

WPŁYW OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH NA WYTRZYMAŁOŚĆ GLIN LODOWCOWYCH NA PRZYKŁADZIE GLIN ZŁODOWACENIA WARTY REJONU WARSZAWA-SŁUŻEW

THE EFFECT OF DYNAMIC LOADINGS ON THE SHEAR STRENGTH OF WARTANIAN GLACIATION TILLS FROM WARSAW-SŁUŻEW AREA

ANNA BĄKOWSKA¹

Abstrakt. Przedstawiono wpływ obciążeń dynamicznych na zmianę wytrzymałości glin lodowcowych zlodowacenia warty z poletka Nowoursynowska z Warszawy. Badania laboratoryjne w warunkach obciążeń statycznych i dynamicznych wykonano na próbkach o strukturze nienaruszonej w dynamicznym aparacie trójosiowego ściskania DYNNTS (electromechanical dynamic triaxial testing system). Próbki gruntu poddano dwukierunkowym obciążeniom dynamicznym o sinusoidalnym kształcie fali, częstotliwości 10 Hz i stałej amplitudzie przemieszczenia osiowego (badanie typu displacement control). Spadek naprężeń efektywnych, wywołany generacją ciśnienia porowego w fazie obciążeń dynamicznych, prowadzi do znacznego osłabienia gruntu. Postdynamiczna wytrzymałość glin lodowcowych stanowi od 21 do 76% ich wytrzymałości statycznej.

Słowa kluczowe: gliny lodowcowe, obciążenia cykliczne, badania trójosiowego ściskania, wytrzymałość na ścinanie, wytrzymałość postdynamiczna.

Abstract. The paper presents the result of series of laboratory monotonic and cyclic triaxial tests carried out to study the effect of cyclic loading on the shear strength of till deposits from Nowoursynowska testing field in Warsaw. Electromechanical dynamic triaxial testing system (DYNNTS) was used to investigate the undrained shear strength of undisturbed soil samples. The till samples were subjected to two-way cyclic loading with 10 Hz frequency under displacement control condition. An excess pore water pressure, due to low permeability of tills, is likely to be generated under cyclic loading and consequently the post-cyclic shear strength decreases when the effective stress gets reduced. Cyclic loading causes a substantial reduction in shear strength of tills. Post-cyclic shear strength of studied till is equal to 21–76% of its static shear strength.

Key words: tills, cyclic loading, triaxial test, shear strength, post-cyclic shear strength.

WSTĘP

W sytuacji stałego wzrostu natężenia ruchu komunikacyjnego na obszarach miejskich, przy równoczesnym zwiększaniu gęstości zabudowy tych obszarów, istnieje potrzeba oceny wpływu obciążeń dynamicznych na wytrzymałość i odkształcalność gruntów stanowiących podłoże budowlane.

Drgania rozchodzące się w ośrodku gruntowym, wywołując cykliczną zmianę stanu naprężeń, prowadzą do powstania zjawisk specyficznych, nie spotykanych w przypadku obciążeń uznawanych za statyczne (obciążenie o stałym kierunku i monotonicznie wzrastającej wartości). Podczas ob-

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; anna.bakowska@uw.edu.pl

ciążeń dynamicznych same odkształcenia nie muszą być duże, aby powtarzalność przemieszczeń cząstek gruntu wskutek drgań powodowała dodatkowe naprężenia, które poza obciążeniami statycznymi (pierwotnymi, od budowli) musi przeniesić grunt. Chwilowe naprężenia i ciśnienia wody w porach gruntu mogą być dostatecznie duże dla naruszenia równowagi, zmniejszenia lub całkowitej utraty wytrzymałości gruntu, co pociąga za sobą dodatkowe osiadanie i znaczne zmniejszenie nośności podłoża budowlanego, prowadząc tym samym do awarii lub wręcz zniszczenia obiektu inżynierskiego.

Wyniki badań pokazują, że grunty spoiste poddane obciążeniom dynamicznym stają się przeważnie bardziej odkształcalne i mniej wytrzymałe (m.in. Seed, Chan, 1966;

Idriss i in., 1978; Kaczyński, 1987; Vucetic, Dobry, 1990; Rao, Panda, 1999; Jastrzębska, 2010). Niektóre grunty spoiste ulegają zniszczeniu w fazie obciążeń dynamicznych (Voznesensky, Nordal, 1999), w przypadku innych obserwowana jest redukcja wytrzymałości na ścinanie (Andersen, 1976; Erken, Ulker, 2007; Bąkowska, 2008, 2009).

W artykule przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań nad wpływem obciążeń dynamicznych na wytrzymałość glin lodowcowych z rejonu Warszawy. Prace polowe i laboratoryjne zostały wykonane w ramach dwóch projektów badawczych: nr 4 T12B 062 28 i nr 3629/B/T02/2009/37 (w trakcie realizacji), ponadto były współfinansowane ze środków Mazowieckiego Stypendium Doktoranckiego oraz środków Dziekana Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego.

MATERIAŁ BADAWCZY I METODYKA BADAŃ

Badaniom poddano próbki glin lodowcowych zlodowacenia warty, pobranych z głębokości od 2,5 do 4 m z poletka badawczego Nowoursynowska z rejonu Warszawa-Służew. Gliny zlodowacenia warty stanowią bezpośrednie podłoże budowlane w przeważającej części tego obszaru, ponadto ich występowanie w górnej części profilu sprawia, że są narażone na wszelkiego rodzaju oddziaływania powierzchniowe, a więc także drgania parasejsmiczne wywołane ruchem komunikacyjnym.

Badane gliny są przekonsolidowanymi, twaroplastycznymi i półzwartymi glinami piaszczystymi, charakteryzującymi się wysoką gęstością objętościową, niską porowatością, dużą zawartością frakcji piaskowej (tab. 1). Dominującym składnikiem mineralnym glin lodowcowych jest kwarc i inne minerały termicznie nieaktywne (74,5–91,7% zawartości), często występują węglany i związki żelaza. Zawartość minerałów ilastych nie jest duża, waha się od 4,5 do

23,3%, głównym minerałem ilastym jest beidelit lub illit (Kaczyński i in., 2008).

Badania przeprowadzono w dynamicznym aparacie trójosiowego ściskania DYNNTS (*Electromechanical Dynamic Triaxial Testing System*) firmy GDS Instruments Ltd.

Do badań wykorzystano próbki walcowe o średnicy ok. 36 mm i wysokości ok. 72 mm, o strukturze nienaruszonej. Próbkę doprowadzono do stanu pełnego nasycenia metodą ciśnienia wyrównawczego (*back pressure*) poddawano izotropowej konsolidacji przy zadanym naprężeniu efektywnym, w każdej serii odpowiednio 100, 200 lub 400 kPa (tab. 2). Przeprowadzono cztery serie badań: jedną w warunkach obciążeń statycznych i trzy w warunkach obciążeń dynamicznych.

Badania statyczne wykonano w warunkach bez drenażu (badanie CIU), ze stałą wartością przemieszczenia osiowego (badanie typu *strain control*) równą 0,012 mm/min (ok. 1% odkształcenia osiowego/h).

Tabela 1

Podstawowe właściwości fizyczne badanych glin

Physical properties of studied tills

Parametry statystyczne <i>Statistical parameters</i>	Wilgotność naturalna <i>Moisture content</i>	Gęstość objętościowa <i>Volume density</i>	Granica plastyczności <i>Plastic limit</i>	Granica płynności <i>Liquid limit</i>	Wskaźnik plastyczności <i>Plasticity index</i>	Stopień plastyczności <i>Liquidity index</i>	Fracja piaskowa <i>Sand fraction</i>	Fracja pyłowa <i>Silt fraction</i>	Fracja ilowa <i>Clay fraction</i>
	w_n [%]	ρ [Mg/m ³]	w_p [%]	w_L [%]	I_p [%]	I_L [%]	f_p [%]	f_π [%]	f_i [%]
Min	9,1	2,16	12,2	19,1	6,7	-0,29	62	14	10
Max	13,9	2,21	12,5	26,6	14,4	0,17	70	21	15
\bar{x}	11,1	2,19	12,4	22,6	10,3	0,00	68	17	12
σ	1,58	0,02	0,64	3,10	3,18	0,20	3,03	2,50	1,98

\bar{x} – średnia arytmetyczna / *arithmetic average*,

σ – odchylenie standardowe / *standard deviation*

Tabela 2
Warunki badań trójosiowych
 Triaxial tests conditions

Parametr Parameter	Seria badań Test series			
	I	II	III	IV
	Typ obciążenia Loading type			
	statyczne static	dynamiczne dynamic		
Amplituda drgań Vibrations amplitude [mm]	–	0,01	0,1	0,4
Przyspieszenie drgań Vibrations acceleration [cm/s ²]	–	3,94	39	157

Badania dynamiczne przeprowadzono w warunkach bez drenażu, przy częstotliwości 10 Hz, ze stałą amplitudą przemieszczenia osiowego (badanie typu *displacement control*) dla próbek tej samej serii, różną dla poszczególnych serii (tab. 2). Każdorazowo przyłożono 200 000 cykli obciążeń dynamicznych, ze zmianą kierunku obciążenia i sinusoidalnym kształcie fali. Wszystkie próbki poddane obciążeniom dynamicznym zostały następnie poddane postdynamicznemu ścisnaniu w warunkach statycznych. Badanie zakończono po zarejestrowaniu 10% odkształcenia osiowego. Schemat badania przedstawiono na figurze 1.

Wartości amplitudy przemieszczenia osiowego w poszczególnych seriach zaprojektowano w taki sposób, by wywołane drgania miały przyspieszenie równe i większe od przyspieszeń zarejestrowanych przy ulicy Dolina Służewiecka (Kaczyński i in., 2008), wzdłuż której obserwowane jest największe natężenie ruchu w tej części Warszawy.

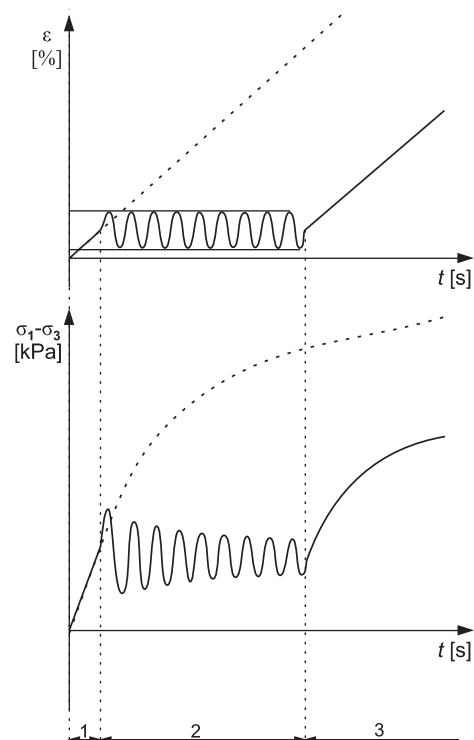


Fig. 1. Schemat badania postdynamicznej wytrzymałości na ścinanie (linia ciągła) na tle badania statycznej wytrzymałości na ścinanie (linia przerywana)

ε – odkształcenie osiowe, t – czas, $\sigma_1 - \sigma_3$ – dewiator naprężenia, 1 – faza inicjalnego ścisnienia, 2 – faza obciążeń dynamicznych, 3 – faza postdynamicznego ścinania

Post-cyclic shear strength test (continuous line) compared to static shear strength (dashed line)

ε – axial strain, t – time, $\sigma_1 - \sigma_3$ – deviator stress, 1 – initial shear phase, 2 – dynamic loading phase, 3 – post-cyclic shear phase

WYNIKI

Wskutek dwukierunkowych obciążeń zależność naprężenie–odkształcenie różni się zasadniczo od zależności uzyskanej w badaniach statycznych. Duże prędkości i przyspieszenia ruchu cząstek gruntu w wyniku przyłożonych drgań, ze względu na małą przepuszczalność glin lodowcowych, wywołują generację ciśnienia porowego prowadzącą do zmiany naprężeń efektywnych.

W warunkach obciążeń dynamicznych wartość ciśnienia porowego zmienia się cyklicznie. W 20 000 cyklach początkowych obserwowany jest gwałtowny wzrost ciśnienia porowego, wyższy dla próbek konsolidowanych przy większych naprężeniach efektywnych. W kolejnych cyklach, w zależności od intensywności przykładanych obciążeń dynamicznych, ciśnienie porowe może powoli spadać, stabilizować się lub powoli wzrastać. Generacja ciśnienia porowego zwiększa się

w miarę wzrostu efektywnego naprężenia konsolidacji oraz intensywności przyłożonych obciążeń dynamicznych.

Dla punktu zniszczenia, który wyznaczono w punkcie przegięcia krzywej $f(\varepsilon) = \sigma_1' / \sigma_3'$, odczytano wartość wytrzymałości na ścinanie oraz wartość odkształcenia osiowego. Wyznaczona wartość postdynamicznej wytrzymałości na ścinanie dla każdej serii, porównana do wartości określonej dla serii ścisnanej statycznie, pozwoliła określić procentową zmianę wytrzymałości na ścinanie w wyniku obciążeń dynamicznych, wyrażoną poprzez współczynnik redukcji wytrzymałości w wyniku obciążeń dynamicznych $W_D = \tau_{PD} / \tau_S$, gdzie: τ_S – statyczna wytrzymałość na ścinanie, τ_{PD} – postdynamiczna wytrzymałość na ścinanie.

Wyniki badań wskazują, że wraz ze wzrostem intensywności obciążeń dynamicznych obserwowany jest postępu-

jący spadek wytrzymałości na ścinanie, wyrażający się w zmniejszeniu wartości dewiatora naprężenia w momencie zniszczenia $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ oraz zmniejszeniu naprężeń efektywnych w momencie zniszczenia. Wartości współczynnika redukcji wytrzymałości W_D świadczą o znacznej utracie wytrzymałości w wyniku oddziaływania obciążeń dynamicznych (tab. 3). Postdynamiczna wytrzymałość glin lodowcowych zlodowacenia warty stanowi od 21 do 76% ich wytrzymałości statycznej. Największy spadek wytrzymałości (niemal 80% wartości całkowitej redukcji) zachodzi w pierwszych 20 000 cykli (Bąkowska, 2008). Generalnie większa utrata wytrzymałości obserwowana jest w przypadku obciążeń o większej intensywności (większym przyspieszeniu).

Jednocześnie zarejestrowano spadek wartości odkształcenia osiowego w momencie zniszczenia ε_f wraz ze wzrostem intensywności przyłożonych drgań.

PODSUMOWANIE

Gliny lodowcowe zlodowacenia warty wykazują łopodobny typ zachowania (*clay-like behaviour*) pod wpływem obciążeń dynamicznych: wartość wygenerowanego ciśnienia porowego osiąga pewną wysoką wartość, ale mniejszą od naprężenia całkowitego (naprężenie efektywne $\neq 0$).

W wyniku spadku naprężeń efektywnych dochodzi do znacznego osłabienia gruntu, wytrzymałość postdynamiczna stanowi od 21 do 76% ich wytrzymałości statycznej i maleje wraz ze wzrostem intensywności i liczbą przyłożonych obciążeń.

Spadek wytrzymałości na ścinanie jest spowodowany wzrostem ciśnienia porowego, prowadzącego do znaczącego spadku naprężeń efektywnych. Wartość wygenerowanego ciśnienia zwiększa się wraz ze wzrostem intensywności przyłożonych obciążeń i efektywnego naprężenia konsolidacji. Najbardziej gwałtowny przyrost ciśnienia porowego obserwowany jest w początkowych cyklach obciążenia.

LITERATURA

- ANDERSEN K.H., 1976 — Behaviour of clay subjected to undrained cyclic loading. *Nor. Geotech. Inst. Publ.*, **114**: 33–44.
- BAKOWSKA A., 2008 — Post-cyclic shear strength of Warsaw till – a pilot study. *Geologija*, **50**, Supplement: S90–S94.
- BAKOWSKA A., 2009 — Zachowanie się glin lodowcowych rejonu Warszawa-Służew pod wpływem obciążeń dynamicznych. Praca doktorska. Arch. Wydz. Geologii UW, Warszawa.
- ERKEN A., ULKER C.B.M., 2007 — Effect of cyclic loading on monotonic shear strength of fine-grained soils. *Engineering Geology*, **89**: 243–257.
- IDRISS I.M., DOBRY R., SINGH R.D., 1978 — Nonlinear behaviour of soft clays during cyclic loading conditions. *J. Geotech. Engineer. Div., ASCE*, **104**, 12: 1427–1447.
- JASTRZĘBSKA M., 2010 — Badania zachowania się gruntów spoistych poddanych obciążeniom cyklicznym w zakresie małych odkształceń. Monografia. Wyd. PŚL., Gliwice.
- KACZYŃSKI R.R., 1987 — Zachowanie się spoistych gruntów zwałowanych pod obciążeniami dynamicznymi. *Biul. Geol. UW*, **31**: 195–246.
- KACZYŃSKI R.R., BARAŃSKI M., BAKOWSKA A., KOROWCZYK M., GAWRIUCZENKOW I., KIELBASIŃSKI K.,

Tabela 3

Wyniki badań trójosiowego ściskania glin lodowcowych

Triaxial test results of tills

Parametr Parameter	Seria badań Test series				σ'_k [kPa]
	I	II	III	IV	
ε_f [%]	4,60	4,01	3,22	1,87	100
	5,67	4,36	4,89	1,93	200
	6,00	5,31	4,51	1,79	400
τ_{PD}/τ_s [-]	1,00	0,69	0,65	0,47	100
	1,00	0,68	0,62	0,21	200
	1,00	0,76	0,40	0,22	400

σ'_k – efektywne naprężenie konsolidacji / *effective stress at consolidation*

τ_{PD} – postdynamiczna wytrzymałość na ścinanie / *post-cyclic shear strength*

τ_s – wytrzymałość na ściskanie / *shear strength*

ε_f – odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia / *axial strain at failure*

Nie zaobserwowano zniszczenia gruntu w fazie obciążeń dynamicznych nieprzekraczających 157 cm/s².

Zaprojektowane możliwie najmniej korzystne warunki badania z punktu oceny wytrzymałości na ścinanie (pełne nasycenie, brak drenażu i duża liczba cykli obciążenia dynamicznego) pozwalają przypuszczać, że w warunkach naturalnych, gdzie możliwe jest chociaż częściowe rozpraszanie generowanego ciśnienia porowego, może wystąpić mniejszy spadek wytrzymałości na ścinanie pod wpływem obciążeń dynamicznych. Jakkolwiek lokalnie, w miejscach występowania nawodnionych soczewek piaszczystych, może dochodzić do znacznej redukcji wytrzymałości gruntu. Niezmiernie ważne staje się wobec tego dokładne rozpoznanie budowy geologicznej na etapie badań polowych, ze szczególnym uwzględnieniem wszelkiego rodzaju przewarstwień i soczewek piaszczystych.

- KRAUŻLIS K., LASKOWSKI K., PIETRZYKOWSKI P., SZCZEPAŃSKI T., TRZCIŃSKI J., WÓJCIK E., ZAWRZYKRAJ P., 2008 — Stan skonsolidowania i mikrostruktury glin zlodowacenia środkowopolskiego rejonu Warszawa-Służew na tle ich geologiczno-inżynierskich właściwości. Projekt badawczy Nr 4 T12B 062 28. Arch. Wydziału Geologii UW, Warszawa.
- RAO S.N., PANDA A.P., 1999 — Non-linear analysis of undrained cyclic strength of soft marine clay. *Ocean Engineering*, **26**: 241–253.
- SEED H.B., CHAN C.K., 1966 — Clay strength under earthquake loading conditions. *J. Soils Mechanic Found. Div., ASCE*, **92**: 53–78.
- VOZNEZSENSKY E.A., NORDAL S., 1999 — Dynamic instability of clays: an energy approach. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **18**: 125–133.
- VUCETIC M., DOBRY M.R., 1990 — Degradation on marine clays under cyclic loading. *J. Geotech. Engineer. Div., ASCE*, **114**, 2: 133–149.

SUMMARY

The determination of static undrained shear strength reduction before and after the application of dynamic loading is reported in this study. Monotonic and cyclic tests were conducted on the undisturbed till specimens from a boreholes drilled at 'Nowoursynowska' testing field in Warsaw, Poland.

The tills were tested using a dynamic triaxial testing system (DYNTTS). The testing program consists of four series. Series I included undrained triaxial monotonic shear test. Series I, II and III included undrained triaxial cyclic test followed by undrained triaxial monotonic shear test. In these series 200 000 cycles were applied with the frequency of 10 Hz, in the two-way cyclic loading with a sine input waveform under displacement control condition.

For each specimen the maximum value of principal ratio σ_1'/σ_3' was located and denoted as a moment of failure by

$(\sigma_1'/\sigma_3')_f$. Post-cyclic shear strength values were evaluated after dynamic loadings and compared with the results of pre-cyclic undrained shear strength.

The studied tills show the 'clay-like' behaviour under cyclic loading conditions. An excess pore water pressure, due to low permeability of tills, is likely to be generated under cyclic loading and consequently the shear strength decreases when the effective stress gets reduced. Pore water pressure increases sharply in the first 20 000 cycles, after that nearly stabilizes, decreases or increases very slowly. Cyclic loading causes a substantial reduction in shear resistance of soil. Post-cyclic shear strength comes from 21% to 76% of its static shear strength. Post-cyclic shear strength decreases with the increasing number of cycles; rapid decrease is noticed in the first 20 000 cycles. The failure did not appear under cyclic loading of accelerations up to 157 cm/s².

