0 uzyskano z konsolidometru. W celu odniesienia wyników badań do wartości normowych stosowanych w projektowaniu skorzystano z korelacji i nomogramów dla znanego stopnia plastyczności [8]. Porównanie parametrów wytrzymałościowych przedstawiono w tab. 3.

Tabela 3

Statyczne parametry wytrzymałościowe – próbki NU

Rodzaj gruntu (lokalizacja)	I_L [-]	M_0 z badań [MPa]	M_0 z normy [MPa]	τ_f z badań [kPa]	c_u z normy [kPa]
Lessy (Płuszowice)	-0,65	39	47 ($I_L = 0$)	42	30 ($I_L = 0$)
II (Pogalewo)	0,06	20	38	61	60
II pylasty (Złotoria)	0,34	18	18	94	43
II pylasty (Murzynowo)	0,47	25	14	98	36

Warto zwrócić uwagę, że przy wyższych stopniach plastyczności norma daje wartości zaniżone w stosunku do wyników z badań. Zatem przy projektowaniu jesteśmy po bezpiecznej stronie. Im bardziej jednak zbliżamy się z I_L do zera, tym większe pojawiają się różnice i to w „niebezpieczną” stronę. Ponadto norma [8] nie uwzględnia ujemnych stopni plastyczności, dlatego w tab. 3 dla lessów z Płuszcówic zostały podane parametry przy zerowym I_L . Edometryczne moduły ściśliwości pierwotnej oraz kohezję odczytano z krzywej „D”, z wyjątkiem pyłów z Płuszcówic, które uznano za grunty słabe i wybrano krzywą „C”.

Aby porównać „statyczny” moduł sprężystości poprzecznej G z modułem G_{\max} (tab. 4), wyznaczonym na podstawie czasu z przejścia fali poprzecznej, skorzystano z zależności (3). Stosując podejście normowe, czyli traktując grunt jako jednorodny ośrodek sprężysty, można wyznaczyć G , przyjmując za moduł Younga moduł pierwotnego odkształcenia gruntu E_0 (praktyka często stosowana do modelowania zachowania gruntu w programach obliczeniowych)

$$G = E/2(1 + \nu) \quad (3)$$

Dla lessów normowy współczynnik Poissona wynosi 0,32 zaś dla pozostałych gruntów 0,37. Moduły pierwotnego odkształcenia, dla poszczególnych gruntów, odczytane z normy zestawiono w tab. 4.

Tabela 4

Porównanie modułu G dynamicznego i statycznego – próbki NU

Rodzaj gruntu	Moduł pierwotnego odkształcenia	Stacyjny moduł ścinania	Dynamiczny moduł ścinania
	E_0 [MPa]	G [MPa]	G_{\max} [MPa]
Less (Płuszcówice)	34	12,88	6,84
II (Pogalewo)	23	8,40	9,20
II pylasty (Złotoria)	10	3,65	25,67
II pylasty (Murzynowo)	6	2,20	5,78

Z wyjątkiem lessów dynamiczny parametr, jakim jest moduł ścinania, przewyższał wartości statyczne, co jest zgodne z teoretycznym i obserwowalnym zachowaniem gruntów. W przypadku lessów nie udało się uzyskać pasty o gęstości objętościowej i wilgotności zbliżonej do naturalnej, co odbiło się w sposób drastyczny na wynikach pomiaru G_{\max} .

Badane próbki gruntów organicznych wykazywały znaczną zmienność wilgotności oraz pomierzonego z zastosowaniem piezoelementów modułu G_{\max} (por. tab. 5). Gytia, pomimo stopnia plastyczności ($I_L = 0,55$) kwalifikującego ją do stanu miękkoplastycznego, przejawiała znaczną wytrzymałość i sprężystość, przy równoczesnej kruchości postaci.

Tak silnie zwarta gytia, przy niewielkiej (jak na ten rodzaj gruntu organicznego) wilgotności, charakteryzuje się kohezją rzędu 30 kPa i kątem tarcia około 7 stopni [4]. Jak wiadomo norma [8] nie uwzględnia gruntów organicznych, porównując jednak parametry wytrzymałościowe gytii z pozostałymi badanymi próbkami, zauważa się podobieństwo do ilów pylastych z Murzynowa. Zadziwiają jednak wysokie wartości, otrzymanych z pomiaru, dynamicznych modułów ścinania G_{\max} .

Porównanie parametrów geotechnicznych dla prób NNS

Rodzaj gruntu	Wilgotność naturalna	Gęstość objętościowa	G_{max}
	w_n [%]	ρ [t/m ³]	[MPa]
Gytia detrytusowo-wapienna	42,2	1,61	38,61
Gytia torfiasta	43,6	1,52	75,59
Gytia torfiasta	74,5	1,46	42,82

Prędkość fali poprzecznej v_s dla tych gruntów prawie czterokrotnie przewyższała pozostałe mierzone prędkości. Wpływ na to zjawisko ma znaczna, przy niewielkiej gęstości objętościowej, wilgotność.

5. Podsumowanie i wnioski

W zestawieniach ukazanych w tabelach, jak i we wszelkich podsumowaniach i analizach brano wartości średnie pomiarów i oznaczeń.

Z przedstawionych badań można wysnuć następujące wnioski:

- zbliżone wartości parametrów statycznych różnych gruntów wcale nie świadczą o podobieństwie parametrów dynamicznych dla tych gruntów,
- zauważalna zależność modułu G_{max} , wyliczanego tu ze wzoru (1), od wilgotności jest związana z zależnością gęstości objętościowej od wilgotności (znana z badania zagęszczalności metodą Proctora),
- w przypadku stosowania past gruntowych do pomiaru G_{max} trzeba ściśle przestrzegać rygoru pomiarowego i zgodności parametrów fizycznych pasty z parametrami złoża naturalnego.

Powyższe badania są wynikiem współpracy z Zakładem Geotechniki i Fundamentowania ITB, któremu autorka pragnie wyrazić swoje podziękowanie.

Literatura

- [1] Dyvik R., Madshus C., *Lab measurements of G_{max} using bender elements*, Proc. ASCE convention on advances in the art of testing soils under cyc conditions, 186-196.
- [2] Krupiński K.M., Kotarbiński J., Skompski S., *Osady jeziorne interglacjału eemskiego w Leszczynie – Wysoczyzna Płocka*, Przegląd Geologiczny vol. 54, nr 7, 2006, 632-638.
- [3] Majer E. et al., *Zasady oceny przydatności gruntów spoistych Polski do budowy mineralnych barier izolacyjnych*, pod red. Wysokińskiego L., ITB, 2007.
- [4] Rybicki S., Żurek-Pysz U., *Inżyniersko-geologiczna charakterystyka kredy jeziornej i gytii ze złóż środkowego Pomorza*, Kwartalnik Geologiczny 33, 313-328.
- [5] *Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski, Ark. Warszawa Zachód (523)*.
- [6] PN-EN ISO 14688 *Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów*.
- [7] PN-86/B-02480 *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*.
- [8] PN-81/B-03020 *Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli*.