

Modelowanie dynamiki warstwy gruntu na stole sejsmicznym

**Prof. dr hab. inż. Andrzej Sawicki, dr hab. inż. Marek Kulczykowski, prof. nadzw. IBW PAN,
dr hab. inż. Waldemar Świdziński, prof. nadzw. IBW PAN
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku**

**Dr hab. inż. Robert Jankowski, prof. nadzw. PG,
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**

Artykuł dotyczy wybranych problemów związanych z modelowaniem konstrukcji ziemnych na stole sejsmicznym. Badania takie prowadzi się w celu zrozumienia procesów zachodzących w tych konstrukcjach podczas trzęsień ziemi, co w skali światowej jest jednym z podstawowych problemów mechaniki konstrukcji i geotechniki. Silne trzęsienie ziemi potrafi zniweczyć materialny dorobek kilku pokoleń, nie wspominając o doraźnych ofiarach w postaci zabitych i rannych. Wiele ośrodków współczesnej cywilizacji jest ulokowanych na terenach aktywnych sejsmicznie, jak np.: w USA, Japonii, Chinach, Turcji czy Włoszech. Infrastruktura na terenach objętych trzęsieniami ziemi jest zwykle odbudowywana po kataklizmach, gdyż trudno jest przenieść w inne miejsce np. całe miasta. Bardziej racjonalnym rozwiązaniem jest zatem przystosowanie się, a w tym takie projektowanie konstrukcji, aby były one odporne na trzęsienia

ziemi, przynajmniej te o średniej mocy. Takimi problemami zajmuje się m.in. geotechnika, gdzie jednym z elementów badań są właśnie doświadczenia na stole sejsmicznym.

Doświadczenia te dotyczą też badania dynamiki konstrukcji budowlanych, gdzie efekty ich współpracy z podłożem nie zawsze są uwzględniane. Uwagę koncentruje się głównie na drganiach takich konstrukcji, możliwych rezonansach itd., Jankowski [3, 4]. Problematyka ta wykracza poza zakres artykułu, który dotyczy tylko dynamiki konstrukcji ziemnych. Badania takie były zapoczątkowane przez pionierów tej specjalności w USA, w związku z trzęsieniami ziemi, które nawiedzały głównie Kalifornię. Już blisko pół wieku temu, podjęli je Seed i Lee [19], a potem Seed i Silver [21], De Alba i in. [1], czy Seed i in. [20]. Dotyczyły one głównie dynamiki warstwy gruntu, w związku ze zjawiskiem jego upłynnienia, czy też osiadaniem wskutek

wstrząsów sejsmicznych. Te eksperymenty, w połączeniu z badaniami w aparatach trójosiowych, pozwoliły na zidentyfikowanie czynników mających wpływ na zachowanie się gruntu w warunkach obciążeń sejsmicznych, co należy uznać za poważne osiągnięcie, gdyż był to punkt wyjścia do dalszych badań, w tym teoretycznych.

Początkowe sukcesy, związane z badaniami tak niby prostego układu jak warstwa gruntu, zaowocowały dziesiątkami publikacji dotyczącymi dynamiki bardziej złożonych konstrukcji ziemnych. Generalnie dotyczą one współdziałania konstrukcji z podłożem, np.: w postaci fundamentów bezpośrednich, fundamentów na palach, ścian oporowych itd. Nowe narzędzie badawcze otworzyło nowe możliwości. Przykładowo, Dobry i in. [2] badali deformacje lekko nachylonej skarpy, a Sandrekarimi i in. [12] przesunięcia ciężkich nabrzeży portowych. Zachowanie się płytkich fundamentów było przedmiotem badań Paolucci'ego i in. [9], zaś ogólna analiza współpracy konstrukcji z podłożem, z uwzględnieniem analiz numerycznych, była podjęta przez Pitalakis'a i in. [11]. Na stole sejsmicznym badano również zachowanie się konstrukcji z gruntu zbrojonego [5, 6]. Badania na stole sejsmicznym zainspirowały również geofizyków, którzy m.in. badali upłynnienie różnych osadów [8]. Prowadzono też prace związane z technikami doświadczalnymi, m.in. w celu zredukowania kosztów urządzeń laboratoryjnych [10]. Pozyskane informacje wskazują, że badania konstrukcji na stole sejsmicznym stały się już pewnym standardem. Natomiast szereg problemów związanych z interpretacją tych eksperymentów budzi zasadnicze pytania.

Pojawiają się one już w związku z interpretacją najbardziej prostych doświadczeń, np. z dynamiką warstwy gruntu, czemu poświęcony jest niniejszy artykuł. Autorzy wyznają pogląd przyjęty w mechanice budowlanej, że zanim zaczniesz analizować skomplikowane układy, należy detalicznie zrozumieć pracę najprostszymi strukturami są belka, rama czy kratownica. Dopiero zrozumienie tych układów pozwala na racjonalną analizę bardziej złożonych struktur. Mechanika budowlanej i wytrzymałość materiałów rozwijały się przez stulecia, zanim osiągnęły dojrzały kształt [22]. Geotechnika nie może poszczycić się aż taką tradycją, natomiast może czerpać przykład z tamtych specjalności.

Pozornie prostą strukturą w geotechnice jest warstwa gruntu, umieszczona w skrzyni i badana na stole sejsmicznym. Mogłoby się wydawać, że mechanika tego układu jest dobrze rozpoznana, gdyż takie badania prowadzi się już od lat sześćdziesiątych XX wieku. Chyba jeszcze tak nie jest, o czym m.in. świadczy praca [7], opublikowana w prestiżowym amerykańskim czasopiśmie. Zawiera ona tyle błędów, że Sawicki i Kulczykowski [14] napisali na ten temat dyskusję. Odnosi się wrażenie, że nastąpiła pewna fascynacja nowym urządzeniem badawczym, w którym bada się coraz to bardziej złożone układy, bez należytego zrozumienia pracy tych najprostszymi. Artykuł jest próbą uporządkowania tego stanu rzeczy, w zakresie dynamiki warstwy gruntu badanej na stole sejsmicznym.

Celem badań warstwy gruntu na stole sejsmicznym jest zwykle analiza takich zjawisk, jak osiadanie warstwy suchego gruntu wskutek poziomych drgań czy upłynnienie warstwy gruntu nawodnionego. Przy okazji można też przeanalizować takie problemy, jak dyssypacja wygenerowanego ciśnienia wody w porach gruntu, czy też problem tonięcia obiektów w upłynnionym



Rys. 1. Stół sejsmiczny, do którego przymocowano akwarium
Wewnątrz akwarium usypano warstwę piasku

podłożu. Bardziej szczegółowe pytania mogą dotyczyć amplitudy przyspieszenia, przy której następuje upłynnienie warstwy, czy też liczby cykli drgań, o określonej amplitudzie, która również doprowadzi do upłynnienia itd.

OPIS DOŚWIADCZEŃ

Badania przeprowadzono na stole sejsmicznym skonstruowanym w Katedrze Mechaniki Budowli i Mostów Politechniki Gdańskiej, (rys. 1). Umożliwia on symulację wymuszeń dynamicznych podczas trzęsień ziemi, tąpnięć górniczych czy drgań wywołanych ruchem pojazdów. Stół jest zbudowany z platformy o wymiarach $0,75 \times 0,6$ m, z możliwością badania modeli o masie nie przekraczającej 100 kg. Wymuszenie jest przekazywane przez liniowy siłownik PARKER ET50, który umożliwia ruch platformy z amplitudą poziomego przemieszczenia 0,5 m oraz maksymalnym przyspieszeniem 10 m/s^2 .

Do stołu przymocowano usztywnione akwarium, wewnątrz którego usypano warstwę modelowego piasku „Gdynia”. Cały układ poddano poziomym drganiom o różnej częstotliwości i różnej amplitudzie poziomego przyspieszenia. Szczegóły będą przedstawione w dalszej części artykułu.

Do badań użyto modelowego piasku „Gdynia” o następujących charakterystykach: $D_{50} = 0,565 \text{ mm}$, $C_u = 1,66$, $\rho_s = 2,655 \text{ g/cm}^3$, $e_{\max} = 0,746$, $e_{\min} = 0,5$. Kąt tarcia wewnętrznego dla piasku luźnego i średnio zagęszczonego wynosił odpowiednio $\phi = 31^\circ$ oraz 34° .

Badania warstwy gruntu suchego

Głównym celem tych badań było poznanie wpływu amplitudy poziomego przyspieszenia, oraz liczby cykli obciążenia na osiadanie warstwy gruntu. Badano warstwę gruntu o długości $L = 50 \text{ cm}$ i miąższości $H = 16 \text{ cm}$, (rys. 2). Ciężar objętościowy suchego gruntu wynosił $\gamma = 16,35 \text{ kN/m}^3$. W badaniach stosowano głównie wymuszenie sinusoidalne w postaci:

$$A = A_0 \sin \omega t \quad (1)$$

gdzie:

ω – częstość kołowa wymuszenia,

t – czas,

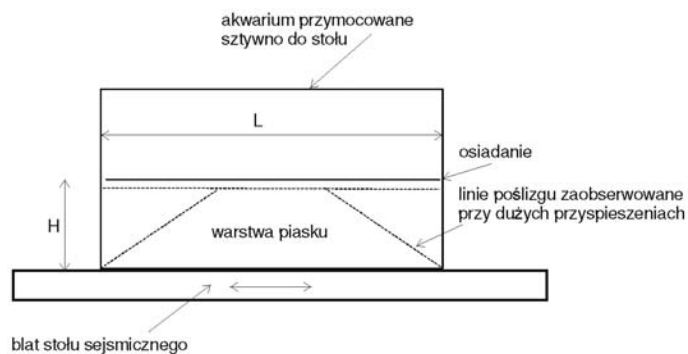
A_0 – amplituda poziomego przyspieszenia.

Stosowano zwykle częstotliwość wymuszenia $f = 2$ Hz ($\omega = 12,57$ s⁻¹), ale również większe, aż do 30 Hz. Trzęsieniom ziemi odpowiadają te niższe przyspieszenia, natomiast przyspieszenia wyższe zastosowano wyłącznie w celach badawczych. Amplitudy przyspieszeń zastosowano w zakresie od 0,2g do 0,6g, gdzie g jest przyspieszeniem ziemskim. Mierzono osiadania warstwy oraz obserwowano jej zachowanie. Zarejestrowano nierównomierne osiadania oraz pojawienie się pasm ścinania przy silnych wstrząsach, większych od 0,2g. Streszczenie podstawowych wniosków wynikających z analizy badań warstwy suchego piasku przedstawiono w tabl. 1. Pozostałe wyniki będą przedstawione w dalszej części artykułu.

Badania gruntu nawodnionego

Badania przeprowadzono w gruncie nawodnionym, według schematu z rys. 2. Na górnej krawędzi warstwy położono okrągłą metalową płytkę o średnicy 10,5 cm, grubości 1,5 cm i ciężarze 10 N. Z płytką zespolono czujnik przemieszczeń pionowych. Płytkę umieszczono w celu pośredniej obserwacji zjawiska upłynnienia warstwy, gdyż w upłynnionym podłożu posadowione na nim obiekty toną. Czujnik ma rejestrować ten proces. Badany układ przedstawiono na rys. 3.

Głównym celem badań była analiza wpływu częstości drgań na zjawisko upłynnienia warstwy. Badania przeprowadzono przy stałej amplitudzie poziomego przyspieszenia $a_0 = 2$ m/s² $\approx 0,2g$ oraz dla częstości z zakresu 1 ÷ 25 Hz. Na rys. 4 przedstawiono



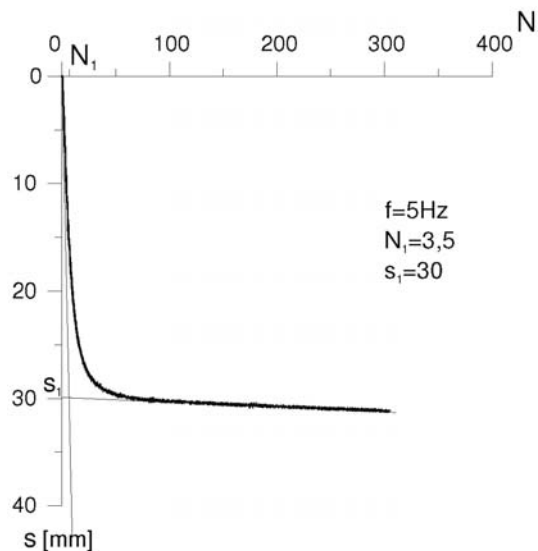
Rys. 2. Schemat warstwy gruntu badanej na stole sejsmicznym. Linie poślizgu, odpowiadające klinom Rankine'a, pojawiają się przy dużych przyspieszeniach



Rys. 3. Warstwa nawodnionego gruntu na stole sejsmicznym z widoczną płytką

Tabl. 1. Zestawienie obserwacji z badań doświadczalnych warstwy suchego gruntu badanego na stole sejsmicznym

Wyszczególnienie	Uwagi
Wpływ amplitudy przyspieszenia A_0 na osiadanie warstwy, dla typowej częstości $f = 2$ Hz	Przyspieszenie $A_0 = 2$ m/s ² powodowało średnie osiadanie warstwy około 1 mm. Przy $A_0 = 0,4g$ średnie osiadanie wynosiło około 3 mm, po czasie $t = 60$ s, czyli po 120 cyklach. Jest to zgodne z przyjętym poglądem, że większa amplituda przyspieszenia powoduje większe zagęszczenie gruntu.
Wpływ częstości na osiadanie	Stwierdzono, że przy tej samej amplitudzie przyspieszenia, osiadania warstwy wzrastają wraz ze wzrostem częstotliwości. Np. dla $A_0 = 5$ m/s ² otrzymano następujące średnie osiadania: 2,96 mm (dla $f = 2$ Hz); 4,4 mm (5 Hz); 4,9 mm (10 Hz). Panuje pogląd, że częstość obciążenia cyklicznego nie wpływa na osiadania gruntu. Ten pogląd ugruntowano na podstawie badań quasistatycznych, przy niewielkich częstościach, mniejszych niż 5-10 Hz. Przy dużych częstościach przejawia się przypuszczalnie dodatkowy wpływ sił bezwładności, czego wcześniej nie brano pod uwagę. Tak wysokie częstości nie występują podczas trzęsień ziemi, gdzie typowe $f = 1 - 2$ Hz.
Niesymetryczne osiadania	Stwierdzono, że osiadania po lewej stronie warstwy (patrz na rys. 1) są większe niż po stronie prawej. Jest to przypuszczalnie spowodowane konstrukcją stołu sejsmicznego. Do analizy przyjęto zatem osiadania w środku warstwy. Nierównomiernym osiadaniom usiłowano zapobiec, umieszczając na powierzchni warstwy płytę ze sklejki. Przy niższych częstościach ta płyta rzeczywiście redukowała różnicę osiadań. Natomiast przy wyższych częstościach, płyta pracowała niezależnie, m.in. uderzając w ścianki akwarium. Z płyty zrezygnowano.
Pasma ścinania przy bocznych ściankach (rys. 2)	Przy większych amplitudach pojawiają się, przy bocznych ściankach, pasma ścinania odpowiadające klinom Rankine'a. Te obszary wprowadzają lokalne zaburzenia, gdyż stan naprężenia staje się tam skomplikowany. Stąd praktyczny wniosek, że w badaniach na stole sejsmicznym stosunek H/L powinien być mały.
Badania typu <i>sweepsine</i>	Są to badania o zmiennej amplitudzie, w zakresie 0,5 – 20 Hz, stosowane w mechanice budowli. W geotechnice takich badań, jak dotąd, nie przeprowadzono. Wykazują one niezwykle zachowanie się gruntu, np. gwałtowne osiadania warstwy w połowie badania. Być może takie badanie ma znaczenie do lepszego zrozumienia mechaniki gruntów niespoistych, natomiast dla praktycznych potrzeb geotechniki nie ma większego znaczenia.
Inne	W niektórych badaniach na stole sejsmicznym stosuje się tzw. <i>laminar box</i> , tj. zastępuje się sztywne boczne ścianki przez ścianki podatne, aby uniknąć wpływu składowej poziomej naprężenia na zachowanie się warstwy. Sztywne ścianki boczne mogą też generować dodatkowe fale, które mogą z kolei skomplikować obraz naprężenia.

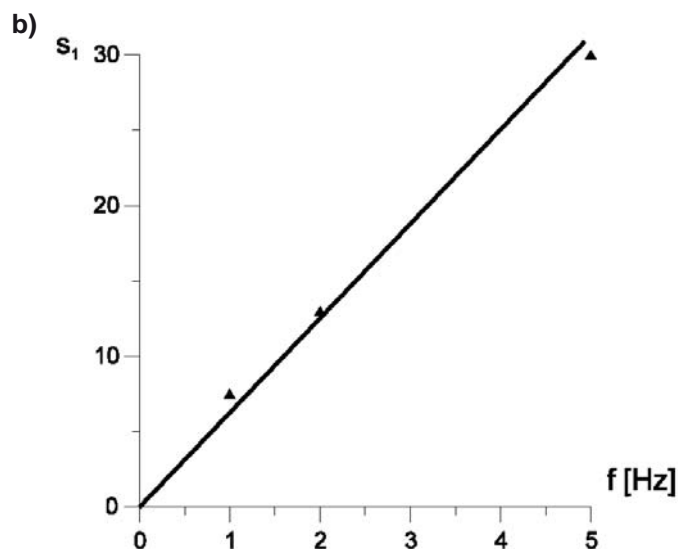
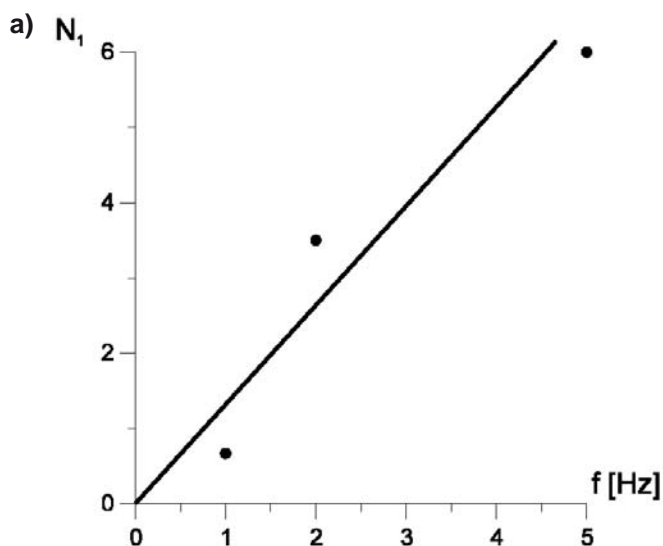


Rys. 4. Przebieg procesu tonięcia płytki w warstwie nawodnionego gruntu

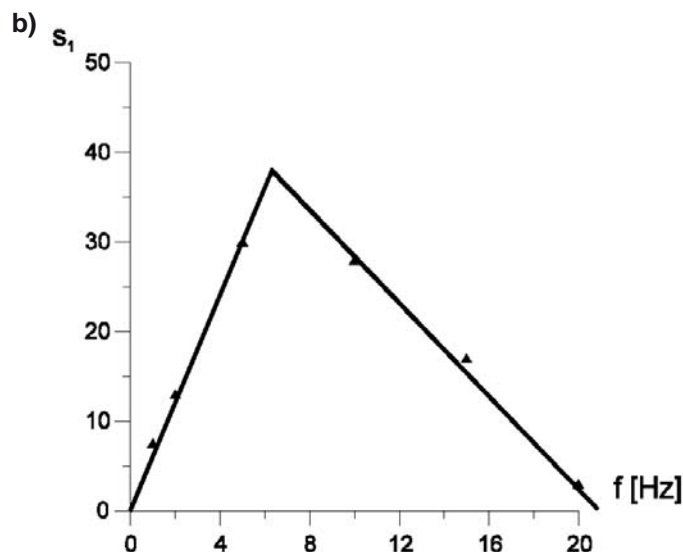
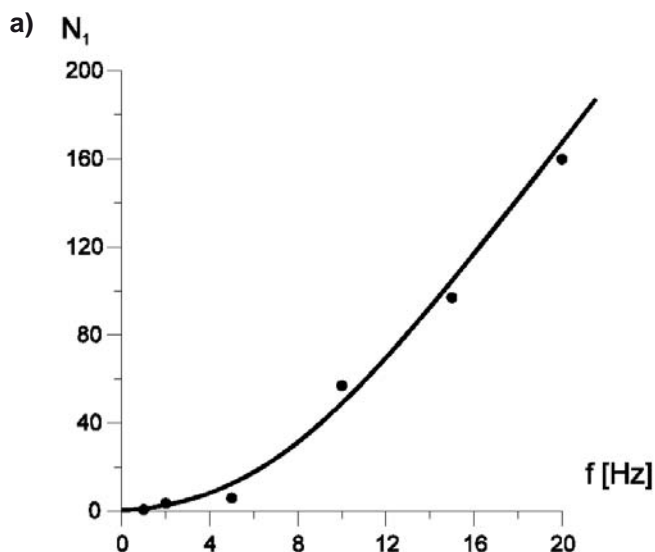
proces tonięcia płytki w upłynnionym podłożu (pionowe przemieszczenie płytki s) jako funkcję liczby cykli ścinania N , czyli poziomych wymuszonych drgań na stole sejsmicznym. Ten wykres ma podobny charakter przy różnych częstotliwościach. Można go przybliżyć formą dwuliniową, z których pierwszy etap charakteryzuje się gwałtownym tonięciem, zaś drugi bardziej łagodnym. Przecięcie się tych dwóch prostych oznaczono symbolami N_1 oraz s_1 .

Na rys. 5 przedstawiono zależności $N_1 = N_1(f)$ oraz $s_1 = s_1(f)$ do praktycznie ważnego zakresu częstości do 5 Hz. Obydwie zależności można z powodzeniem aproksymować liniami prostymi. Na rys. 6 przedstawiono podobne zależności, ale w zakresie częstości do 20 Hz.

Proces upłynnienia warstwy rejestrowano w sposób pośredni, obserwując tonięcie płytki. Nie zainstalowano czujników mierzących zmiany ciśnienia wody w porach gruntu z tego względu, że zakres zmiany tych ciśnień był bardzo mały, w ramach dokładności czujników komercyjnych. Jest to alternatywny spo-



Rys. 5. Zależności: a) $N_1 = N_1(f)$ oraz b) $s_1 = s_1(f)$ przy małych częstościach f , odpowiadających trzęsieniom ziemi



Rys. 6. Zależności: a) $N_1 = N_1(f)$ oraz b) $s_1 = s_1(f)$ przy większym zakresie częstości f

Tabl. 2. Zestawienie obserwacji z badań doświadczalnych warstwy nawodnionego gruntu, badanego na stole sejsmicznym

Wyszczególnienie	Uwagi
Krzywa tonięcia (rys. 4)	Charakter tej krzywej jest podobny dla całego zakresu badanych częstości. Na początku tonięcie jest dosyć gwałtowne, a potem proces ulega spowolnieniu. Można to, na początku, przybliżyć dwiema prostymi, które przecinają się w punkcie N_1, s_1 . Spowolnienie procesu tonięcia może być spowodowane wolniejszym upłynianiem się głębiej położonych warstw gruntu, co może też oznaczać, że upłynienie propaguje się od góry.
Zależności $N_1 = N_1(f)$ oraz $s_1 = s_1(f)$ dla małych częstości $f \leq 5$ Hz, (rys. 5)	Zależności te można przybliżyć liniami prostymi. Charakter prostej $s_1 = s_1(f)$ jest intuicyjnie oczywisty, gdyż większa częstość kojarzy się z większą podatnością warstwy na upłynienie. Z rys. 5 wynika, że zależność $N_1 = N_1(s_1)$ jest również liniowa. Problem ten wymaga analizy teoretycznej, np. przy wykorzystaniu modelu upłyniania, opracowanego w IBW PAN.
Zależności $N_1 = N_1(f)$ oraz $s_1 = s_1(f)$ dla częstości $f > 5$ Hz, (rys. 6)	Dla całego zakresu częstości wykres $N_1 = N_1(f)$ jest nieliniowy. Tylko jego początek można przybliżyć prostą, (rys. 5), lecz charakter tego wykresu jest podobny: wraz z wzrostem f wzrasta N_1 . Natomiast wykres $s_1 = s_1(f)$ jest bardziej interesujący, gdyż s_1 najpierw wzrasta, a potem maleje. Aproksymacja liniowa wyników doświadczeń jest uzasadniona. Przebieg tego wykresu jest niezbyt zrozumiałe.

sób badania upłynienia warstwy nawodnionego gruntu, być może oryginalny.

DYNAMIKA WARSTWY SUCHEGO GRUNTU

Wstępną analizę dynamiki warstwy suchego gruntu, badanej na stole sejsmicznym, przedstawiono w pracach [15 ÷ 17]. Uzyskane wyniki można streścić następująco:

- A. Stosunek głębokości warstwy do jej długości (H/L , rys. 2) powinien być mały, aby uniknąć wpływu oddziaływania ścianek bocznych. Zakres tego wpływu jest wyznaczony przez zasięg klina Rankine’a. W sąsiedztwie ścianek stan naprężenia w gruncie jest złożony. Aby uniknąć tego efektu stosuje się czasem skrzynię rodzaju *laminar box*.
- B. Wyznaczono statycznie dopuszczalny stan naprężenia w warstwie, tj. taki stan, który spełnia równania równowagi, warunki brzegowe oraz nie przekracza warunku stanu granicznego. Składowa pionowa naprężenia σ_z oraz pozioma σ_x reprezentują stan geostatyczny:

$$\sigma_z = \gamma z, \sigma_x = K_0 \gamma z \quad (2)$$

gdzie:

- γ – ciężar właściwy gruntu,
- z – pionowa współrzędna, mierzona od powierzchni warstwy w dół,
- K_0 – współczynnik parcia bocznego.

Na ten stan nałożone są cykliczne naprężenia ścinające τ , które wynikają z wymuszenia poziomych drgań stołu:

$$\tau = \rho A z \quad (3)$$

gdzie:

- ρ – gęstość suchego gruntu.

Podkreśla się, że jest to uproszczony stan naprężenia, który obowiązuje w obszarach poza zasięgiem potencjalnych klinów Rankine’a

- C. Z żądania, aby stan naprężenia nie przekraczał warunku Coulomba-Mohra wyznaczono warunek, jaki musi spełniać współczynnik K_0 :

$$\left(\frac{A}{g}\right)^2 \leq \frac{1}{4} \left[(1 + K_0)^2 \sin^2 \phi - (1 - K_0)^2 \right] \quad (4)$$

Jeżeli amplituda poziomego przyspieszenia jest duża, to współczynnik K_0 musi ulec zwiększeniu, aby stan na-

prężenia był statycznie dopuszczalny. Oznacza to zwiększenie naprężenia bocznego ponad początkowy stan geostatyczny. Wynik ten jest zgodny z obserwacjami innych autorów, którzy zaproponowali nawet określenie dla tego zjawiska: *seismic induced lateral stresses*.

- D. Oszacowano osiadania warstwy, stosując model C/L, opisany m.in. w książce Sawickiego [13]. Parametry modelu oraz inne właściwości piasku stosowanego w doświadczeniach wyznaczono w laboratorium IBW PAN [16]. Aby wyznaczyć osiadania warstwy, najpierw należy obliczyć dewiator cyklicznego odkształcenia z klasycznego wzoru:

$$\gamma = \tau / G \quad (5)$$

gdzie:

- G – moduł ścinania,

a potem można już wyznaczyć odkształcenia objętościowe wywołane cyklicznym ścinaniem, a przez całkowanie wyznaczyć osiadanie warstwy.

Okazało się, że teoretycznie wyznaczone osiadania są znacznie mniejsze niż pomierzone. Zgodność teorii z doświadczeniem wymuszono przez znaczną redukcję wartości modułu ścinania w porównaniu do modułu wyznaczonego z badań trójosiowych. Potem ten problem przeanalizowano, stosując m.in. dosyć wyrafinowane metody doświadczalne, mierząc prędkości rozchodzenia się fal w próbce gruntu w aparacie trójosiowym. To podejście również niczego nie wyjaśniło. Problem jest w tym, że w badanej warstwie panują bardzo małe naprężenia, bliskie zera na wykresach z badań trójosiowych. W otoczeniu zera załamują się wszelkie konwencjonalne aproksymacje. Oznacza to, że badania na stole sejsmicznym nie są panaceum na dolegliwości sejsmicznej mechaniki gruntów. Przypomina się, że w przypadku gruntów niespoistych moduł ścinania opisuje się funkcją:

$$G = G_0 + G_1 \sqrt{p'} \quad (6)$$

gdzie:

- G_0 i G_1 – parametry wyznaczone z doświadczeń,
- p' – średnie naprężenie efektywne.

Wielkość G_0 , mającą znaczenie modułu rezydualnego, wprowadzono ze względów technicznych, aby można było efektywnie przeprowadzać analizy numeryczne. Przyjmuje się bardzo niewielką jej wartość, raczej intuicyjnie, gdyż doświadczalnie nie można jej wyznaczyć. Natomiast wartość G_1 wyznacza się doświadczalnie.

UPLYNNIENIE WARSTWY NAWODNIONEGO GRUNTU

Upłynnienie jest procesem, który przeprowadza materiał o cechach ciała stałego w ciecz. Przykładem jest nawodniony grunt, który w pewnych warunkach, np. podczas trzęsień ziemi, wykazuje właściwości cieczy lepkiej, w której toną różne konstrukcje albo też spływają masy upłynnionej ziemi. Za kryterium upłynnienia przyjmuje się warunek $p' = 0$, który oznacza, że w upłynnionym gruncie nie istnieją kontakty pomiędzy ziarnami szkieletu gruntowego. Upłynnienie jest poprzedzone procesem generacji ciśnienia wody w porach gruntu, z którym jest stowarzyszony proces redukcji p' . Te zjawiska opisane są modelem C/L, opracowanym w IBW PAN [13].

Przedstawiono uproszczony sposób analizy upłynnienia warstwy nawodnionego gruntu. Makronapężenia dane są wzorami:

$$\sigma_z = \sigma'_z + u \quad (7)$$

$$\sigma_x = \sigma'_x + u \quad (8)$$

$$\tau = \tau' \quad (9)$$

gdzie:

u – ciśnienie wody w porach gruntu,
 $'$ – napężenia efektywne.

Przyjęto konwencję znaków mechaniki gruntów, gdzie plus oznacza ściskanie. Pionowe makronapężenie dane jest wzorem:

$$\sigma_z = \gamma_m z \quad (10)$$

gdzie:

γ_m – ciężar objętościowy mieszaniny gruntowo-wodnej

$$\gamma_m = n\gamma_w + (1-n)\gamma_g \quad (11)$$

Wielkości γ_w oraz γ_g oznaczają odpowiednio ciężary objętościowe wody i ziaren gruntu, zaś n jest porowatością.

Początkowy rozkład u jest ciśnieniem hydrostatycznym:

$$u = u_0 = \gamma_w z \quad (12)$$

Z wzorów (7) oraz (10) ÷ (12) otrzymuje się wyrażenie na początkową składową pionową napężenia efektywnego:

$$\sigma'_z = (1-n)(\gamma_g - \gamma_w)z \quad (13)$$

Składowa pozioma napężenia efektywnego dana jest wzorem:

$$\sigma'_x = K_0 \sigma'_z \quad (14)$$

Składową poziomą napężenia całkowitego oblicza się z wzorów (8), (12) i (14). W trakcie eksperymentu na stan geostatyczny nałożone jest napężenie ścinające:

$$\tau = \rho_m A z \quad (15)$$

gdzie:

$\rho_m = \gamma_m / g$ jest gęstością mieszaniny.

Powyższe makronapężenia spełniają równania równowagi (ruchu) ośrodka oraz uproszczone warunki brzegowe.

Napężenie cykliczne (15) powoduje generację ciśnienia wody w porach gruntu ponad początkowy stan hydrostatyczny, które jest opisane następującym równaniem różniczkowym:

$$\frac{du}{dN} = \frac{D_1 \gamma_0^2}{4a} \exp(-D_2 a u) \quad (16)$$

$$a = \frac{1-n}{n} \kappa \quad (17)$$

gdzie:

D_1 i D_2 – parametry modelu C/L, które wyznacza się doświadczalnie,
 κ – ściśliwość szkieletu gruntowego.

Wielkość

$$\gamma_0 = \frac{\tau_0}{G} \quad (18)$$

oznacza amplitudę odkształcenia cyklicznego, $\tau_0 = \rho_m A_0 z$ jest amplitudą napężenia cyklicznego, wzory (1), (5), (6) i (15). W tabl. 3 zestawiono kolejne kroki postępowania przy analizie upłynnienia warstwy gruntu.

PARAMETRY BADANEGO GRUNTU

Wcześniej przedstawiono podstawowe charakterystyki geotechniczne modelowego piasku. Poniżej podaje się wartości innych parametrów, wprowadzonych w artykule.

- Porowatość początkowa $n = 0,38$;
- Ciężar właściwy wody $\gamma_w = 0,098 [10^5 \text{ N/m}^2]$;
- Ciężar właściwy ziaren gruntu $\gamma_g = 0,265 [10^5 \text{ N/m}^2]$;

Tabl. 3. Etapy analizy upłynnienia warstwy gruntu

Etap obliczeń	Komentarz
1. Wyznaczenie parametrów gruntu	Szczegółowo opisano w pracy [16]
2. Wyznaczenie początkowych naprężeń	Wzory (13) ÷ (15).
3. Obliczenie wygenerowanego ciśnienia wody w porach gruntu	Równanie (16). Zwykle wyznacza się przyrosty du dla zadanego przyrostu dN .
4. Wyznaczenie aktualnych składowych naprężeń efektywnego. Modyfikacja modułu ścinania.	Wzory (6) ÷ (8).
5. Sprawdzenie warunku Coulomba – Mohra	Składowe naprężenia efektywnego nie mogą przekraczać warunku C-M.
6. Powtórzenie procedury od punktu 3 dla kolejnego przyrostu dN	Zwyczajowo stosuje się kryterium upłynnienia w postaci $p'=0$. Może okazać się, że wcześniej osiągnięto warunek C-M. W obydwu przypadkach obliczenia kończymy.

- Ciężar właściwy mieszaniny gruntowo-wodnej $\gamma_m = 0,2$ [10^5 N/m²]. Współczynnik parcia bocznego $K_0 = 0,5$. Wynika on z klasycznego oszacowania $K_0 \approx 1 - \sin \phi$. Zmierzenie tego współczynnika w rzeczywistości jest zadaniem skomplikowanym;
- Moduł sprężystości gruntu $E = 0,265$ [10^5 N/m²]. Jest to wartość wyznaczona z fazy odciążenia w badaniu edometrycznym;
- Współczynnik Poisson'a $\nu = 0,16$. Również z badania edometrycznego;
- Ścisłość szkieletu gruntowego $\kappa = 0,72 = 0,265$ [10^{-8} m²/N]. Wyznaczona na podstawie E oraz ν z badania edometrycznego;
- Parametry modelu C/L: $D_1 = 0,5$, $D_2 = 0,11$. Parametry te odpowiadają jednostce naprężenia 10^5 N/m² i jednostce odkształcenia 10^{-3} ;
- Współczynnik przy module ścinania przyjęto początkowo jako $G_1 = 0,7$, co wynikało z badań trójosiowych. Z żądania, aby obliczone i zaobserwowane osiadania warstwy były jednakowe, wynika, że G_1 powinno mieć wartość 0,05. Przy przyjętych jednostkach naprężenia i odkształcenia, jednostką modułu G jest 10^8 N/m². Jednostki współczynników G_0 i G_1 mogą być wyliczone elementarnie, ale to nie ma większego znaczenia.

DYSKUSJA I WNIOSKI

Najważniejsze wyniki i wnioski można podsumować następująco:

1. Osiadanie warstwy zależy od amplitudy poziomego przyspieszenia oraz od jego częstości. Przykładowo, osiadanie środka warstwy po 100 cyklach przyspieszenia o amplitudzie $A_0 = 5$ m/s² wyniosło odpowiednio: 3, 4,9 oraz 6 mm, przy częstości: 2, 10 i 15 Hz. Natomiast przy amplitudzie $A_0 = 2$ m/s² uzyskano osiadanie 0,76 mm dla $f = 2$ Hz oraz 0,83 mm dla $f = 10$ Hz. Wyniki te sugerują, że im wyższa częstość, tym większe osiadania, szczególnie przy dużych amplitudach przyspieszenia. Przy niższej amplitudzie różnica ta jest praktycznie znikoma. Dotychczasowe obserwacje empiryczne wskazywały, że zagęszczenie gruntu nie zależy od częstości wymuszenia i na tej m.in. podstawie opracowano model C/L. Otrzymane wyniki wskazują, że zastosowanie modelu C/L powinno być ograniczone do niższych częstości. Przypomina się, że przyspieszenia poziome podczas trzęsień ziemi są rzędu 1 Hz, a zatem model C/L może być stosowany do tego rodzaju zagadnień.
2. Odkształcenia mierzono trzema czujnikami, umieszczonymi odpowiednio po bokach i w środku warstwy. Wyniki wskazują, że największe osiadania występują po lewej stronie, a najmniejsze po prawej. Wiarygodne zatem mogą być tylko wskazania czujnika środkowego. Te różnice spowodowane są przypuszczalnie samą konstrukcją stołu sejsmicznego. Przy analizie teoretycznej wyników badań zwrócono uwagę na wpływ ścian bocznych na stan naprężenia w warstwie. Z tego względu stosunek H/L powinien być mały, a wiarygodne wyniki dotyczą tylko środka warstwy.

3. Analiza teoretyczna procesu osiadania warstwy, przeprowadzona modelem C/L, wskazuje, że aby uzyskać zgodność wyników doświadczeń z predykcją teoretyczną należy zredukować wartość modułu ścinania o rząd wielkości, w porównaniu do modułu wyznaczonego z badań trójosiowych. Jest to związane z bardzo małymi naprężeniami w warstwie badanego gruntu. Zwykle G wyznacza się w aparacie trójosiowym, przy znacznie wyższym poziomie naprężeń, rzędu 100 kPa. Naprężenia w warstwie są o dwa rzędy wielkości mniejsze. Przy aproksymacji wyników badań trójosiowych ten zakres nie ma znaczenia, gdyż znajduje się w sąsiedztwie zera, gdzie zdarza się pominięcie detali. Wymieniony problem jest typowy w mechanice gruntów, przy badaniach modelowych. Badania są prowadzone w małej skali, gdzie gubi się efekt ciężaru własnego. Z tego względu, w bogatszych ośrodkach, prowadzi się badania w wirówce geotechnicznej, gdzie można wymodelować efekt ciężaru własnego.
4. Upłynnienie warstwy badano w sposób nietypowy, poprzez obserwację tonięcia metalowej płytki. Charakter krzywej tonięcia jest, w pierwszym przybliżeniu, dwuliniowy. Pierwszy etap tonięcia jest dosyć gwałtowny, a potem ulega spowolnieniu. Przecięcie tych asymptot oznaczono wartościami N_1 i s_1 . Okazuje się, że te wielkości rosną liniowo wraz z wzrostem f , w zakresie małych częstości, do $f = 5$ Hz. Dla zakresu większych częstości, do 20 Hz, N_1 wzrasta parabolicznie wraz ze wzrostem f , zaś s_1 osiąga pik w okolicach 6 Hz, a potem liniowo maleje (rys. 6). Opisane zjawiska wymagają dodatkowej analizy, nie zamieszczonej w tym artykule.
5. Przedstawiono algorytm postępowania przy analizie teoretycznej procesu upłynnienia. Dalsze badania będą poświęcone temu problemowi.

LITERATURA

1. De Alba P. A., Chan C. K., Seed H. B.: Sand liquefaction in large-scale simple shear tests. *Jnl Geotechnical Eng. Div.*, 102, 9, 1976, 909-927.
2. Dobry R., Thevanayagam S., Medina C., Bethapudi R., Elgamal A., Bennett V., Abdoun T., Zeghal M., El Shamy U., Mercado V. M.: Mechanics of lateral spreading observed in a full-scale shake test. *Jnl Geotechnical & Geoenvironmental Eng.*, ASCE, 137, 2, 2011, 115-129.
3. Jankowski R.: Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39, 2010, 343-354.
4. Jankowski R.: Shaking table experimental study on diagnosis of damage and its evaluation in steel structure. *Key Engineering Materials*, 417-418, 2010, 157-160.
5. Krishna A. M., Latha G. M.: Seismic response of wrap-faced reinforced soil-retaining wall models using shaking table tests. *Geosynthetics International*, 14, 6, 2007, 355-364.
6. Latha G. M., Krishna A. M.: Seismic response of reinforced soil retaining wall models: Influence of backfill relative density. *Geotextiles & Geomembranes*, 26, 4, 335-349.
7. Maheshwari B. K., Singh H. P., Swami Saran: Effects of reinforcement on liquefaction resistance of Solani sand. *Jnl Geotechnical & Geoenvironmental Eng.*, ASCE, 138, 7, 2012, 831-840.

8. Moretti M., Alfaro P., Caselles O., Canas J. A.: Modelling seismites with a digital shaking table. *Tectonophysics*, 304, 4, 1999, 369-383.
9. Paolucci R., Shirato M., Yimaz M. T.: Seismic behaviour of shallow foundations: Shaking table experiments vs numerical modelling. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37, 4, 2008, 577-595.
10. Prasad S. K., Towhata I., Chandradhara G. P., Nanjundaswamy P.: Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering. *Current Science*, 87, 10, 2004, 1398-1404.
11. Ptilakis D., Dietz M., Wood D. M., Clouteau D., Modaressi A.: Numerical simulation of dynamic soil-structure interaction in shaking table testing. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 28, 6, 2008, 453-467.
12. Sadrekarimi A.: Seismic displacement of broken-back gravity quay walls. *Jnl Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, 137, 2, 2011, 75-84.
13. Sawicki A.: *Zarys mechaniki gruntów sypkich*. Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk 2012.
14. Sawicki A., Kulczykowski M.: Discussion of „Effect of reinforcement on liquefaction resistance of Solani sand”. *Jnl Geotechnical & Geoenvironmental Eng.*, ASCE, 139, 9, 2013, 1633-1634.
15. Sawicki A., Kulczykowski M., Jankowski R.: Estimation of stresses in a dry sand layer tested on shaking table. *Archives of Hydro-Engineering & Environmental Mechanics*, 59, 3-4, 2012.
16. Sawicki A., Mierczyński J., Świdziński W.: Basic set of experiments for determination of mechanical properties of sand. *Złożono do druku*.
17. Sawicki A., Świdziński W., Kulczykowski M.: Shaking table dynamics of a dry sand layer. *Proc. 2nd Int. Conf. on Performance – Based Design in Earthquake Geotechnical Eng.*, Taormina, Patron Editore, Bologna 2012, 661-668.
18. Sawicki A., Świdziński W., Mierczyński J.: Moduł ścinania gruntu sypkiego przy małych naprężeniach. *Czasopismo Techniczne*, zeszyt 27, 3-5, 2012, 91-102.
19. Seed H. B., Lee K. L.: Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *Jnl Soil Mechanics & Foundation Div.*, ASCE, 92, SM 6, 1966, 105-134.
20. Seed H. B., Martin, G. R., Pyke R. M.: Effect of multidirectional shaking on pore pressure development in sands. *Jnl Geotechnical Eng. Div.*, 104, 1, 1978, 27-44.
21. Seed H. B., Silver M. L.: Settlement of dry sands during earthquakes. *Jnl Soil Mechanics & Foundation Div.*, ASCE, 98, SM 4, 1972, 381-397.
22. Timoshenko S.: *Historia wytrzymałości materiałów*. Arkady, Warszawa 1966.

PODZIĘKOWANIE: Artykuł napisano w ramach projektu badawczego N N506 072938, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Autorzy dziękują za wsparcie.