

Wartości parametrów sprężystości w zakresie małych i średnich odkształceń iłów formacji poznańskiej z Warszawy

Mgr Małgorzata Superczyńska

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

Przed przystąpieniem do identyfikacji wartości parametrów geotechnicznych istotnym założeniem jest, aby przebieg badania realnie odzwierciedlał warunki naprężenia i odkształcenia, w jakich konstrukcja będzie współpracowała z podłożem. Ważnym postępowaniem w dziedzinie doboru wartości parametrów odkształceniowych było uwzględnienie silnej nieliniowości modułu odkształcenia w zakresie małych odkształceń, tj. poniżej 10^{-3} .

W artykule przedstawiono wartości modułów odkształcenia iłów mio-plioceńskich formacji poznańskiej, które zalegają w podłożu wielu wielkokubaturowych oraz podziemnych inwestycji w Warszawie. Na wartości parametrów mechanicznych mają wpływ warunki ich występowania, rodzaj gruntu, struktura, przebieg konsolidacji i innych procesów geologicznych, którym grunt podlegał w przeszłości. Dlatego też w skrócie scharakteryzowano ily mio-plioceńskie pod względem geologicznym.

IŁY FORMACJI POZNAŃSKIEJ

Okolo 13 milionów lat temu, w miocenie, rozpoczęła się sedimentacja iłów w zbiorniku słodkowodnym, który zajmował ok 2/3 powierzchni obecnej Polski. Trwała 9 milionów lat. Pierwotne, sedimentacyjne, położenie stropu iłów pstrych to głębokość 60 ÷ 80 m p.p.t. W rejonie Warszawy ily osiągnęły miąższość 90 ÷ 140 m [3].

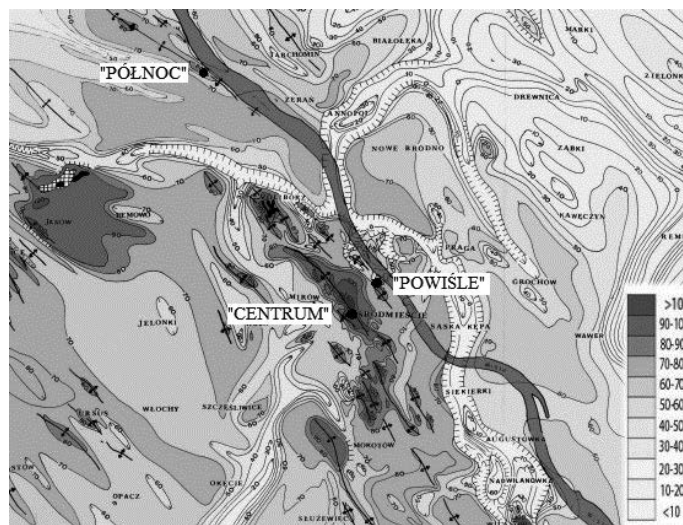
Pod względem litologicznym ily formacji poznańskiej występują jako ily, ily pylaste z przewarstwieniami pyłów, pyłów piaszczystych i piasków drobnych. W przeszłości były poddawane procesom geologicznym, które miały wpływ na stopień zróżnicowania osadów jako podłoża budowlanego. Ulegały erozji rzecznej, denudacji oraz były poddane statycznej i dynamicznej działalności lodowców, co najmniej trzykrotnie [7] i są gruntami prekonsolidowanymi. Powierzchnię stropową cechują duże morfologiczne deniwelacje – osiągające nawet do 100 m (rys. 2). Lokalnie mogą występować na powierzchni terenu (np. rejon skarpy warszawskiej) lub przykryte niewielkim nakładem osadów czwartorzędowych (np. elewacja śródmiejska – rys. 1), w dolinie Wisły bezpośrednio pod aluwiami.

Wyraźnie zaznaczają się elewacje stropu iłów wtórnie wypiętrzonych wskutek procesów glacictektonicznych oraz głębokie rynny o rozciągłości na kierunkach NNW-SSE [3, 7]. Główne zaburzenia w układzie warstw powstały wskutek transgresji lodowca, w jego strefie czołowej, gdzie krawędzie boczne lądolodu wywierały nacisk krawędziowy na progi morfologiczne pradoliny Wisły.

BADANIA PARAMETRÓW ODKSZTAŁCENIOWYCH

Próby gruntów pobrano z trzech lokalizacji w Warszawie (rys. 1). Profile geologiczne w miejscu pobrania próbek przedstawiono w tabl. 1, a parametry fizyczne tabl. 2.

W celu prawidłowego opisu zachowania się ośrodka gruntowego w danym zakresie naprężenia, konieczny jest dobór odpowiedniej metodyki badań. W przypadku projektowania głębokich posadowień, obudów wykopów, ścian podziemi czy też obudów tuneli należy rozpoznać i przeanalizować wartości parametrów sprężystych gruntów w zakresie małych naprężeń



Rys. 1. Schematyczna mapa stropu osadów mio-plioceńskich w m.n.p.m., lokalizacja badanych próbek [7], zmieniony

Tabl. 1. Profile geologiczne w miejscu pobrania próbek

Lokalizacja	Głębokość [m]	Litologia	Geneza
„Centrum”	0,0 ÷ 3,0	nasypy	grunty antropogeniczne
	3,0 ÷ 20,5	piaski drobne i pylaste, pyły	osady glacialne zastoiskowe i fluwioglacjalne
	20,5 ÷ 45,0	iły mio-plioceńskie	osady jeziorne
„Powiśle”	0,0 ÷ 8,0	nasypy	grunty antropogeniczne
	8,0 ÷ 12,0	piaski drobne i średnie	osady rzeczne
	12,0 ÷ 35,0	iły mio-plioceńskie	osady jeziorne
„Północ”	0,0 ÷ 13,0	piaski i żwiry	wodnolodowcowe lub rzeczne
	13,0 ÷ 45,0	iły mio-plioceńskie	osady jeziorne

Tabl. 2. Parametry charakteryzujące właściwości fizyczne badanych ilów [2, 4]

Numer próby	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lokalizacja	„Centrum”				„Północ”					„Powiśle”		
Głębokość próby [m p.p.t.]	22,0 ÷ 23,0	36,0 ÷ 37,0	40,0 ÷ 41,0	44,0 ÷ 45,0	16,5 ÷ 17,0	21,5 ÷ 22,0	23,9 ÷ 24,4	26,0 ÷ 26,2	35,0 ÷ 35,2	14,0 ÷ 14,4	17,0 ÷ 17,4	18,5 ÷ 19,1
											wartości średnie w profilu	
Podfrakcja Cl [%]	48	49	43	72	80	65	90	62	61	41		
Gęstość właściwa ρ_s [g/cm ³]	2,70	2,70	2,70	2,72	2,72	2,71	2,71	2,68	2,69	2,74		
Gęstość objętościowa ρ [g/cm ³]	2,11	2,09	2,08	1,97	1,96	1,95	1,86	2,07	2,10	2,05		
Wilgotność naturalna w_n [%]	16,6	17,8	16,6	24,1	28,2	28,7	35,6	20,2	18,8	27,0		
Porowatość n [%]	0,33	0,34	0,34	0,42	0,44	0,44	0,49	0,36	0,35	0,40		
Granica płynności w_L [%]	60,8	55,1	49,6	74,3	83,0	99,0	91,7	68,2	64,4	75,4		
Granica plastyczności w_p [%]	21,0	19,4	18,0	25,3	30,3	32,3	43,6	27,6	25,4	29,8		
Wskaźnik konsystencji I_C [-]	1,11	1,04	1,04	1,02	1,04	1,05	1,17	1,18	1,17	1,06		
Wskaźnik plastyczności I_p [%]	39,8	35,7	31,6	49,0	52,7	66,7	48,1	40,6	39,0	45,6		
Wskaźnik pęcznienia $I_s = w/w_L$ [-]	0,27	0,32	0,34	0,32	0,34	0,29	0,39	0,30	0,29	0,36		
Aktywność $A = I_p / (I_p - 5)$ [-]	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7	1,1	0,6	0,7	0,7	1,3		

i odkształceń tj. poniżej 10^{-3} . Na rys. 3 przedstawiono zmienność modułu sprężystości gruntu G [MPa] w zależności od zakresu naprężenia, na którym widoczna jest silna nieliniowość tego parametru w zakresie odkształceń ścinających $10^{-6} \div 10^{-3}$.

Do oceny modułów wybrano następujące metody:

- a) badania edometryczne – wartości modułów edometrycznych podano w odniesieniu do pracy gruntu w zakresach składowej pionowej naprężenia $0,1 \div 0,2$, $0,2 \div 0,4$ lub $0,4 \div 0,8$ MPa, w zależności od naprężenia pierwotnego w poziomie zalegania; wartości modułu obliczono ze wzoru:

$$E_{oed} = \frac{\delta\sigma'_v}{\delta\varepsilon_v} \quad (1)$$

gdzie:

σ'_v – składowa pionowa naprężenia,
 ε_v – odkształcenie pionowe;

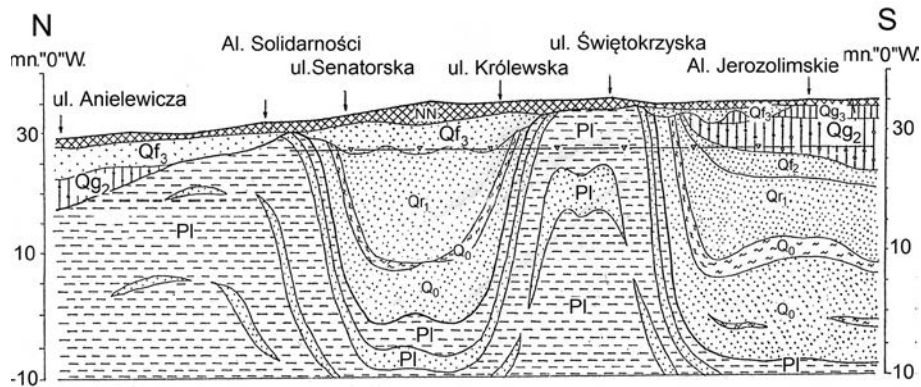
- b) badania trójosiowego ściskania – podano wartości modułów E_0 oraz E_{50} ; odczytanych z wykresów zależności

wartości $\sigma'_1 - \sigma'_3$ od wartości odkształcenia osiowego ε_v , dla odkształceń rzędu 0,1%; badanie wykonano w warunkach z odpływem (Powiśle) i bez odpływu (Północ, Centrum);

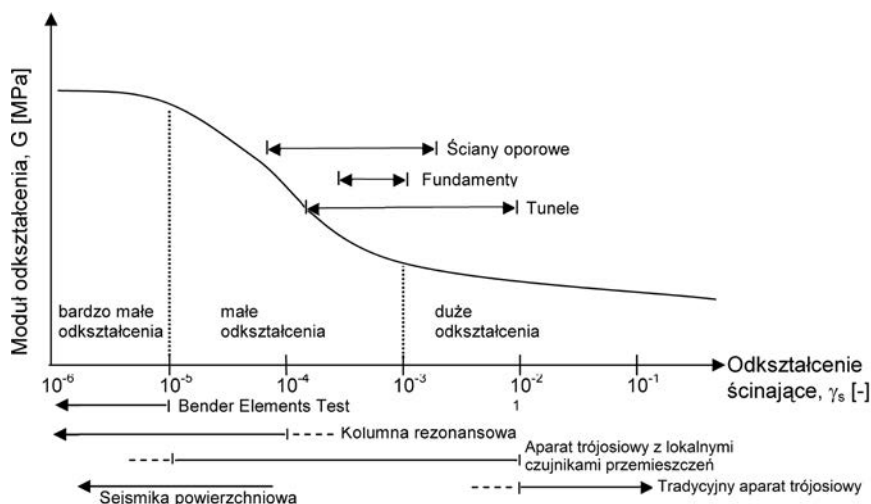
- c) badania z zastosowaniem tzw. bender elements (BES) – podano wartości modułów Younga E i modułów ścinania G_{max} , wyznaczonych po konsolidacji; moduły wyznaczone ze wzorów $E = 2\rho V_s^2(1+\nu)$ oraz $G_{max} = \rho V_s^2$, gdzie: ρ – gęstość objętościowa gruntu [g/cm³], V_s – prędkość fali poprzecznej [m/s], ν – współczynnik Poissona [-] (przyjęto wartość 0,37).

W tabl. 3 przedstawiono wartości pomierzonych modułów odkształcenia, na rys. 4 wykresy rozkładu modułów z głębokością. Wartości modułów odkształcenia E w odniesieniu do badań edometrycznych obliczono ze wzoru:

$$E = E_{oed} \left[1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right] \quad (2)$$



Rys. 2. Schematyczny przekrój geologiczny wzdłuż ul. Marszałkowskiej w Warszawie
 Pl – osady mio-plioceńskie, Q – osady czwartorzędowe, N – grunty antropogeniczne [5]



Rys. 3. Wykres nieliniowości modułu G [1, 6], zmieniony

Tabl. 3. Zestawienie wartości parametrów odkształceniowych badanych ilów uzyskanych w poszczególnych metodach badawczych

Nr próby	σ'_{v0} [MPa]	BES		TRX		Badania edometryczne								
		G_{max} [MPa]	E [MPa]	E_0 [MPa]	E_{50} [MPa]	E_{oed} w podanym zakresie naprężeń [MPa]				E w podanym zakresie naprężeń [MPa]				
						0,1 ÷ 0,2	0,2 ÷ 0,4	0,4 ÷ 0,8	0,8 ÷ 1,6	0,1 ÷ 0,2	0,2 ÷ 0,4	0,4 ÷ 0,8	0,8 ÷ 1,6	
Centrum	1	0,40	97	265	100	48	9	12	19	–	5	7	11	–
	2	0,60	125	343	51	21	8	12	17	–	4	7	10	–
	3	0,70	125	343	52	28	9	12	16	–	5	7	9	–
	4	0,75	146	399	50	39	10	13	21	–	6	7	12	–
Północ	5	0,33	76	208	33	22	25	19	18	26	14	10	10	15
	6	0,40	80	219	71	50	64	50	28	31	36	28	16	18
	7	0,48	83	228	67	52	34	27	20	31	19	15	11	17
	8	0,52	108	295	105	94	60	44	32	36	34	25	18	20
	9	0,60	125	343	74	33	46	37	42	58	26	21	24	33
Powiśle	10	0,25	64	176	64	44	5	7	11	23	3	4	6	13
	11	0,32	84	229	15	8	16	15	19	27	9	8	10	15
	12	0,34	77	210	18	25	–	–	–	–	–	–	–	–

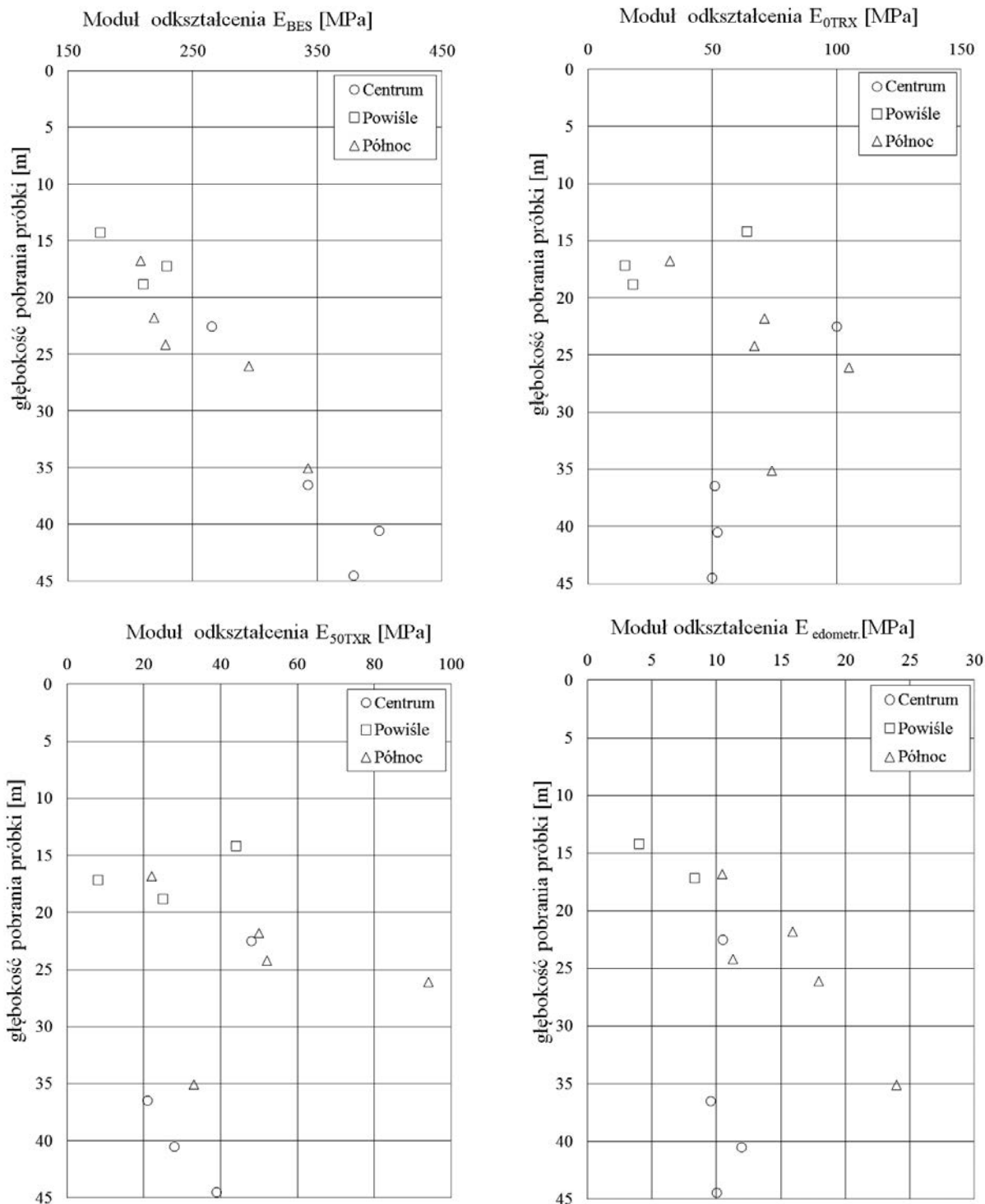
gdzie:

σ'_{v0} – naprężenie konsolidacyjne,

E – moduł Younga,

G_{max} – moduł ścinania,

E_{oed} – moduł edometryczny dla podanego zakresu naprężeń.



Rys. 4. Rozkład wartości modułów odkształcenia w zależności od głębokości pobrania próbek

PODSUMOWANIE

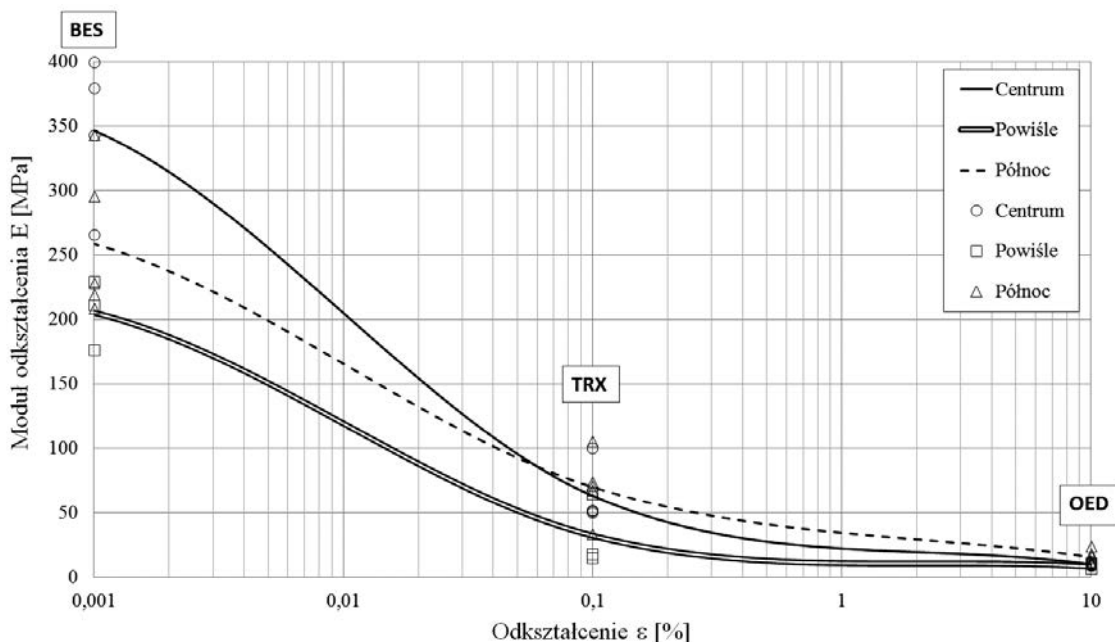
Przedstawiono wyniki badań parametrów odkształceniowych, przeprowadzonych na iltach neogeńskich o konsystencji zwartej i bardzo zwartej o $I_c = 1,02 \div 1,18$ [-], o parametrach fizycznych zestawionych w tabl. 2, pobranych w trzech lokalizacjach w Warszawie.

Pomiaru sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń dokonano z zastosowaniem przetworników piezoelektrycznych rodzaju bender, z pomiarem prędkości fal przechodzących przez

próbkę. Obecnie metoda ta jest stosowana dość powszechnie w światowych laboratoriach geotechnicznych.

W pierwszej lokalizacji – „Centrum” – ily są silnie zaburzone glacitektonicznie, zalegają pod różnej miąższości osadami lodowcowymi. Jest to rejon tzw. elewacji śródmiejskiej, gdzie główne zaburzenia powstały wskutek transgresji lodowca, w jego strefie czołowej.

W tej lokalizacji, metodą BES, otrzymano wartości modułu odkształcenia: od 265 MPa dla gruntów z głębokości 22,0 ÷ 23,0 m, do 399 MPa dla gruntów z głębokości



Rys.5. Nieliniowość modułu odkształcenia E w zależności od wartości odkształcenia ε ilów formacji poznańskiej (w wybranych lokalizacjach)

44,0 ÷ 45,0 m. Moduł E_{50} z badań w aparacie trójosiowego ściskania osiąga wartości od 21 do 48 MPa; moduł E z badań edometrycznych w zakresie naprężenia 0,1 ÷ 0,2 MPa od 4 do 6 MPa, w zakresie naprężenia 0,2 ÷ 0,4 MPa równy jest 7 MPa, w zakresie naprężeń 0,4 ÷ 0,8 MPa od 9 do 12 MPa.

Drugi poligon badawczy – „Północ” – badane grunty leżą pod nakładem osadów rzecznych i wodnolodowcowych. Przy tej lokalizacji otrzymano, metodą BES, wartości modułu odkształcenia od 208 MPa dla gruntów z głębokości 16,5 ÷ 17,0 m, do 343 MPa dla gruntów z głębokości 35,0 ÷ 35,2 m. Moduł E_{50} z badań w aparacie trójosiowego ściskania osiąga wartości od 22 do 94 MPa; moduł E z badań edometrycznych w zakresie naprężenia 0,1 ÷ 0,2 MPa od 14 do 36 MPa, w zakresie 0,2 ÷ 0,4 MPa wynoszą od 10 do 28 MPa, w zakresie 0,4 ÷ 0,8 MPa od 10 do 24 MPa, w zakresie 0,8 ÷ 1,6 MPa od 15 do 33 MPa.

Trzecia lokalizacja – „Powiśle” – to miejsce, gdzie na stropie ilów zalegają osady pochodzenia antropogenicznego i rzecznoego. Strop osadów neogeńskich zalegający kilka metrów pod poziomem terenu wskazuje na zaburzenia glaciektoniczne, a deniwelacje stropu w tym rejonie spowodowane są również działalnością erozyjną Wisły. Przy tej lokalizacji otrzymano wyniki modułu odkształcenia, metodą BES, od 176 do 229 MPa dla gruntów z głębokości od 14,0 do 19,1 m, moduł E_{50} z badań w aparacie trójosiowego ściskania osiąga wartości od 8 do 44 MPa; moduł E z badań edometrycznych, wyznaczony dla ilów z dwóch głębokości wyniósł: dla zakresu naprężenia 0,1 ÷ 0,2 MPa od 3 ÷ 9 MPa, w zakresie 0,2 ÷ 0,4 MPa 4 ÷ 8 MPa, w zakresie 0,4 ÷ 0,8 MPa 6 ÷ 10 MPa, w zakresie 0,8 ÷ 1,6 MPa 13 ÷ 15 MPa.

Wyniki badań przeprowadzonych w ilach neogeńskich potwierdzają nieliniowość wartości modułów odkształcenia w różnych zakresach odkształcenia (rys. 5).

W przypadku badań z wykorzystaniem pomiaru prędkości propagacji fali w ośrodku gruntowym, obserwuje się liniowy wzrost wartości modułu E wraz z głębokością, niezależnie od

lokalizacji (rys. 4). Wartości modułów uzyskanych innymi metodami tak wyraźnej zależności nie wykazują. Zróżnicowanie wielkości parametrów odkształceniowych można tłumaczyć na wiele sposobów np.: niejednorodnością ilów formacji poznańskiej (zmiany w litologii będące skutkiem cykliczności sedymentacji w zbiorniku neogeńskim), zaburzeniami glaciektonicznym, a także samą metodyką badawczą i jakością próbek.

Wykresy pokazane na rys. 5 wskazują jedynie na kształt krzywej opisującej nieliniowość modułów. Większe wartości zaobserwowano przy lokalizacji „Centrum”, niższe przy lokalizacji „Powiśle”, jednak rozkład wartości modułów w zakresie 10^{-3} ÷ 10% odkształcenia powinien być potwierdzony większą liczbą wykonanych badań.

LITERATURA

1. Atkinson J. H., Sallfors G.: Experimental determination of soil properties, Proceedings 10th ECSMFE, Florence, 1991, 3: 915-956.
2. Dokumentacja geologiczno-inżynierska dla budowy kolektora dla przesyłu ścieków do oczyszczalni ścieków „Czajka”, wraz z późniejszym uzupełnieniem. Geoter, 2006.
3. Frankowski Z.: Występowanie ilów formacji poznańskiej w Warszawie. Seminarium ITB Iły płoceńskie Warszawy, Warszawa 2004, 5-14.
4. Geotechnical Report for C13 Powisle Station of the central part of IInd metro line in Warsaw. Hydrogeostudio, 2010.
5. Kowalczyk D., Szymański A., Borowczyk M.: The possibility of determining the strength of heavily overconsolidated soil based on field research. Przegląd Naukowy Wydziału Melioracji i Inżynierii Środowiska, z. 12, 1996, 59-70.
6. Mair R. J.: Development in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations, Proceedings of the institution of Civil Engineers, Unwin Memorial Lecture 1992. Civil Engineering, 93, 27-41
7. Sarnacka Z.: Stratygrafia osadów czwartorzędowych Warszawy i okolic. Prace Państwowego Inst. Geologicznego CXXXVII, Warszawa 1992.