

## Zachowanie się glin lodowcowych z warszawskiego Ursynowa podczas obciążeń statycznych i dynamicznych

Ryszard Kaczyński<sup>1</sup>, Anna Bąkowska<sup>1</sup>, Kamil Kielbasiński<sup>1</sup>



R. Kaczyński    A. Bąkowska    K. Kielbasiński

**Stress-strain behaviour of glacial till from the Ursynów suburb of Warsaw under static and dynamic loading.** Prz. Geol., 58: 873–878.

*Abstract.* The stress-strain behaviour of tills under static and dynamic loadings were analyzed in the paper. Test results conducted on the tills from Ursynów area in Warsaw are presented. Extensive spectrum of advanced laboratory testing (including SEM, Row-Barden consolidometer, ring-shear apparatus, dynamic triaxial testing system) was used to determine physical, mechanical and microstructural properties of tills. Under static loadings studied tills have showed the behavior characteristic to overconsolidated soils. Parameters of residual shears strength are 40% lower comparing to maximum shear strength. Under cyclic loading of acceleration up to  $1.5 \text{ m/s}^2$  the failure

did not appear. Cyclic loading causes a reduction in shear resistance, post-cyclic shear strength is equal to 18–76% of static (monotonic) shear strength of studied tills.

**Keywords:** stress-stain behaviour, tills, static loading, dynamic loading, shear strength, residual strength, post-cyclic shear strength

Zależność między naprężeniami i odkształceniami, określana jako zachowanie się gruntów naturalnych (*stress-strain behaviour*), znacznie różni się od zachowania ośrodków idealnych, np. sprężystego, plastycznego czy nawet sprężysto-plastycznego. Zależność ta komplikuje się w sytuacji występowania obciążeń statycznych i dynamicznych (drgań).

Rozwój i powstawanie dużych aglomeracji wymuszają stały wzrost natężenia ruchu komunikacyjnego – jednego z najważniejszych źródeł obciążeń dynamicznych. W podłożu gruntowym w warunkach antropogenicznych rozchodzą się drgania, których zasięg znacznie przekracza obszar wzbudzenia. Mimo że odkształcenia podczas obciążeń dynamicznych nie muszą być duże, to ich powtarzalność wywołuje negatywne skutki.

Nawet chwilowe naprężenia i ciśnienia wody w porach powstałe w wyniku drgań mogą być wystarczająco duże dla naruszenia równowagi, zmniejszenia lub całkowitej utraty wytrzymałości (nośności) gruntu, co może doprowadzić do zniszczenia posadowionych na nim budowli. Istnieje zatem konieczność ustalenia, oprócz oddziaływania obciążeń statycznych, również wpływu obciążeń dynamicznych na zachowanie się gruntów.

Kompendium wiedzy na temat zachowania się gruntów spoistych poddanych obciążeniom dynamicznym można znaleźć w pracach: Thiers'a i Seeda (1968), Seeda i Idrissa (1971), Idrissa i in. (1978), Ishihary (1991), Kaczyńskiego (1984, 2008), Bąkowskiej (2009) oraz Jastrzębskiej (2010).

Niniejsza praca została poświęcona wpływowi statycznych i dynamicznych obciążeń na wytrzymałość i odkształcalność gruntów. Gruntami testowymi były gliny lodowcowe występujące na wysoczyźnie warszawskiej w rejonie Ursynowa. W artykule zostały wykorzystane wyniki badań uzyskane w ramach dwu projektów badawczych nr: 4T12B 06228 i 3629/B/T02/2009/37 (w trakcie realizacji) oraz pracy doktorskiej Anny Bąkowskiej. Całość obejmuje oznaczenia na 50 próbkach pobranych z 3 wierceń oraz badania polowe (CPT, DMT i sejsmiczne) w 3 ciągłych profilach.

### Geologiczne warunki występowania glin

Teren badań obejmuje wysoczyznę warszawską w rejonie Ursynowa, w szczególności obszar między ulicami: Wilanowską, Nowoursynowską i Kiedacza.

Występują tu gliny lodowcowe zlodowacenia środkowopolskiego, tworzące typowy dla tej części Warszawy zwarty kompleks o miąższości 10–12 m, podścielony zawodnionymi piaskami fluwioglacjalnymi. W obrębie kompleksu glin obserwuje się drobne przewarstwienia lub soczewki gruntów sypkich. Górną część kompleksu stanowią gliny zlodowacenia warty o miąższości przeciętnie 3–6 m, przechodzące w gliny zlodowacenia odry. Generalnie gliny warciańskie są bardziej piaszczyste, brązowo-szare, a odrzańskie – bardziej zwięzłe i ilaste, ciemnoszare (ryc. 1).

Szacuje się, że w przeszłości geologicznej, analizowane gliny przeszły w stan przekonsolidowany. Stan przekonsolidowania (historycznego)  $OCR_{\text{hist}}$  w zakresie głębokości 2–20 m p.p.t. mógł osiągnąć wartości nawet 150–350. Analizując natomiast zapamiętane obecnie obciążenie wynikające z badań laboratoryjnych, otrzymuje się  $OCR_{\text{akt}}$ :

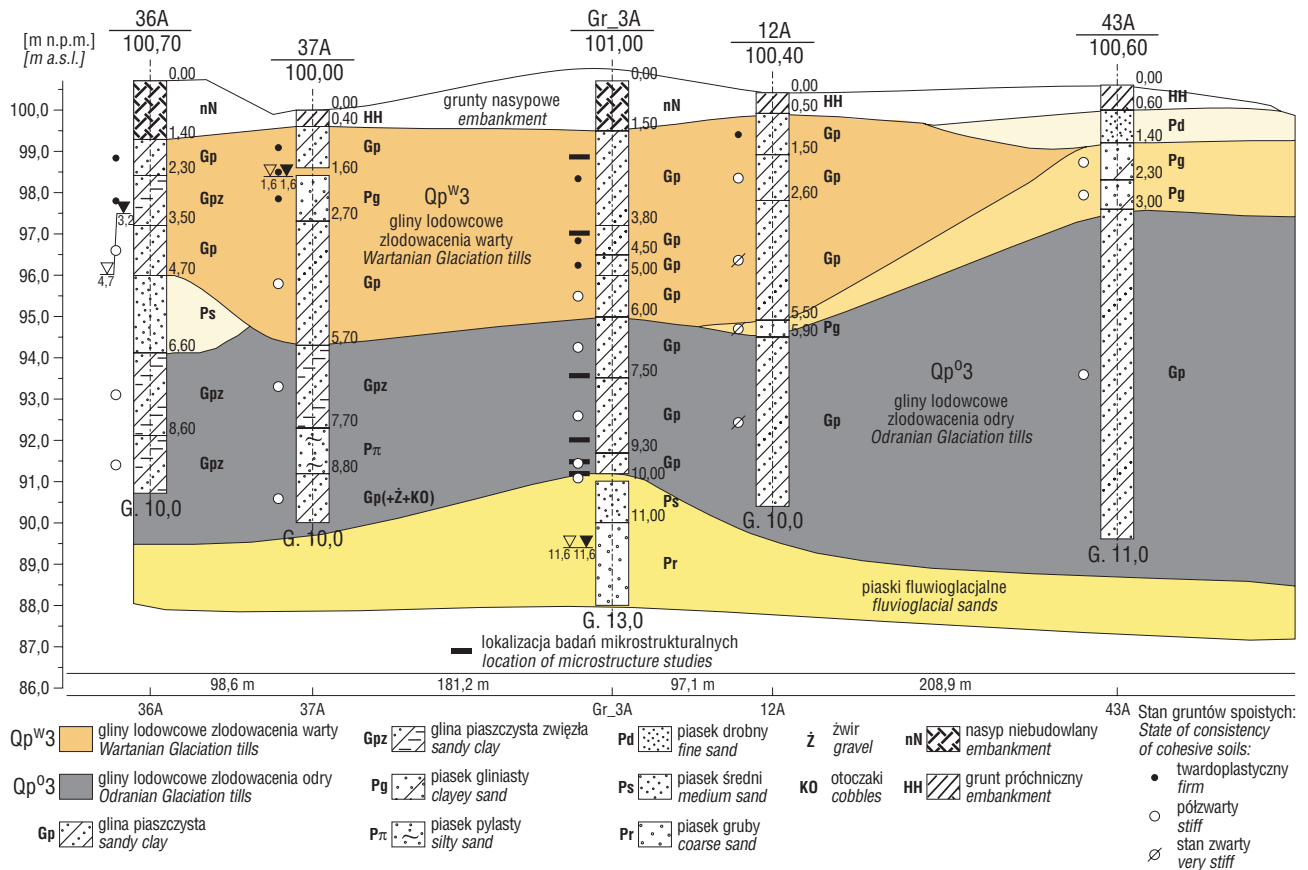
- w granicach 1–13, 4 dla zakresu do 2 MPa,
- w granicach 1–124, 32 dla zakresu do 20 MPa.

### Cechy litologiczne, mikrostruktura, skład mineralny

Badane gliny lodowcowe pod względem granulometrycznym reprezentowane są głównie przez gliny piaszczyste o zróżnicowanych zawartościach poszczególnych frakcji (tab. 1). Uogólniając, można stwierdzić, że gliny lodowcowe warty są bardziej piaszczyste i zawierają mniej glazików i otoczków niż gliny zlodowacenia odry, które mają większą zawartość frakcji ilowej.

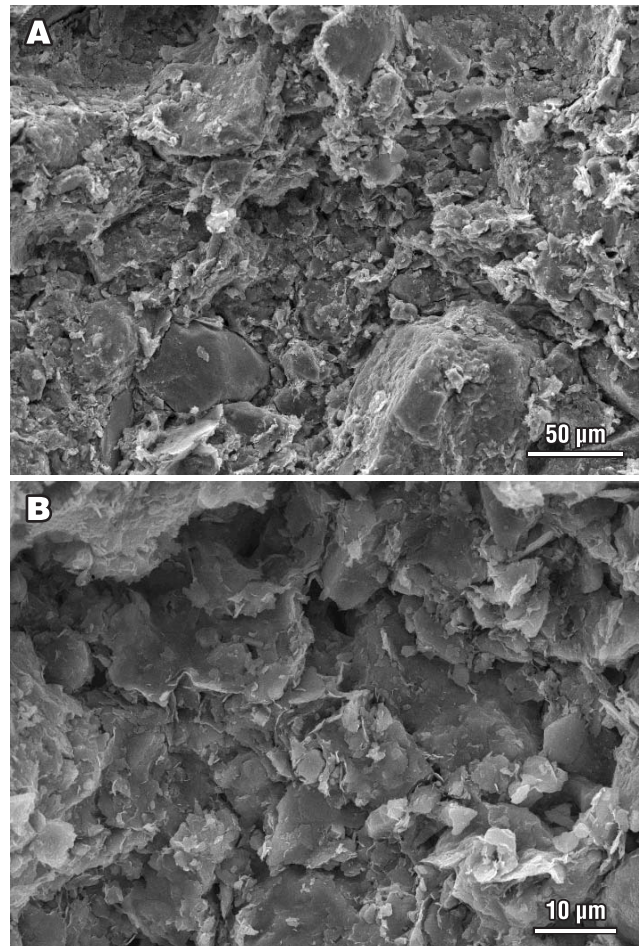
Podstawowym typem mikrostrukturalnym badanych glin jest mikrostruktura matrycowa (ryc. 2). W matrycy ilastej tkwią bezładnie rozmieszczone ziarna piaszczyste lub pylaste. Obserwuje się, że:

<sup>1</sup>Institut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; r.r.kaczyński@uw.edu.pl, anna.bakowska@uw.edu.pl, k.kielbasinski@uw.edu.pl



Ryc. 1. Przykładowy przekrój geologiczno-inżynierski w rejonie Ursynowa (Kaczyński i in., 2008a, uproszczony)  
 Fig. 1. Engineering-geological cross-section in the Ursynów area (Kaczyński et al., 2008a, simplified)

- ❑ w glinach zlodowacenia odry występuje większa liczba mikroporów, a mniejsza mezoporów w stosunku do glin zlodowacenia warty;
- ❑ minimalna, maksymalna i średnia średnica porów dla obu glin przyjmuje podobne wartości;
- ❑ wyższe wartości parametrów mikrostrukturalnych glin zlodowacenia odry występują w przypadku całkowitej i maksymalnej powierzchni porów oraz cał-



Tab. 1. Zawartość frakcji w składzie granulometrycznym glin  
 Table 1. Grain-size fraction contents of tills

Frakcja Grain-size fraction	Zlodowacenie Glaciation			
	warty Wartanian		odry Odranian	
Frakcja żwirowa Coarse fraction	0–10,	$\bar{2}$	0–4,	$\bar{2}$
Frakcja piaskowa Sand fraction	14–90,	$\bar{47}$	32–83,	$\bar{56}$
Frakcja pyłowa Silt fraction	14–47,	$\bar{22}$	8–48,	$\bar{24}$
Frakcja ilowa Clay fraction	10–23,	$\bar{14}$	5–28,	$\bar{17}$

$\bar{23}$  – średnia arytmetyczna, arithmetical average

Ryc. 2. Mikrostruktura matrycowa glin lodowcowych z rejonu Ursynowa; A – powiększenie 400-krotne; B – powiększenie 1600-krotne

Fig. 2. Matrix microstructure of tills from Ursynów area; A – magnification 400x; B – magnification 1600x

**Tab. 2. Parametry mikrostrukturalne glin (badania ilościowe w SEM)**

Table 2. Microstructural parameters of till (SEM quantitative tests)

Parametr Parameter	Zlodowacenie Glaciation					
	wartę Wartanian		odry Odranian		*środkowopolskie *Middle Polish	
Porowatość Porosity [%]	9,4–27,7,	$\overline{23,8}$	20,0–30,6,	$\overline{22,5}$	19,6–37,6,	$\overline{31,5}$
Liczba porów $N \times 10^3$ Number of pores	655–1849,	$\overline{1162}$	965–2451,	$\overline{1730}$	6–794,	$\overline{154}$
Całkowita powierzchnia $S \times 10^3$ Total pore area [ $\mu\text{m}^2$ ]	1802–6887,	$\overline{3929}$	1879–11452,	$\overline{4874}$	22–3327,	$\overline{769}$
Średnia powierzchnia $S_{av}$ Average pore area [ $\mu\text{m}^2$ ]	1,3–10,5,	$\overline{4,5}$	1,0–8,8,	$\overline{3,2}$	0,1–19,0,	$\overline{4}$
Całkowity obwód Pt Total pore perimeter [ $\mu\text{m}$ ]	3557–6589,	$\overline{5153}$	4137–11072,	$\overline{7372}$	67–5723,	$\overline{1061}$
Średni obwód $P_{av}$ Average pore perimeter [ $\mu\text{m}$ ]	3,1–7,5,	$\overline{5}$	2,7–7,5,	$\overline{4,5}$	1,2–14,5,	$\overline{6,4}$
Średnia średnica $D_{av}$ Average pore diameter [ $\mu\text{m}$ ]	0,36–0,79,	$\overline{0,56}$	0,37–0,82,	$\overline{0,54}$	0,17–2,15,	$\overline{0,87}$
Średni współczynnik formy $K_{fav}$ Average form index [–]	0,393–0,504,	$\overline{0,469}$	0,377–0,506,	$\overline{0,452}$	0,416–0,609,	$\overline{0,47}$
Mikropory Micropores [%]	7,6–33,6,	$\overline{18,4}$	4,6–43,0,	$\overline{22,6}$	–	–
Mezopory Mesopores [%]	66,4–92,4,	$\overline{81,6}$	57,0–95,4,	$\overline{77,4}$	–	–

 $\overline{23}$  – średnia arytmetyczna, \*wg Trzczińskiego (1998) dla glin zlodowacenia środkowopolskiego z całej Polski $\overline{23}$  – arithmetical average, \*by Trzcziński (1998) for Middle Polish Glaciation tills from Poland area

kowitego i maksymalnego obwodu porów, a niższe dla średniej powierzchni i średniego obwodu porów.

Wyniki szczegółowych ilościowych badań mikrostrukturalnych w skaningowym mikroskopie elektronowym SEM przedstawia tabela 2.

Analizowane gliny charakteryzują się zróżnicowanym składem mineralnym. Przeważającym składnikiem jest kwarc, którego zawartość dochodzi do 90%. Równie częstym minerałem są węglany i związki żelaza. Z minerałów ilastych występują głównie beidelit i illit, podrzędnie kaolinit. Zbadane gliny w aparacie Labsys TG-DTA DSC firmy Setaram można scharakteryzować następująco:

- gliny zlodowacenia warty:  $B^{1-13} > I^{0-8} > K^{0-4}$
- gliny zlodowacenia odry:  $I^{2-19} > B^{2-16} > K^{0-8}$  lub  $B^{2-20} > K^{0-3} > I^{0-5}$ .

Stwierdzone zróżnicowanie składu mineralnego wynika prawdopodobnie z udziału procesów wietrzeniowych, którym podlegały gliny zlodowacenia warty.

### Geologiczno-inżynierskie właściwości glin lodowcowych

Podstawowe właściwości badanych glin Ursynowa wykazują wyraźne różnice w stosunku do parametrów glin lodowcowych z obszaru całej Warszawy. Generalnie, gliny Ursynowa są mniej wilgotne i bardziej skonsolidowane. Średni stopień plastyczności wynosi  $< 0$ , a średni wskaźnik konsystencji  $> 1$ . Porowatość całkowita glin wynosi średnio 25–26% i jest bardzo bliska porowatości efektywnej. Badane gliny charakteryzują się niepełnym nasyceniem o stopniu wilgotności średnio 0,86, a w stanie powietrzno-suchym szybko ulegają rozmakaniu (100% w ciągu 24 godzin). Gliny zlodowacenia odry i warty w stanie naturalnym wykazują niewielkie pęcznienie do 4% i ciśnienie

pęcznienia do 15 kPa oraz niewielkie ciśnienia ssania, nieprzekraczające 100 kPa. Podstawowe właściwości fizyczne badanych glin zestawiono w tabeli 3.

**Tab. 3. Podstawowe właściwości fizyczne glin lodowcowych z Ursynowa**

Table 3. Physical properties of Ursynów tills

Parametr Parameter	Zlodowacenie Glaciation			
	wartę Wartanian		odry Odranian	
Gęstość objętościowa Volume density [ $\text{Mg}/\text{m}^3$ ]	2,11–2,25, *1,43–2,24,	$\overline{2,19}$ * $\overline{2,09}$	2,09–2,29, *1,78–2,26,	$\overline{2,20}$ * $\overline{2,11}$
Wilgotność naturalna Natural moisture content [%]	9,1–14,3, *7,24–26,6,	$\overline{11,6}$ * $\overline{14,1}$	9,1–16,6, *7,0–98,0,	$\overline{11,9}$ * $\overline{13,8}$
Granica plastyczności Plastic limit [%]	12,2–14,4, *9,2–23,6,	$\overline{12,8}$ * $\overline{11,7}$	10,7–17,3, *9,4–16,5,	$\overline{12,0}$ * $\overline{10,9}$
Granica płynności Liquid limit [%]	19,–36,9, *10,1–53,1,	$\overline{25,5}$ * $\overline{24,1}$	18,9–48,1, *17,0–46,3,	$\overline{25,0}$ * $\overline{23,4}$
Wskaźnik plastyczności Plasticity index [–]	6,7–22,5, *2,7–29,5,	$\overline{12,7}$ * $\overline{12,3}$	6,7–30,8, *3,3–31,4,	$\overline{13,0}$ * $\overline{12,5}$
Stopień plastyczności Liquidity index [–]	–0,29–0,17, *0,0–0,79,	$\overline{-0,01}$ * $\overline{0,26}$	–0,27–0,21, *–0,71–0,45,	$\overline{-0,03}$ * $\overline{0,15}$
Porowatość Porosity [%]	21–26,	$\overline{25}$	20–30,	$\overline{23}$

 $\overline{23}$  – średnia arytmetyczna, \*wg Atlasu geologiczno-inżynierskiego Warszawy (2000) dla glin z całej Warszawy $\overline{23}$  – arithmetical average, \*by Atlas geologiczno-inżynierski Warszawy (2000) for tills from Warsaw area

### Zachowanie się glin w warunkach statycznych obciążeń

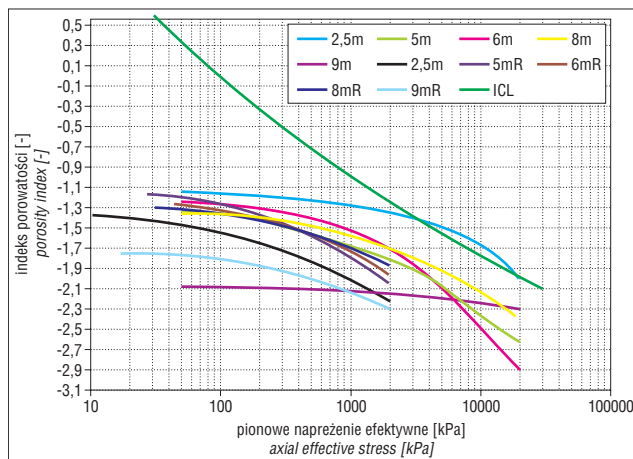
Badania zachowania się glin w warunkach statycznych przeprowadzono w zakresie oznaczenia parametrów:

- ścisłości w konsolidometrach (Rowe'a-Bardena – KR i w wysokociśnieniowym prototypie – KW),
- wytrzymałości na ścinanie (w aparacie skrzynkowym, trójosiowym i skrętnym *ring shear*).

**Tab. 4. Moduły konsolidometryczne glin lodowcowych**  
Table 4. Consolidation modulus of tills

Moduł konsolidometryczny [MPa] <i>Consolidation modulus</i>	Złodowacenie <i>Glaciation</i>			
	warto <i>Wartanian</i>		odry <i>Odranian</i>	
Gęstość objętościowa <i>Volume density</i> [Mg/m <sup>3</sup> ]	10–24,	$\bar{17}$	12–28,	$\bar{19}$
Wilgotność naturalna <i>Natural moisture content</i> [%]	25–75,	$\bar{47}$	25–140,	$\bar{65}$

$\bar{23}$  – średnia arytmetyczna, *arithmetical average*



**Ryc. 3.** Krzywe ścisłości znormalizowane względem indeksu porowatości na tle referencyjnej krzywej ICL

**Fig. 3.** Compression lines normalized by porosity index against the reference ICL curve

**Tab. 5. Spójność i kąt tarcia wewnętrznego dla glin Ursynowa i całej Warszawy**

Table 5. Cohesion and angle of internal friction for Ursynów till and Warsaw till

Wytrzymałość na ścinanie <i>Shear strength</i>		Złodowacenie <i>Glaciation</i>			
		warto <i>Wartanian</i>		odry <i>Odranian</i>	
Ursynów <i>Ursynów</i>	Spójność <i>Cohesion</i> [kPa]	30–136,	$\bar{71}$	5–120,	$\bar{85}$
	Kąt tarcia wewnętrznego <i>Angle of internal friction</i> [°]	20–35,	$\bar{30}$	20–36,	$\bar{38}$
Warszawa <i>Warsaw</i>	Spójność <i>Cohesion</i> [kPa]	*9–90,	$\bar{38}$	*5–170,	$\bar{54}$
	Kąt tarcia wewnętrznego <i>Angle of internal friction</i> [°]	*2–42,	$\bar{13}$	*2–32,	$\bar{17}$

$\bar{23}$  – średnia arytmetyczna, \*wg *Atlasu geologiczno-inżynierskiego Warszawy* (2000) dla glin z całej Warszawy

$\bar{23}$  – *arithmetical average*, \*by *Atlas geologiczno-inżynierski Warszawy* (2000) for tills from Warsaw area

Analiza ścisłości dla badań KR była przeprowadzona w zakresie obciążeń do 2 MPa, a w badaniach KW – do 20 MPa. Stan skonsolidowania glin określiły wskaźniki przekonsolidowania OCR i uplastycznienia YSR. Natomiast podatność na ścisłość scharakteryzowały moduły konsolidometryczne (tab. 4). Krzywe ścisłości uzyskane z konsolidometrów względem indeksu porowatości na tle referencyjnej krzywej przedstawiono na rycinie 3.

Badania wytrzymałości na ścinanie (tab. 5) były interpretowane jako:

- wytrzymałość maksymalna (z momentów zniszczenia) na podstawie badania w aparacie skrzynkowym,
- wytrzymałość rezydualna (z długiej drogi ścinania lub z wielokrotnych ścięć) na podstawie badania w aparacie *ring shear*.

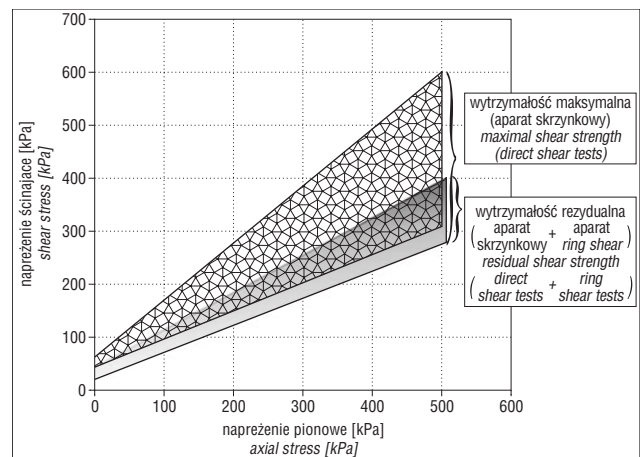
Badania wytrzymałości rezydualnej glin wykazują, że podczas długotrwałego ścinania następuje zmniejszenie spójności o 40–50% w stosunku do spójności określonej w badaniach wytrzymałości maksymalnej przy dość podobnej wartości kąta tarcia wewnętrznego (ryc. 4). Funkcje naprężenie-odkształcenie  $\sigma = f(\epsilon)$  uzyskane w badaniach statycznych są typowe jak dla gruntów przekonsolidowanych. Po przekroczeniu maksymalnej wytrzymałości, w miarę wzrostu odkształcenia obserwuje się zmniejszenie wartości oporu na ścinanie, które nie kontynuuje się nieograniczenie, a osiąga określoną minimalną rezydualną wartość (ryc. 5).

### Zachowanie się glin w warunkach dynamicznych obciążeń

W badaniach w zakresie małych odkształceń, przy zastosowaniu standardowej komory trójosiowej wyposażonej w zestaw BES (*Bender Elements System*) do badań parametrów sprężystych dla glin z rejonu Ursynowa otrzymano:

- moduł Younga  $E = 235\text{--}935$  MPa,
- moduł ścinania  $G = 81\text{--}331$  MPa,
- współczynnik Poissona  $V = 0,21\text{--}0,45$ .

Badania dynamiczne w zakresie dużych odkształceń przeprowadzono w aparacie trójosiowego ściskania DYN-TTS (*Dynamic Triaxial Testing System*) firmy GDS Ltd (ryc. 6). Zastosowano (symulowano) drgania o sinusoidalnym kształcie fali o częstotliwości 10 Hz i stałej amplitudzie przemieszczenia (*axial displacement control*).



**Ryc. 4.** Porównanie wytrzymałości maksymalnej i rezydualnej glin lodowcowych z rejonu Ursynowa

**Fig. 4.** Comparison of maximal shear strength and residual shear strength for tills from Ursynów area

Założone parametry amplitudy pozwoliły zasymulować drgania o przyspieszeniach maksymalnych (maksymalnej intensywności drgań)  $1,5 \text{ m/s}^2$ , pomierzonych w sąsiedztwie Trasy Siekierkowskiej (współczynnik sejsmiczności do 0,15), oraz przyspieszeniach mniejszych od maksymalnych (tab. 6). Wszystkie badania były wykonane w warunkach bez drenażu, po wstępnej konsolidacji (przy naprężeniu efektywnym 100, 200 i 400 kPa).

Podczas obciążeń dynamicznych następuje wzrost ciśnienia wody w porach, a tym samym efektywna wytrzymałość zmniejsza się. Generacja ciśnienia wody w porach wzrasta z liczbą przyłożonych cykli. W przeprowadzonych badaniach przy symulacji 200 000 cykli obciążeń dynamicznych o intensywności obserwowanej w terenie nie uzyskano zniszczenia gruntu w fazie obciążeń dynamicznych. Po przyłożeniu cykli obciążeń dynamicznych doprowadzono do zniszczenia już w warunkach statycznego obciążenia (ze stałym przyrostem odkształcenia), określając wytrzymałość postdynamiczną.

Wartość parametru B wg Skemptona badanych próbek glin była równa 0,86–0,95. Przykładowe zachowanie się analizowanych glin podczas obciążeń dynamicznych przedstawiono na rycinie 7, a uzyskane wyniki wpływu

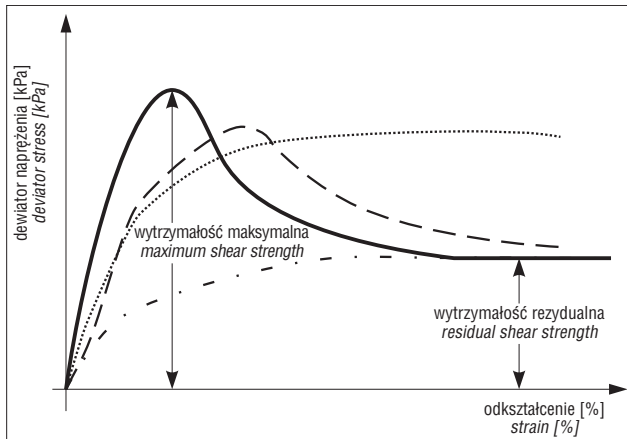
obciążeń dynamicznych na wartości wytrzymałości na ścianie (kąta tarcia wewnętrznego i spójność) w warunkach naprężeń efektywnych – w tabeli 6.

Wpływ obciążeń dynamicznych na stateczność skarpy ursynowskiej przedstawiono wcześniej w pracach Kaczyńskiego (2008b, c) oraz Tuchołki i in. (2008).

## Wnioski

Geologiczno-inżynierskie właściwości glin z warszawskiego Ursynowa są bardzo zróżnicowane, współczynnik zmienności waha się od 0,05 do powyżej 1. Zmienność właściwości glin zlodowacenia warty jest przeważnie większa od zmienności parametrów glin zlodowacenia odry. Badane gliny są w większości twardoplastycznymi lub półzwałtymi przekonsolidowanymi glinami piaszczystymi. Na tle glin całej Warszawy badane gliny charakteryzują się niższą wilgotnością, silniejszym skonsolidowaniem oraz znacznie większymi wartościami spójności i kąta tarcia wewnętrznego.

Badane gliny charakteryzują się przede wszystkim mikrostrukturą matrycową, względem glin środkowopolskich z obszaru Polski wykazują średnio niższe wartości porowatości i średniej średnicy porów, a wyższe – liczby porów oraz ich całkowitego obwodu i całkowitej powierzch-



Ryc. 5. Zachowanie się glin lodowcowych w warunkach obciążeń statycznych

Fig. 5. Stress-strain behavior of tills under static loadings



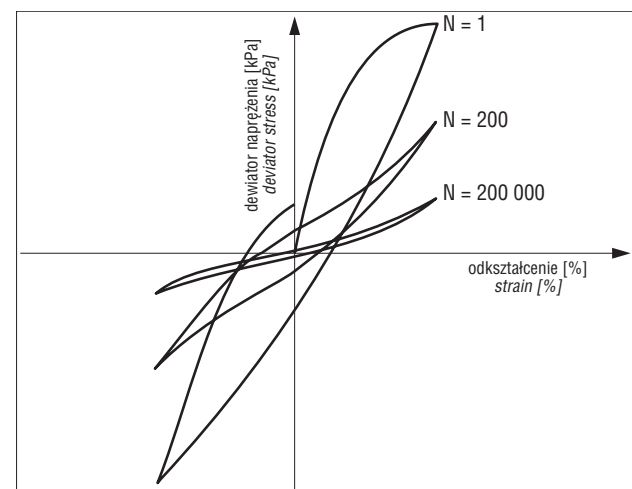
Ryc. 6. Aparat DYNNTTS; po lewej – sterowniki ciśnienia i objętości wody i powietrza; po prawej – komora trójosiowa. Fot. A. Bąkowska

Fig. 6. Dynamic Triaxial Testing System; on the left – pore pressure controllers and air pressure controller; on the right – triaxial cell. Photo by A. Bąkowska

Tab. 6. Wpływ obciążeń dynamicznych na spójność i kąt tarcia wewnętrznego na podstawie badania w DYNNTS (Bąkowska, 2009)

Table 6. Effect of cyclic loading on cohesion and angle of internal friction based on the DYNNTS test results (Bąkowska, 2009)

Rodzaj badania Type of test	Przyspieszenie drgań [m/s <sup>2</sup> ] Acceleration of vibration	Spójność efektywna [kPa] Effective cohesion	Efektywny kąt tarcia wewnętrznego [°] Effective angle of internal friction
Statyczne Static	0	35	30
Postdynamiczne Post-cyclic	0,4	4	34
	1,5	0	45



Ryc. 7. Zachowanie się glin lodowcowych w N-tym cyklu obciążenia dynamicznego w badaniu ze stałą amplitudą przemieszczenia drgań

Fig. 7. Stress-strain behaviour of till under N cycle of cyclic loading in the axial displacement control test

chni. Wśród minerałów ilastych wyróżnia się beidelit, illit i kaolinit.

W badaniach laboratoryjnych i polowych w przypadku analizowanych glin lodowcowych uzyskano wyraźną zbieżność co do kierunku zmian właściwości (parametrów), różnice dotyczą wartości ilościowych.

Gliny lodowcowe z Ursynowa podczas statycznych obciążeń zachowują się jak grunty przekonsolidowane. Wykazują wysoką wytrzymałość i małą odkształcalność. Gliny zlodowacenia warty charakteryzują się mniejszą wytrzymałością i większą odkształcalnością w porównaniu z glinami zlodowacenia odry. Parametry wytrzymałości rezydualnej są stosunkowo wysokie, tylko o 40% niższe od parametrów wytrzymałości maksymalnej.

Badane gliny lodowcowe wykazują *ilopodobny* typ zachowania (*clay-like behaviour*) pod wpływem obciążeń dynamicznych (Bąkowska, 2009). Wzrost ciśnienia wody w porach prowadzi do znacznego spadku naprężeń efektywnych, co powoduje spadek wytrzymałości na ścinanie. Jednak przy intensywności drgań nieprzekraczającej  $1,5 \text{ m/s}^2$  nie obserwuje się całkowitego zniszczenia struktury glin.

Obciążenia dynamiczne powodują znaczny spadek wytrzymałości glin. Wytrzymałość postcykliczna stanowi 20–80% ich wytrzymałości statycznej i maleje wraz ze wzrostem intensywności i liczby przyłożonych obciążeń, najmniejszy spadek wytrzymałości zachodzi w pierwszych 20 000 cyklach obciążeń (Bąkowska, 2009). Obciążenia dynamiczne powodują przede wszystkim spadek spójności badanych glin.

Wyraźna zmiana stanu naprężeń oraz parametrów wytrzymałościowych glin lodowcowych w wyniku oddziaływania obciążeń dynamicznych wskazuje, że grunty występujące w zasięgu oddziaływania drgań wywołanych ruchem komunikacyjnym można uznać za grunty przekształcone antropogenicznie.

## Literatura

- Atlas geologiczno-inżynierski Warszawy. Frankowski Z. & Wysokiński L. (red.), 2000, Arch. CAG, Warszawa.
- BAKOWSKA A. 2009 – Zachowanie się glin lodowcowych rejonu Warszawa-Służew pod wpływem obciążeń dynamicznych. Praca doktorska, Uniw. Warsz., Warszawa.
- IDRISS L.M., DOBRY Y.R. & SINGH R.D. 1978 – Nonlinear behaviour of soft clays during cycling loading conditions. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 104: 1427–1447.
- ISHIHARA K. 1991 – Liquefaction and flow failure during earthquakes. Geotechnique, 43: 351–413.
- JASTRZEBSKA M. 2010 – Badania zachowania się gruntów spoistych poddanych obciążeniom cyklicznym w zakresie małych odkształceń. Monografia. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- KACZYŃSKI R. 1984 – Zachowanie się spoistych gruntów zwałowych pod obciążeniami dynamicznymi. Biul. Geol. Uniw. Warsz., 31: 195–246.
- KACZYŃSKI R., BARAŃSKI M., BAKOWSKA A., BOROWCZYK M., GAWRIUCZENKOW I., KIELBASIŃSKI K., KRAUŻLIŚ K., LASKOWSKI K., PIETRZYKOWSKI P., SZCZEPAŃSKI T., TRZCIŃSKI J., WÓJCIK E. & ZAWRZYKRAJ P. 2008a – Stan skonsolidowania, mikrostruktury glin zlodowacenia środkowopolskiego rejonu Warszawa-Służew na tle ich geologiczno-inżynierskich właściwości. Pr. Bad. nr: 4T12B 06228.
- KACZYŃSKI R., BAKOWSKA A. & KIELBASIŃSKI K. 2008b – Warunki geologiczno-inżynierskie w rejonie kościoła św. Katarzyny w Warszawie. Acta Sci. Pol., Architektura, 7: 19–26.
- KACZYŃSKI R., BAKOWSKA A. & KIELBASIŃSKI K. 2008c – Analiza stateczności zbocza w rejonie kościoła św. Katarzyny w Warszawie z uwzględnieniem obciążeń dynamicznych. Acta Sci. Pol., Architektura, 7: 27–37.
- SEED H.B. & IDRISS L.M. 1971 – Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 97: 1249–1273.
- THIERS G.R. & SEED H.B. 1968 – Cyclic strain-stress characteristics of clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, 94: 555–569.
- TUCHOŁKA P., KIELBASIŃSKI K. & MIESZKOWSKI R. 2008 – Tracing seismic surface waves induced by road traffic in urban environment example of St. Catherine's church hill in Warsaw. Geologija, 50: S79–S84, Vilnius.
- TRZCIŃSKI J. 1998 – Mikrostruktury a właściwości geologiczno-inżynierskie glin lodowcowych. Praca doktorska, Uniw. Warsz., Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 26.06.2010 r.

Po recenzji akceptowano do druku 26.07.2010 r.