Reakcja nawodnionych osadów poflotacyjnych na obciążenia cykliczne w warunkach bez odpływu wody z porów

Dr hab. inż. Waldemar Świdziński, dr Jacek Mierczyński Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

Zagospodarowanie odpadów poflotacyjnych powstających w czasie przeróbki rudy miedzi stanowi poważny problem inżynierski. Światowa praktyka w tym zakresie pokazuje, że z ekonomicznego i praktycznego punktu widzenia najprostszą formą utylizacji tych odpadów jest ich deponowanie w nadpoziomowych składowiskach odpadów. W większości przypadków deponowanie to odbywa się metodą na mokro poprzez zrzut mieszaniny wodno-gruntowej odpadów poflotacyjnych w postaci zmielonych skał i wód kopalnianych do wnętrza składowiska. Taka sytuacja ma również miejsce w przypadku składowiska odpadów poflotacyjnych rudy miedzi OUOW "Żelazny Most", które jest największym w Europie i jednym z największych na świecie.

Deponowane osady to z geotechnicznego punktu widzenia grunty odpowiadające piaskom pylastym, w których zawartość frakcji piaszczystej waha się od 70 do ponad 90%. System deponowania odpadów na mokro powoduje, że gromadzona w składowisku masa nawodnionych osadów może mieć lokalnie luźną, niestabilną strukturę, która może ulegać zjawisku upłynnienia. Zjawisko to powstaje wówczas, gdy w wyniku generacji ciśnienia wody w porach w warunkach bez odpływu wody z porów wystąpi spadek naprężenia efektywnego do wartości odpowiadającej zerowej lub rezydualnej wytrzymałości na ścinanie. Może to być wywołane ciężarem własnym nawodnionej masy osadów (upłynnienie statyczne) lub obciążeniem cyklicznym wywołanym, np. w wyniku oddziaływania fali parasejsmicznej indukowanej wstrząsem górniczym (upłynnienie lub podatność cykliczna). Taką sytuację mamy w przypadku składowiska "Żelazny Most", które zlokalizowano w bezpośrednim sąsiedztwie kopalń wydobywających i przetwarzających rudę miedzi.

W celu odpowiedzi na pytanie, na ile obciążenia dynamiczne wywołane wstrząsem górniczym mogą spowodować wzrost ciśnienia wody w porach w nawodnionych osadach zgromadzonych w obiekcie i w konsekwencji doprowadzić do ich upłynnienia, przeprowadzono serie badań osadów w cyklicznym aparacie trójosiowym. Badania przeprowadzono zarówno na próbkach rekonstytuowanych, jak też na próbkach o nienaruszonej strukturze pobranych z masywu osadów, co wymagało zastosowania specjalnych technik. Badania prowadzone na próbkach rekonstytuowanych miały na celu sprawdzenie, czy sztucznie preparowane próbki osadów (jako mieszanina piasków i pyłów) o początkowym stanie kontraktywnym będą upłynniać się wskutek przyłożonego obciążenia cyklicznego, natomiast badania prowadzone na próbach NNS miały odpowiedzieć na pytanie, czy zjawisko to może wystąpić w warunkach rzeczywistych.

ZJAWISKA PARASEJSMICZNE W REJONIE OUOW "ŻELAZNY MOST"

Budowa geologiczna górotworu na terenach bogatych w złoża rudy miedzi charakteryzuje się zaleganiem w rejonie stropu złoża zasadniczego sztywnych skał o dużej wytrzymałości, z licznymi zaburzeniami tektonicznymi w formie lokalnych dyslokacji oraz uskoków. Drążenie chodników wydobywczych prowadzi do zachwiania lokalnej równowagi górotworu. Wywołuje to zjawiska parasejsmiczne w postaci wstrząsów, których skala i natężenie rośnie wraz z postępem wydobycia. Wstrząsy górnicze są wynikiem gwałtownego uwalniania nagromadzonej w górotworze energii sprężystej. Zjawisko wstrząsu górniczego powstające w stropowych warstwach eksploatowanego złoża generuje w górotworze drgania rozchodzące się we wszystkich kierunkach. Fala sejsmiczna dochodząc do powierzchni terenu, ulega na swojej drodze amplifikacji, generując fale powierzchniowe w postaci wymuszenia dynamicznego o intensywności drgań proporcjonalnej do energii zjawiska.

Jak wykazują wyniki badań i analiz, z punktu widzenia oddziaływania na budowle ziemne, najbardziej groźne są drgania o niskich częstotliwościach w granicach do 5 Hz. Jest to związane z zakresem częstotliwości drgań własnych w granicach pomiędzy 1 a 3 Hz. Dodatkowo, drgania gruntu powodowane wstrząsami parasejsmicznymi indukowanymi działalnością górniczą charakteryzują się stosunkowo krótkim czasem trwania. Czas ten jest określany na podstawie tzw. intensywności Ariasa, [1], z której wyznacza się efektywny czas trwania drgań. W przypadku OUOW "Żelazny Most" czas trwania drgań nie przekracza 20 s. Oznacza to, że ocena wpływu drgań na reakcję nawodnionych osadów poflotacyjnych może opierać się na symulacji tych drgań w laboratoryjnych badaniach elementowych, wykorzystując do tego celu, np. cykliczne aparaty trójosiowe.

OSADY JAKO MIESZANINA PIASKÓW I PYŁÓW

Z analizy granulometrycznej przeprowadzonej na próbkach osadów poflotacyjnych składowiska "Żelazny Most" wynika, że stanowią one mieszaninę frakcji piaskowych i pyłowych, z których zdecydowanie dominuje ta pierwsza. Granulacja ta zmienia się wraz z rosnącą odległością od korony zapór, co jest efektem grawitacyjnej sedymentacji osadów transportowanych przez strugi wody w procesie namywu. Na rys. 1 zestawiono rozkłady uziarnienia osadów pobranych w różnych odległościach od korony zapory wynoszących odpowiednio 50, 100, 150, 200, 250 i 300 m, na głębokości około 1 m od powierzchni plaży składowiska.

Z analizy sitowej wynika, że zawartość frakcji piaskowej mierzona wskaźnikiem *SFR* zmienia się od około 16 przy zaporze do około 2 w dalszej odległości, co ma swoje konsekwencje w przypadku podatności osadów na upłynnienie. Badania minimalnych i maksymalnych wskaźników porowatości osadów wykazały, że wartość tego drugiego rośnie wraz z odległością od korony zapór, co jest bezpośrednio związane z rosnącą zawartością frakcji drobnej. Wartość ta jest znacznie większa, niż



Rys. 1. Krzywe uziarnienia osadów poflotacyjnych pobranych w różnych odległościach od korony zapory

w przypadku czystych piasków. Oznacza to, że rośnie obszar kontraktywności dla piasków z domieszkami pyłów.

Na rys. 2 pokazano przebieg linii stanu ustalonego deformacji wyznaczony dla osadów poflotacyjnych na podstawie badań trójosiowych w warunkach monotonicznego ścinania nawodnionych próbek tych osadów [7]. Zgodnie z teorią stanu ustalonego deformacji zaproponowaną przez Poulosa [5], linia ta, wykreślona w przestrzeni $e - \log p'$, stanowi granicę rozdzielającą dwa rodzaje zachowania się gruntu w zależności od jego stanu początkowego, tj. tzw. zachowanie kontraktywne, w którym suchy grunt niespoisty w wyniku ścinania zmniejsza swoją objętość oraz zachowanie dylatywne, gdy występuje zjawisko odwrotne. Punkty leżące powyżej linii stanu ustalonego charakteryzują grunty o zachowaniu kontraktywnym, natomiast poniżej tej linii, grunty o zachowaniu dylatywnym [6].

Z rys. 2 wynika, że podatność osadów na upłynnienie jest funkcją zawartości frakcji drobnej (pylastej). Osady o małej zawartości frakcji drobnej pobrane blisko korony zapór wykazują mniejszą podatność na upłynnienie niż osady zdeponowane dalej w składowisku, gdyż obszar kontraktywności tych pierwszych jest znacznie mniejszy niż osadów odłożonych dalej. Wynika to z faktu znacznie większej wartości maksymalnego wskaźnika



Rys. 2. Linie stanu ustalonego osadów pobranych odpowiednio 50 i 300 m od korony zapory [7]



Rys. 3. Różne rodzaje struktury cząstek w zależności od zawartości frakcji drobnej na tle linii odpowiadającej maksymalnemu zagęszczeniu [9]

porowatości osadów o większej zawartości frakcji drobnej, por. linie odpowiadające $e_{\max 50}$ i $e_{\max 50}$ na rys. 2.

Podane wyniki wskazują na dość istotną różnicę w zachowaniu się nawodnionych gruntów piaszczystych z domieszkami pyłów od czystych piasków, poddanych ścinaniu w warunkach bez odpływu wody z porów, choć obydwa rodzaje gruntów mogą ulegać upłynnieniu.

Problem ten zauważyli wcześniej inni badacze. Już w 1956 roku Terzaghi postawił hipotezę, że również cząsteczki pyłu mogą utworzyć niestabilną strukturę, która mogła być przyczyną statycznego upłynnienia obserwowanego w przypadku podwodnych zsuwów [9].

Prace prowadzone przez Lade i Yamamuro [4] udowodniły, że przy rosnącej procentowej zawartości pyłów w mieszaninie czystego piasku i pyłu zmieniają się istotnie minimalne i maksymalne wskaźniki porowatości, jak też ich zakres, co powoduje, że można uformować bardzo luźną strukturę, w konsekwencji bardzo niestabilną i mocno ściśliwą.

Na podstawie studiów szeregu prac innych autorów oraz przeprowadzonych badań własnych Yamamuro i Covert [9] stwierdzili, że zachowanie mieszaniny piaszczysto-pylastej jest zależne od stosunku zawartości tych frakcji. Obrazuje to dobrze załączony przez nich teoretyczny wykres zmiany wskaźnika porowatości w zależności od zawartości frakcji drobnej (rys. 3), na którym naniesiono linię maksymalnego zagęszczenia (ABC). Na odcinku AB maksymalna gęstość rośnie wraz z wzrostem zawartości frakcji drobnej do momentu całkowitego wypełnienie przez cząsteczki pyłu porów gruntowych utworzonych przez ziarna piaszczyste (punkt B). Z kolei na odcinku BC wzrost liczby cząstek drobnych z równoczesnym spadkiem liczby cząstek grubszych powoduje, że te ostatnie nie tworzą szkieletu gruntowego z powierzchniami kontaktów pomiędzy ziarnami, a są jedynie zanurzone w strukturze pyłu, aż do sytuacji ekstremalnej, gdy cząstek grubszych nie ma w ogóle. Na tym odcinku, wraz z wzrostem ilości pyłu, obserwuje się zmniejszanie się maksymalnej gestości takiej mieszaniny.

Autorzy konkludują, że najbardziej niestabilna, znacznie bardziej niż w przypadku czystych piasków, jest luźna struktura pyłów wypełniających przestrzenie porowe szkieletu gruntowego utworzonego przez cząstki piaszczyste.

BADANIA REAKCJI OSADÓW NA OBCIĄŻENIA CYKLICZNE – PRÓBKI REKONSTYTUOWANE

Badania przeprowadzono na wyselekcjonowanych próbach osadów rodzaju NW pobranych z miejsc położonych w różnych odległościach od korony zapory składowiska "Żelazny Most", po okresie namywu. Ogółem pobrano 6 prób w odległości odpowiednio 50, 100, 150, 200, 250 i 300 m od korony, na głębokości około 1 m od powierzchni plaży.

Do badań wytypowano dwa rodzaje osadów charakteryzujące się największą i najmniejszą zawartością frakcji drobnej, odpowiadające próbom pobranych z odległości 50 i 150 m, których wskaźnik *SFR* wyniósł odpowiednio 16,2 i 1,9 [7].

Badania reakcji nawodnionych osadów poddanych ścinaniu w warunkach bez odpływu przeprowadzono w cyklicznym aparacie trójosiowym firmy Enel-Hydro, na próbkach o wymiarach 70×140 mm. Aparat ten umożliwia zadawanie obciążenia cyklicznego o maksymalnej częstotliwości 2 Hz. Dodatkowo, aparat jest wyposażony w czujniki zbliżeniowe do lokalnego pomiaru pionowych i poziomych deformacji próbki [8].

Badania wykonano na próbkach rekonstytuowanych metodą ubijania na mokro (z jęz. ang. *moist tamping method*). W celu dokładnego wyznaczenia początkowej wartości wskaźnika porowatości oraz kontroli jego zmiany podczas formowania próbki, jak też podczas procesu konsolidacji, w każdym etapie mierzono lokalnie deformacje z użyciem czujników zbliżeniowych.

Po uformowaniu próbki usuwano powietrze z porów, zastępując je dwutlenkiem węgla, a następnie w wolnym tempie nawadniano próbkę do całkowitego wypełnienia porów wodą (około 24 godzin). Kolejno zwiększano stopnień nasycenia próbki metodą ciśnienia wyrównawczego. Próbkę uznawano za dostatecznie nasyconą przy wartości współczynnika Skemptona *B* wynoszącej powyżej 0,96. Wartości te uzyskiwano przy ciśnieniu wyrównawczym pomiędzy 500 a 600 kPa.

W przypadku próbek rekonstytuowanych każda z nich była poddana początkowo konsolidacji izotropowej, a następnie monotonicznie ścinana do założonej wartości naprężenia dewiatorowego odpowiadającej wartości współczynnika parcia spoczynkowego $K_0 = 0,45$. Początkowy stan naprężenia, przed przyłożeniem obciążenia cyklicznego, mieścił się w obszarze niestabilności wyznaczonym linią niestabilności określoną w badaniach monotonicznych oraz powierzchnią graniczną Coulomba-Mohra.

Po osiągnięciu założonego, początkowego stanu naprężenia, każda z próbek była poddawana cyklicznemu ścinaniu. Cykliczne ścinanie realizowano przy różnych częstotliwościach wymuszenia cyklicznego zmieniających się w zakresie od 0,1 Hz do 1 Hz. Obciążenie cykliczne zmieniało się sinusoidalnie przy założonej amplitudzie naprężenia i stałej wartości ciśnienia w komorze trójosiowej: $q = q_0 + \Delta \sigma_1 \sin(\omega t)$, gdzie $\omega = 2\pi f$, a $\Delta \sigma_1$ jest amplitudą cyklicznej składowej pionowej naprężenia.

Szczegółowe wartości początkowe zestawiono w tabl. 1, gdzie podano początkowe wartości stopnia zagęszczenia każdej z próbek, początkowe wartości naprężenia dewiatorowego i średniego ciśnienia efektywnego przed przyłożeniem obciążenia cyklicznego, wartości K_0 , ciśnienia wyrównawczego, parametru stanu, częstotliwości wymuszenia, amplitudy cyklicznego naprężenia dewiatorowego oraz liczby cykli, przy której stwier-

Numer badania	e ₀	I _D [%]	p'_ [kPa]	$q_0^{\prime} \ [ext{kPa}]$	$K_{_0}$	u ₀ [kPa]	ψ	f [Hz]	$\Delta \sigma_{_{1 \circ r}}$ [kPa]	N _I
50-1u	0,874	39,8	158	137	0,451	500	0,026	1,0	17,5	21
50-2u	0,906	31,4	95	83	0,448	600	0,044	0,5	10	39
50-3u	0,866	41,9	228	198	0,450	500	0,027	0,1	26	7
50-4u	0,759	69,8	166	124	0,501	500	-0,088	0,2	38,5	2
150-1u	0,872	65,8	153	138	0,437	600	0,026	0,5	18	20
150-2u	0,831	72,5	316	274	0,451	500	0,001	0,5	34	15
150-4u	0,817	74,8	95	83	0,448	600	-0,040	0,25	10	28
150-5u	0,714	91,6	95	83	0,448	600	-0,143	0,25	10	67

Tabl. 1. Zestawienie parametrów początkowych oraz wyników cyklicznych badań trójosiowych osadów poflotacyjnych



Rys. 4. Reakcja osadów o początkowym stanie kontraktywnym poddanych cyklicznemu trójosiowemu ściskaniu; a) przebieg ścieżki naprężenia w przestrzeni naprężeń. b) generacja ciśnienia wody w porach oraz zmiany odkształcenia pionowego w funkcji liczby cykli obciążenia

dzono rozpoczęcie zjawiska upłynnienia lub podatności cyklicznej. Oznaczenia poszczególnych badań odpowiadają odległości poboru próby od korony zapory (odpowiednio 50 i 150 m) oraz numerowi kolejnego badania dla danej odległości.

kontraktywny charakter, co może świadczyć o tym, że jednak wyznaczona z badań monotonicznych linia stanu ustalonego dla osadów o większej zawartości frakcji drobnej leży znacznie bliżej linii odpowiadającej osadom grubszym.

Parametr stanu ψ określa różnicę początkowego wskaźnika porowatości od odpowiadającego mu wskaźnika porowatości w stanie ustalonym, dla danego początkowego ciśnienia efektywnego, por. Been i Jefferis, 1985 [2], (rys. 2), gdzie naniesiono również stany początkowe badanych próbek. Jak wynika z rysunku oraz tabl. 1, ogółem 8 badań, trzy z nich powinny wykazywać zachowanie dylatywne (ujemna wartość parametru stanu), a pozostałe kontraktywne. Jednakże w przypadku próbki oznaczonej symbolem 150-4u, pomimo ujemnej wartości parametru stanu, próbka wykazała w czasie badania wyraźnie Typowe zachowanie się próbki gruntu o początkowym stanie kontraktywnym poddanej cyklicznemu trójosiowemu ścinaniu pokazano na rys. 4. W prezentowanym doświadczeniu próbkę osadów o największej zawartości frakcji drobnej skonsolidowano izotropowo do wartości ciśnienia konsolidującego 225 kPa, następnie poddano monotonicznemu trójosiowemu ściskaniu do stanu naprężenia odpowiadającemu wartości $p'_0 = 316$ kPa oraz $q'_0 = 274$ kPa (punkt 0 na rys. 4a), por. tabl. 1. Po osiągnięciu założonego stanu naprężenia próbkę poddano cyklicznemu ścinaniu o średniej amplitudzie $\Delta \sigma_1 = 34$ kPa.



Rys. 5. Reakcja osadów o początkowym stanie dylatywnym poddanych cyklicznemu trójosiowemu ściskaniu a) przebieg ścieżki naprężenia w przestrzeni naprężeń, b) generacja ciśnienia wody w porach oraz zmiany odkształcenia pionowego w funkcji liczby cykli obciążenia



Z kolei na rys. 5 pokazano typowe zachowanie się osadów o początkowym stanie dylatywnym, poddanych cyklicznemu ścinaniu w warunkach bez odpływu wody z porów. Obserwuje się tutaj wzrost ciśnienia wody w porach jedynie do wartości około 0,5 średniego ciśnienia efektywnego, co nie prowadzi do upłynnienia, natomiast po przekroczeniu przez ścieżkę naprężenia linii niestabilności następuje gwałtowny wzrost odkształceń pionowych, co jest charakterystyczne dla tzw. podatności cyklicznej. Należy również zauważyć, że przy tym samym stanie naprężenia początkowego, do inicjacji podatności cyklicznej potrzeba znacznie więcej cykli ścinania niż w przypadku upłynnienia próbki kontraktywnej (por. doświadczenia 50-2u i 150-2u, tabl. 1).

Na rys. 6 zestawiono wszystkie punkty doświadczalne odpowiadające początkowi niestabilnego zachowania się osadów bez względu na stan początkowy (kontraktywny, dylatywny), początkowy stan naprężenia oraz wartość parametru stanu (odległość od linii stanu ustalonego, por. rys. 2).

Przedstawione wyniki wskazują, że bez względu na stan początkowy oraz zawartość frakcji drobnej badanych osadów wszystkie punkty doświadczalne układają się wzdłuż wspólnej prostej o współczynniku kierunkowym $h_{cykl} = q/p' = 1,113$ z odchyleniem standardowym wynoszącym 0,06. Położenie tej linii znacznie różni się od linii niestabilności otrzymanej z badań monotonicznych, która odpowiada wartości $h_{mon} = 0,76$.

Z badań przeprowadzonych przez Yamamuro i Coverta [9] na mieszaninie piasku i pyłu wynika jednak, że niestateczność gruntu ma swój początek w przybliżeniu na wspólnej linii bez względu na sposób obciążenia próbki. Teza o istnieniu innej linii niestabilności dla obciążeń cyklicznych i monotonicznych w przypadku gruntu piaszczysto-pylastego nie jest więc ostatecznie rozstrzygnięta i wymaga dalszych badań.

Podsumowując, reakcja nawodnionych osadów złożonych z frakcji piaskowej i pylastej poddanych cyklicznemu ścinaniu

w warunkach bez odpływu wody z porów jest jakościowo bardzo zbliżona do tej, którą obserwuje się w przypadku czystych piasków. Natomiast ze względu na znacznie większe wartości maksymalnych wskaźników porowatości osadów w porównaniu z piaskami podatność tych pierwszych na upłynnienie może być znacznie większa, gdyż zjawisku temu mogą ulegać nie tylko osady luźne, ale również średnio zagęszczone, a nawet zagęszczone (tabl. 1).

BADANIA PRÓB OSADÓW O NIENARUSZONEJ STRUKTURZE PODDANYCH OBCIĄŻENIOM CYKLICZNYM W WARUNKACH TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA

W poprzednim rozdziale wykazano, że upłynnienie osadów poflotacyjnych reprezentujących grunty będące mieszaniną piasków oraz pyłów w warunkach laboratoryjnych jest jak najbardziej możliwe. Zachodzi pytanie, czy takie warunki mogą wystąpić w naturze. W tym celu pobrano ze składowiska "Żelazny Most" próby o nienaruszonej strukturze (NNS) i poddano je badaniom w laboratorium. Pobór prób rodzaju NNS z gruntów piaszczystych i małospoistych nie jest zagadnieniem prostym. W przypadku składowiska "Żelazny Most" próbki pobierano powierzchniowo, z dna specjalnie przygotowanych wykopów badawczych, w różnych odległościach od korony zapory (40, 100, 140 i 200 m), z zastosowaniem specjalnej procedury opracowanej przez Lipińskiego [3]. W każdym wykopie próbki pobierano z dwóch poziomów 1,2 m i 2,2 m p.p.t.

Do pobierania próbek zastosowano specjalne cylindry o średnicy 70 mm, wysokości 140 mm i grubości ścianek 2 mm, wykonane ze stali kwasoodpornej oraz specjalnie skonstruowanych przykrywek. Badania prowadzono w tym samym aparacie trójosiowym, co w przypadku próbek rekonstytuowanych, stosując dokładnie tę samą procedurę przygotowania próbek,

					•	0 1				
Próbka	p_0' [kPa]	q_0' [kPa]	K ₀	u ₀ [kPa]	В	Δq [kPa]	f [Hz]	Δu_{max} [kPa]	$\Delta u_{max}/p_0'$	e _{1max} [10 ⁻³]
N40-I-2A	288	299	0,41	500	0,97	34,6	0,25	84,7	0,283	36,4
N120-I-4B	147	152	0,41	650	0,97	17,0	0,25	42,4	0,279	13,1
N200-I-2A	220	252	0,45	600	0,97	27,6	0,25	82	0,325	7,2
W40-I-2A*	124	168	0,51	650	0,98	65,0	0,1	83,5	0,498	48,6
W120-II-1A	235	244	0,41	500	0,97	28,5	0,25	78,6	0,322	29,1
W200-II-1A	87	93	0,42	600	0,97	10,3	0,25	17,6	0,189	3,1

Tabl. 2. Zestawienie parametrów początkowych cyklicznych badań trójosiowych próbek NNS osadów poflotacyjnych

próbka rekonstytuowana

z wyjątkiem zastosowania konsolidacji anizotropowej wzdłuż ścieżki K_0 . Po zakończeniu konsolidacji próbki były poddawane cyklicznemu ścinaniu w warunkach bez odpływu wody z porów przy częstotliwości f = 0.25 Hz. Badania prowadzono dla różnych wartości początkowego średniego ciśnienia efektywnego p'_0 oraz odpowiadającego mu naprężenia dewiatorowego q_0 , (warunki K_0). W każdym badaniu amplituda dewiatora Δq była równa 7% początkowej wartości efektywnego naprężenia osiowego. Przyjęcie takiego poziomu amplitudy naprężeń cyklicznych było związane z odzwierciedleniem rzeczywistych maksymalnych obciążeń dynamicznych, których należy spodziewać się na składowisku "Żelazny Most" w wyniku oddziaływania fal parasejsmicznych wywołanych wstrząsem górniczym. Jedynie w przypadku próbki W40-I-2A zastosowano amplitudę znacznie większą, odpowiadającą 26% składowej pionowej naprężenia efektywnego. Celem tego badania było sprawdzenie reakcji próbki na cykliczne obciążenie znacznie większe, niż to, którego można spodziewać się na składowisku. Każdą z prób poddano dużej liczbie cykli obciążenia. Podczas badania rejestrowano wartość siły osiowej działającej na próbkę, odkształcenia próbki oraz zmiany ciśnienia wody w porach. Wartości podstawowych parametrów początkowych poszczególnych badań zestawiono w tabl. 2, a stan początkowy przed przyłożeniem obciążenia cyklicznego na rys. 2. Wynika z niego, że wszystkie próbki miały początkowy stan dylatywny.

Jak wynika z tabl. 2, dla żadnej z badanych prób o NNS nie nastąpiło upłynnienie gruntu, nawet w przypadku obciążenia próbek kilkudziesięcioma tysiącami cykli. Zadane obciążenie cykliczne o amplitudzie $\Delta q = 0,07\sigma'_1$ wywołało jedynie niewielki przyrost ciśnienia wody w porach (ostatnia kolumna w tabl. 2), bez znaczącego przyrostu odkształceń. W rzeczywistości taka duża liczba cykli wywołanych zjawiskami naturalnymi (drgania sejsmiczne czy parasejsmiczne) nigdy nie występuje.

W przypadku próbki rekonstytuowanej (W40-I-2A), dla której amplituda wynosiła około 65 kPa, czyli blisko 4 razy więcej niż wynikałoby z przyjętego wcześniej warunku (26% zamiast 7% początkowego naprężenia osiowego), takie obciążenie okazało się jednak zbyt duże, ponieważ już w pierwszym cyklu nastąpił gwałtowny wzrost ciśnienia wody w porach oraz bardzo duży przyrost odkształceń. Po gwałtownym wzroście w pierwszym cyklu ciśnienie wody w porach oscylowało wokół nieznacznie zmieniającej się wartości średniej. Przebieg tych oscylacji był charakterystyczny dla zjawiska podatności cyklicznej, tzn. maksymalnej wartości dewiatora naprężenia odpowiadała minimalna wartość ciśnienia wody w porach i odwrotnie.

PODSUMOWANIE

Badania reakcji osadów poflotacyjnych na obciążenie cykliczne w warunkach bez odpływu wody z porów prowadzone na próbkach rekonstytuowanych potwierdziły jakościowo podobny obraz tej reakcji, jak w przypadku czystych piasków. Dla próbek osadów o początkowym stanie kontraktywnym obserwowano zjawisko upłynnienia, natomiast w przypadku próbek o początkowym stanie dylatywnym – zjawisko podatności cyklicznej. Wynika z tego, że dla mieszaniny piaszczysto-pylastej o różnej zawartości frakcji drobnej, dochodzącej do 30%, również obowiązują zasady teorii stanu ustalonego.

Uzyskane wyniki badań przeprowadzonych na rekonstytuowanych próbkach osadów poflotacyjnych wskazują, że oba rodzaje zniszczenia (upłynnienie, podatność cykliczna) mają swój początek na wspólnej linii, która nie pokrywa się z linią niestabilności wyznaczoną z badań monotonicznych, a jest zdecydowanie bardziej przesunięta w stronę powierzchni granicznej Coulomba-Mohra. Oznacza to, że strefa niestabilności dla obciążeń cyklicznych jest znacznie węższa niż w przypadku obciążeń monotonicznych, choć teza ta wymaga jeszcze zdecydowanego potwierdzenia kolejnymi badaniami.

Przy założonych warunkach obciążenia (stan początkowy, amplituda obciążenia ścinającego) upłynnienie lub podatność cykliczna występowały po maksymalnie kilkudziesięciu cyklach obciążenia, a więc z teoretycznego punktu widzenia, biorąc pod uwagę czas trwania wstrząsu sejsmicznego oraz dominujące częstotliwości, upłynnienie masywu osadów poflotacyjnych wywołane przejściem fali parasejsmicznej jest możliwe.

Jednakże, badania przeprowadzone na próbach osadów o nienaruszonej strukturze poddanych cyklicznemu ścinaniu w warunkach bez odpływu wody z porów pokazały, że w przypadku oddziaływania nawet bardzo dużej liczby cykli do upłynnienia jednak nie dojdzie. Wygenerowane ciśnienie wody w porach osiągnęło maksymalną wartość około 30% średniego ciśnienia efektywnego i nie wykazywało tendencji do wzrostu pomimo dalszego obciążania. Badania prowadzono dla wartości amplitudy obciążenia cyklicznego odpowiadających rzeczywistym obciążeniom dodatkowym, powstałym wskutek przejścia fali sejsmicznej (7% składowej pionowej naprężenia efektywnego). Wskazuje to, że pomimo potencjału do upłynnienia, który posiadają osady poflotacyjne, zjawisko to w warunkach rzeczywistych nie powinno nastąpić.

LITERATURA

1. Arias A.: A measure of earthquake intensity. [W:] Hansen, R. J. (ed), Seismic Design for Nuclear Power Plants. The M.I.T. Press, 1970, 438-483.

2. Been K., Jefferies M. G.: A state parameter for sands. Geotechnique 35, 1985, No. 2, 99-112.

3. Geoteko: Sprawozdanie z pobierania próbek osadów o nienaruszonej strukturze pobranych ze składowiska Żelazny Most. Raport wewnętrzny dla O/ZH KGHM POLSKA MIEDŹ S.A., 2010.

4. Lade, P. V. and Yamamuro, J. A.: Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sand. Can. Geotech. J., 1997, 34(6), 918-928.

5. Poulos S. J.: The steady state of deformation, J. Geotech. Engrg. ASCE, Vol. 107, 1981, No. GT5, 501-516.

6. Świdziński W: Mechanizmy zagęszczania i upłynniania gruntów sypkich, Wyd. IBW PAN, 2006 (rozprawa habilitacyjna).

7. Świdziński W.: Niestabilność zbiorników poflotacyjnych ze względu na statyczne upłynnienie. Raport wewnętrzny IBW PWAN, 2011.

8. Świdziński W., Mierczyński J.: Badania laboratoryjne zjawiska podatności cyklicznej w nawodnionym gruncie niespoistym. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/2009, 271-280.

9. Yamamuro J. A, Covert K. M.: Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content, J. Geotech. and Geoenvir. Engrg., ASCE, Vol. 127, 2001, No. 4, 314-324.