

w p. 2 niniejszej pracy. Wyprzedzając nieco to omówienie powiemy tylko, że punktem wyjścia do różnorodnych analiz teoretycznych zagadnienia zmian ciśnień porowych w dnie morza była przede wszystkim intuicja autorów tych podejść, a w minimalnym stopniu dane doświadczalne. Intuicja ta bazowała jedynie na wyrzykowych obserwacjach empirycznych, lub wręcz na stworzeniu sobie myślowego obrazu pracy układu morze–dno, a następnie na przyjęciu prostego schematu teoretycznego tego układu i na jego analizie.

O ile w początkowym stadium badań tych zjawisk „eksperyment myślowy” wydaje się rozsądną drogą do uzyskania pewnych informacji na temat pracy układu morze–dno, to w dalszych etapach coraz większą uwagę należy poświęcić doświadczeniu, jako źródłu nowych informacji i kryterium weryfikacji propozycji teoretycznych. Niestety, badania takie są niezwykle kosztowne i trudne do przeprowadzenia, a uzyskane wyniki nie zawsze są wiarygodne. Na przykład MALLARD i DALRYMPLE [7] zwracają uwagę, że badania laboratoryjne i badania w terenie mogą prowadzić do krańcowo różnych wniosków. Tak więc nadal trzeba gromadzić materiał empiryczny i weryfikować różne koncepcje teoretyczne, zbliżając się w ten sposób do coraz lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w dnie morza pod wpływem falowania.

Jedną z prostych koncepcji teoretycznych, pomagających zrozumieć zjawisko generacji ciśnienia porowego w dnie morskim, jest przyjęcie dla podłoża modelu ośrodka dwufazowego przy jednoczesnym założeniu, że woda jest uwieczona w porach (tzw. warunki bez odpływu wody z porów). Tego typu model podłoża jest oczywiście pewną aproksymacją, gdyż w rzeczywistości istnieje wzajemny ruch szkieletu i wody gruntowej, ale ta aproksymacja upraszcza w sposób istotny analizę zagadnienia, dostarczając przy tym wielu informacji o znaczeniu praktycznym. Będzie o tym mowa w dalszym ciągu pracy.

Dno morza poddawane jest działaniu obciążeń cyklicznych wywołanych falowaniem. Obciążenia te powodują powstanie w podłożu cyklicznych naprężeń. Aby wyznaczyć te naprężenia, należy sformułować odpowiednie zagadnienie brzegowe, które w ogólności będzie zagadnieniem sprzężonym, jeżeli jednocześnie uwzględnimy, w układzie równań problemu, równania opisujące mechanizm generacji ciśnienia porowego. Kluczowym zadaniem jest tutaj przyjęcie odpowiedniej teorii opisującej ten mechanizm, jak też sam problem sformułowania zagadnienia brzegowego tak, aby uzyskać w sposób efektywny wyniki liczbowe.

Niniejsza praca poświęcona jest analizie zagadnienia generacji ciśnienia porowego w dnie morskim, opartej na teorii zagęszczania nawodnionego ośrodka sypkiego, zaproponowanej przez SAWICKIEGO [16, 17]. Teoria ta została już z powodzeniem zastosowana do analizy takich zjawisk jak: zachowanie się podłoża pod wpływem trzęsienia ziemi [20], analiza osiadań fundamentów obciążonych cyklicznie [22, 24], analiza pracy pała poddanego obciążeniom cyklicznym [21], czy też ostatnio analiza problemu generacji ciśnienia porowego pod falochronem [24]. Analizowany problem jest zatem przykładem kolejnego zastosowania teorii zagęszczania.

Zagadnienie sformułowano w prosty sposób, umożliwiając uzyskanie wyników liczbowych za pomocą mikrokomputera IBM PC. Następnie przedstawiono przykłady obliczeń numerycznych oraz obszerną dyskusję.

Oryginalnym elementem pracy jest zastosowanie teorii zagęszczania do analizy zagadnienia generacji ciśnienia porowego w dnie morskim, a zwłaszcza sformułowanie problemu

w ujęciu dla amplitud naprężenia cyklicznego oraz opracowanie efektywnego algorytmu obliczeniowego. W pracy przedyskutowano też czynniki mające istotny wpływ na rozwiązanie oraz ustosunkowano się krytycznie do wyników uzyskanych przez innych autorów.

2. Oddziaływanie falowania na dno w świetle różnych poglądów

Problem oddziaływania falowania morskiego na dno nabrał istotnego znaczenia dopiero w okresie ostatniego ćwierćwiecza, przede wszystkim w związku z gwałtownym rozwojem inżynierii morskiej. Przegląd zagadnień związanych z rozwojem tej dyscypliny, zwłaszcza w kontekście problemów geotechnicznych, przedstawiony jest w artykule FOCHTA i KRAFTA [2], oraz w książce MAZURKIEWICZA [10]. Zagadnienia związane z obliczaniem ciśnień porowych w dnie morza zostały też zasygnalizowane w artykule [18].

Niniejszy rozdział poświęcony jest omówieniu niektórych, z dotychczas stosowanych, modeli teoretycznych opisujących zjawiska zachodzące w dnie morskim pod wpływem falowania. Celem przedstawionego przeglądu jest pokazanie pewnego postępu, jaki się w ostatnich latach dokonał w tej dziedzinie oraz uwypuklenie znaczenia, jakie może mieć przyjmowanie modeli teoretycznych do opisu omawianego zjawiska. Na tle tego krótkiego przeglądu zaprezentowano podejście autorów niniejszej pracy.

Z obserwacji wiadomo, że falowanie morza wywołuje pewne zjawiska w dnie. Najłatwiej zjawiska te zaobserwować można w strefie bliskiej brzegu, trudniej w obszarach dna odpowiadających większym głębokościom morza. RAHMAN i JABER [15] piszą, że dopiero w 1973 roku Bjerrum zdał sobie sprawę z tego, że falowanie może spowodować upłynnienie dna morza, w związku z prowadzeniem prac projektowych nad posadowieniem konstrukcji offshore na Morzu Północnym. Nieco wcześniej uświadomiono sobie rolę falowania jako czynnika wpływającego na powstawanie osuwisk podmorskich [3]. Problem powstania i rozwoju osuwisk jest niezwykle istotny w rejonach wydobywania ropy naftowej, gdyż płynące masy nawodnionego gruntu mogą zniszczyć konstrukcje wiertnicze oraz rurociągi prowadzące wydobytą ropę. Znany jest przypadek wypłynięcia rurociągu, spowodowany upłynnieniem podłoża, na jezioro Ontario, w wyniku sztormu. W ostatnich latach problem zmian ciśnień porowych w dnie morskim nabrał tak dużego znaczenia, że poświęca mu się sporo uwagi, co przejawia się stosunkowo dużą liczbą publikacji na ten temat. Publikacje te będą omówione w dalszej części pracy. Na razie przypatrzymy się rozwojowi poglądów na temat analizy ciśnień porowych, który dokonał się w ostatnich latach (patrz również [18, 19]).

Najprostszym modelem, który można przyjąć do analizy zmian ciśnień porowych w dnie morskim jest model filtracyjny. Opiera się on na założeniu, że podłoże jest sztywnym ośrodkiem porowatym, a przepływem wody w porach rządzi pewne empiryczne prawo. Najczęściej przyjmuje się tutaj prawo Darcy, które wiąże liniowo prędkość przepływu cieczy z gradientem ciśnienia poprzez współczynnik przepuszczalności.

Teoria filtracji znalazła zastosowanie przy studiowaniu zjawisk zachodzących przy przejściu fal morskich nad dnem. Krótki przegląd prac na ten temat zamieszczony jest w pracach [18, 19]. Tutaj wspomnimy jedynie, że ciśnienia porowe obliczone na podstawie teorii filtracji nie zależą od porowatości ani przepuszczalności podłoża. Taki wynik jest konsek-

wencją przyjętego modelu teoretycznego, który prowadzi do równania Laplace'a dla ciśnień porowych.

Kolejny krok polegał na uwzględnieniu w równaniach filtracji ściśliwości cieczy [12]. Otrzymane wyniki wskazują na istotny wpływ ściśliwości cieczy na rozkład ciśnień porowych, zwłaszcza w górnej warstwie podłoża. Jest to konsekwencją założenia o ściśliwości cieczy, co prowadzi do równania dyfuzji dla ciśnień porowych.

Prévost i inni [14] uważają, że założenie o nieodkształcalności dna jest nierealistyczne i proponują przyjęcie modelu ośrodka odkształcalnego, ale bez przepływu cieczy w porach. Rozwiązanie takiego zadania, oparte na metodach teorii sprężystości, wskazuje, że zmiany ciśnień porowych są istotne w całym profilu, a nie tylko w cienkiej warstwie. Należy tutaj zauważyć, że Prévost i inni [14], przy obliczaniu zmian ciśnień porowych nie uwzględniali zupełnie fizyki zjawisk rządzących zmianami ciśnień porowych, a zatem otrzymane przez nich wyniki są równie nierealistyczne jak wyniki uzyskane przez Moshagena i Tøruma.

Madsen [6] oraz Yamamoto i inni [26], do analizy zmian ciśnień porowych w dnie morza stosują teorię Biota. Jest to podejście bardziej ogólne od wspomnianych poprzednio, gdyż uwzględnia równolegle odkształcalność szkieletu gruntowego, cieczy oraz przepuszczalność ośrodka. Wymienionym autorom udało się uzyskać rozwiązania analityczne dla dna półnieskończonego oraz dla półnieskończonej warstwy, ze względu na prostą geometrię analizowanego zadania oraz założenie o harmonicznym obciążeniu wymuszającego. Yamamoto wyspecjalizował się nawet w zastosowaniu teorii Biota do analizy zmian ciśnień porowych w dnie morza i stosuje ją np. do dna uwarstwionego [27].

Do problemów bardziej złożonych, które uwzględniają współpracę konstrukcji z podłożem, stosuje się jeszcze inne metody obliczeniowe. Na przykład Mei i Foda [11] zakładają, że ruch cieczy może zachodzić jedynie w cienkiej warstwie na pograniczu styku wody z dnem. Zewnętrzna półnieskończona warstwa podłoża traktowana jest jako nieprzepuszczalne kontinuum, którego własności sprężyste zależą od własności szkieletu gruntowego i wody oraz od porowatości. Przy rozwiązaniu zagadnienia autorzy ci uwzględniają poprawkę wynikającą z założenia o warstwie brzegowej, otrzymując w wyniku wzór na ciśnienie porowe. Podejście Mei i Fody omówione jest obszernie przez Maszela [9].

Wszystkie z wymienionych powyżej podejść polegają na zastosowaniu znanych już modeli mechaniki do analizy zmian ciśnień porowych w dnie morza. Wykorzystywanie opanowanych już narzędzi do analizy nowych zagadnień jest naturalnym sposobem pracy, ale trzeba sobie jednocześnie zdawać sprawę z tego, że narzędzia te mogą okazać się nieprzydatne. Tak jest w przypadku zastosowania tych klasycznych metod do analizy problemu generacji ciśnienia porowego, gdyż wymienione podejścia bazują, w najlepszym przypadku, na sprężystym modelu podłoża. Podejścia te nie wnoszą niczego nowego do naszej wiedzy o zachowaniu się dna morza, chociaż mogą być użyteczne jako narzędzie służące analizie pewnych zagadnień inżynierskich.

W latach sześćdziesiątych zdano sobie sprawę z tego, że generacja ciśnienia porowego w nawodnionym ośrodku sypkim spowodowana jest cyklicznym ścinaniem przy ograniczonym odpływie wody z porów. Rozwinęła się wówczas gwałtownie gałąź geotechniki poświęcona problemom zagęszczania ośrodka sypkiego, generacji ciśnienia porowego i upłynnienia gruntu. Przegląd prac na ten temat zamieszczony jest w artykułach [16, 19]. Tutaj, jedynie krótko wyjaśnimy na czym polega mechanizm wymienionych zjawisk.

Wskutek cyklicznego ścinania ośrodek sypki, suchy lub nawodniony, ale z dopuszczeniem swobodnego przepływu wody przez pory, zagęszcza się. Zagęszczenie może nastąpić dlatego, że cykliczne ścinanie powoduje zmiany w ułożeniu ziarenek gruntu, w kierunku gęstszego ich upakowania. Jeżeli odpływ wody z porów jest utrudniony, lub też zupełnie wstrzymany, występuje reakcja uwieżonej wody gruntowej na zagęszczenie, co przejawia się wzrostem ciśnienia wody w porach. To narastanie ciśnienia porowego prowadzi do redukcji naprężeń efektywnych w szkielecie gruntowym, a w skrajnym przypadku do upłynnienia ośrodka, gdy naprężenia efektywne będą równe zeru. Omówione wyżej zjawiska są dobrze poznane, zwłaszcza dzięki badaniom doświadczalnym.

W praktyce, problemy związane z generacją ciśnienia porowego i z upłynnieniem gruntu okazały się bardzo poważne, ze względu na liczne katastrofy związane z tymi zjawiskami. Wymienione zjawiska wymagały opracowania teorii, która uwzględniałaby ich specyfikę. Oprócz wyników badań doświadczalnych, rozpoczęto więc publikowanie najrozmaitszych teorii opisujących zjawiska generacji ciśnienia porowego i stosowano te teorie do analizy przeróżnych problemów praktycznych, w tym również do analizy zmian ciśnień porowych w dnie morskim. Omówienie tych podejść znacznie przekraczałoby ramy niniejszego artykułu, a zatem Czytelnika odsyłamy w tym celu do literatury, np. [19]. Tutaj nadmienimy jedynie, że publikowane podejścia mają empiryczny lub pół-empiryczny charakter. Prace dotyczące analizy zmian ciśnień porowych w dnie morza zostaną bardziej szczegółowo skomentowane w dalszej części niniejszego artykułu.

Z przedstawionego wyżej krótkiego przeglądu wynika, że pewien postęp w omawianej dziedzinie został dokonany z chwilą zidentyfikowania czynników mających wpływ na generację ciśnienia porowego. Nadal ubogi jest materiał doświadczalny pozwalający na weryfikację proponowanych podejść. Niektóre z publikowanych wyników badań w naturze, np. [8], dotyczą jedynie płytkiej warstwy dna morza, gdzie czujniki mierzące zmiany ciśnień porowych zainstalowano do głębokości niewiele przekraczającej 1 m. Warstwa ta znajduje się prawie w bezpośrednim kontakcie z wodą i sprawia najwięcej kłopotu przy analizie z tego względu, że nie bardzo wiadomo jaki przyjąć dla niej model materiału oraz jak poprawnie sformułować warunki brzegowe.

Podejście zaprezentowane w niniejszej pracy oparte jest na teorii zagęszczania nawodnionego ośrodka sypkiego zaproponowanej w pracach [16, 17]. Teoria ta została opracowana dla obciążeń cyklicznych, w ujęciu dla amplitud tensorów naprężenia i odkształcenia cyklicznego. Model teoretyczny opisany jest przez dwa równania konstytutywne. Pierwsze z nich opisuje przyrost zagęszczenia jako funkcję drugiego niezmiennika dewiatora odkształcenia cyklicznego i aktualnego stanu zagęszczenia. Drugie równanie jest związkiem pomiędzy amplitudami naprężenia i odkształcenia cyklicznego. W ramach teorii wyprowadzony jest również związek pomiędzy zagęszczeniem gruntu w warunkach swobodnego przepływu wody przez pory oraz generacją ciśnienia porowego w warunkach bez odpływu. W sposób bezpośredni teoria zagęszczania opisuje zatem samo zjawisko zagęszczenia suchego ośrodka sypkiego (lub nawodnionego, ale przy swobodnym przepływie wody przez pory) oraz zjawisko generacji ciśnienia porowego w nawodnionym gruncie, w warunkach bez odpływu wody z porów, aż do chwili upłynnienia gruntu. Możliwe jest też uwzględnienie zjawiska częściowej dysypacji wygenerowanego ciśnienia porowego.

W niniejszej pracy przedstawione jest zastosowanie teorii zagęszczania do analizy pro-

blemu generacji ciśnienia porowego w dnie morza. Przyjęto założenia, że podłoże jest nawodnionym ośrodkiem sypkim oraz że woda jest uwieczniona w porach. To drugie założenie jest oczywiście aproksymacją rzeczywistego zachowania się badanego układu, ale usprawiedliwioną tym, iż jest to uproszczenie przyjęte w kierunku „bezpiecznym” — jest to, w pewnym sensie, oszacowanie dolne rozwiązania rzeczywistego. Tego typu aproksymacje są stosowane również w innych pracach, np. [4, 13, 15]. Oddziaływanie falowania na dno przyjęto w postaci wynikającej z rozwiązania zagadnienia falowania nad sztywnym dnem. Jest to również przybliżenie, ale autorzy nie dysponowali danymi, które mogłyby pomóc przy formułowaniu warunku brzegowego w bardziej realistyczny sposób. Zresztą problem ten nie wpływa w zasadniczy sposób na stronę merytoryczną zagadnienia. Opracowany algorytm umożliwia przyjęcie innych warunków brzegowych niż te, przyjęte w niniejszej pracy.

Proponowana metoda analizy polega na przyjęciu, że dno morza poddane jest oddziaływaniu szeregu cykli obciążenia (o zadanej amplitudzie), który odpowiada np. przebiegowi sztormu. Ów szereg cykli obciążenia dzieli się na przyrosty ΔN , przy założeniu, że w każdym przedziale ΔN (N oznacza tutaj liczbę cykli) podłoże zachowuje się w sposób niezmienny, tj. jego własności pozostają stałe. Dla każdego z przyrostów ΔN oblicza się odpowiadającą mu generację ciśnienia porowego, następnie modyfikuje się odpowiednie własności podłoża (np. rozkład modułu ścinania G) i przystępuje się do obliczeń dla kolejnego przyrostu cykli obciążenia ΔN . Naszkicowaną procedurę stosuje się do momentu upłynięcia pierwszej z warstw podłoża. Dla warstwy upłyniętej przyjmuje się residualny moduł ścinania i kontynuuje dalej obliczenia. W wyniku otrzymuje się rozwój upłynięcia w dnie morza. W każdym przedziale obliczeniowym przyjmuje się założenie, że reakcja ośrodka jest sprężysta, a obliczenia przeprowadza się przy użyciu metody elementów skończonych. Program został napisany w języku Pascal, na mikrokomputer typu IBM PC-XT.

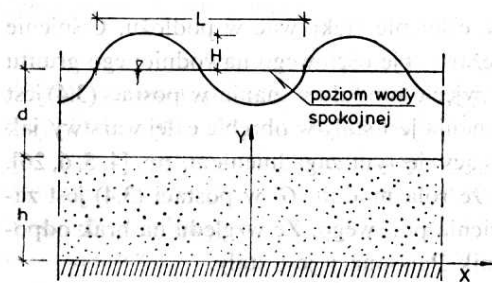
Przedstawiony sposób analizy uwzględnia prawie wszystkie istotne czynniki mające wpływ na generację ciśnienia porowego, takie jak: zmieniający się z głębokością moduł ścinania, degradację tego modułu w miarę narastania ciśnienia porowego, itd. Istotnym czynnikiem, który nie został uwzględniony jest, następująca równoległe z generacją, dyspacja ciśnienia porowego. Czynniki te zostaną uwzględnione w kolejnych pracach autorów.

Zaletą proponowanej metody jest to, że obliczenia mogą być przeprowadzone na mini-komputerze IBM PC, a zatem nie jest to metoda wymagająca dużych nakładów finansowych.

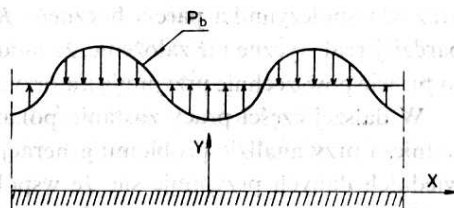
3. Sformułowanie zagadnienia w ramach teorii zagęszczania

Na rys. 1 przedstawiono schematycznie fragment dna morskiego z zaznaczeniem falowania. Dno modeluje się jako półnieskończoną warstwę nawodnionego ośrodka sypkiego o głębokości h . Warstwa ta spoczywa na nieodkształcalnym i nieprzepuszczalnym podłożu np. na skale i rozciąga się w nieskończoność, w kierunku osi x . Głębokość morza oznaczono przez d . Zakłada się, że na morzu występuje falowanie o charakterze sinusoidalnym. Wysokość fali oznaczono przez H , długość przez L .

Falowanie morza powoduje powstanie pewnych ciśnień na górnej krawędzi dna, które z kolei powodują powstanie w ośrodku porowatym naprężeń. Jako uproszczenie można przyjąć, że rozkład ciśnień od falowania wynika z rozwiązania zagadnienia hydrodynamiki, a mianowicie z przejścia fali nad sztywnym dnem. Uproszczenie to jest stosowane przez wielu autorów, np. [5, 13]. W rzeczywistości dno jest ośrodkiem odkształcalnym i porowatym, co ma również wpływ na rozkład ciśnień od falowania. Problem uwzględnienia tych czynników przy obliczaniu ciśnienia jest sam w sobie złożonym zagadnieniem. Tutaj nadmienimy jedynie, że uwzględnienie odkształcalności dna zredukuje wielkość tych ciśnień,



Rys. 1. Falowanie morskie nad dnem



Rys. 2. Rozkład ciśnień od falowania na górnej krawędzi dna

a zatem przyjęte założenie o sztywnym dnie daje w wyniku najbardziej niekorzystny rozkład ciśnienia, przedstawiony na rys. 2. Wielkość ciśnienia oblicza się z następującego wzoru:

$$p_b = p_0 \sin(\lambda x - \omega t), \quad (3.1)$$

$$p_0 = \frac{\gamma_w H}{2 \cosh(\lambda d)}, \quad (3.2)$$

gdzie: γ_w oznacza ciężar jednostkowy wody (w przybliżeniu 10 kN/m^3), $\lambda = 2\pi/L$ jest liczbą falową, ω oznacza częstość kołową falowania. Pozostałe oznaczenia wyjaśniono w tekście powyżej. Częstość kołową wylicza się ze wzoru:

$$\omega^2 = g \frac{2\pi}{L} \text{th} \frac{2\pi d}{L}, \quad (3.3)$$

gdzie g jest przyspieszeniem ziemskim.

Zauważmy, że obliczone w ten sposób ciśnienia powodują na przemian ściskanie i rozciąganie na linii styku wody z dnem. Jeżeli dno zbudowane jest np. z piasku, to owe rozciągania będą powodowały odrywanie ziarenek w pewnych obszarach tak, że zakres oddziaływania tych sił na dno będzie ograniczony tylko do strefy bliskiej linii dna. W głębiej położone rejony dna będą przekazywane jedynie ściskania. Zasięg strefy, w której występują te trudne do opisanego zjawiska, wynosi 1 - 2 m (wg informacji uzyskanej od prof. S. Massela). Tak więc, przy praktycznej interpretacji wyników obliczeń należy pamiętać o powyższych uwagach. Uwagi te są również istotne przy formułowaniu warunków brzegowych na styku dna z morzem. Przykładowo, można przyjąć, że na dno przekazują się je-

dynie ściskania, a w rejonach rozciąganych obowiązuje warunek zerowych ciśnień. Można też przyjąć, że na górnej krawędzi dna jest przyłożone równomiernie rozłożone obciążenie pionowe, wynikające z oddziaływania cienkiej warstwy nawodnionego gruntu na styku morze-dno. Problem ten pozostawiamy na razie otwarty.

Jako model dna przyjmujemy warstwę sprężystą spoczywającą na sztywnym podłożu. Warstwa ta jest niejednorodna, gdyż moduł ścinania piasku zależy od głębokości (patrz np. [16]). W niniejszej pracy przyjęto następujący wzór na moduł ścinania G :

$$G = G_0 + G_1 \sqrt{\bar{p}}, \quad (3.4)$$

gdzie G_0 i G_1 są liczbami, zaś \bar{p} oznacza średnie ciśnienie efektywne w podłożu. Ciśnienie to jest funkcją głębokości i zależy również od ciężaru objętościowego nawodnionego gruntu oraz od współczynnika parcia bocznego K_0 . Przyjęcie modułu ścinania w postaci (3.4) jest bardziej realistyczne niż założenie, że moduł ścinania jest stały w obrębie całej warstwy, jak to prawie powszechnie przyjmują autorzy zajmujący się tym zagadnieniem, np. [4, 5, 6, 26].

W dalszej części pracy zostanie pokazane, że rola modułu G , w postaci (3.4) jest zasadnicza przy analizie problemu generacji ciśnienia porowego. Ze względu na brak odpowiednich danych przyjmuje się, że współczynnik Poissona ν jest stały.

W trakcie falowania, na górnej krawędzi dna, wystąpią obciążenia cykliczne, dane wzorem (3.1). Obciążenia te wywołują w dnie powstanie odpowiednich cyklicznych naprężeń σ i odkształceń E . Zgodnie z teorią zagęszczania [16, 17] w podłożu (przy założeniu warunków bez odpływu wody z porów) zacznie generować się ciśnienie porowe. W danym elemencie podłoża generację ciśnienia porowego obliczymy wykorzystując podstawowe związki teorii zagęszczania:

$$\frac{d\Phi}{dN} = D_1 J \exp(-D_2 \Phi), \quad (3.5)$$

$$u = \frac{\phi_0}{(1-\phi_0)\kappa} \Phi = \frac{1}{a} \Phi, \quad (3.6)$$

gdzie Φ jest zagęszczeniem, N liczbą cykli obciążenia, J jest drugim niezmiennikiem dwiatora odkształceń cyklicznych, D_1 i D_2 są stałymi materiałowymi charakteryzującymi zdolność gruntu do zagęszczania, U oznacza ciśnienie porowe generowane w wyniku cyklicznego ścinania, ϕ_0 jest początkową porowatością, κ oznacza moduł ściśliwości szkieletu gruntowego.

Podstawienie związku (3.6) do (3.5), a następnie scałkowanie, prowadzi do następującego wyrażenia na ciśnienie porowe:

$$u = \frac{1}{D_2 a} \ln [\exp(D_2 a u_0) + D_1 D_2 J (N - N_0)], \quad (3.7)$$

gdzie u_0 i N_0 oznaczają odpowiednio ciśnienie porowe i liczbę cykli w momencie początkowym, u i N oznaczają ich wartości bieżące. Zauważmy, że wzór (3.7) został otrzymany przy założeniu, że wartość J pozostaje stała w przedziale liczby cykli obciążenia $\Delta N = N - N_0$.

W przypadku płaskiego stanu odkształcenia, z którym mamy do czynienia w analizowanym przypadku, wielkość J dana jest wzorem:

$$J = \frac{1}{2} [(E_x - E_y)^2 + E_x E_y] + E_{xy}^2, \quad (3.8)$$

gdzie E_x , E_y i E_{xy} są składowymi tensora amplitud odkształceń cyklicznych E . Tensor ten każdorazowo oblicza się dla zadanego programu obciążenia na górnej krawędzi dna. Obliczenia przeprowadza się metodą elementów skończonych.

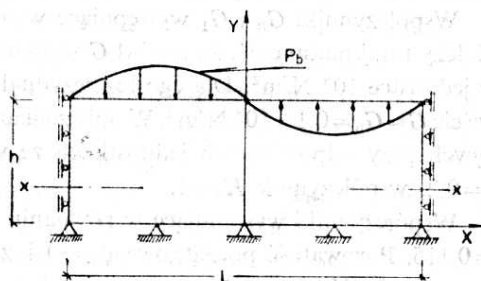
Po obliczeniu wzorem (3.7) ciśnienia porowego u , wygenerowanego w wyniku działania liczby cykli obciążenia ΔN , należy w podłożu zmodyfikować rozkład średniego ciśnienia efektywnego \bar{p} , wg wzoru:

$$\bar{p} = \bar{p}^* - u, \quad (3.9)$$

gdzie \bar{p}^* oznacza początkowe średnie naprężenie efektywne. Następnie oblicza się, ze wzoru (3.4), nową wartość modułu ścinania G . Dla tych nowych wartości G i zadanego programu obciążenia przeprowadza się znowu obliczenia metodą elementów skończonych, wyznacza nową wartość J , generację ciśnienia, itd. Tak więc w każdym kroku obliczeniowym, odpowiadającym ΔN , modyfikuje się własności podłoża przez uwzględnienie nowego rozkładu G .

Jeżeli w danym elemencie ciśnienie porowe zostanie wygenerowane do takiego poziomu, że $\bar{p} = 0$, to wówczas mówi się, że ten element upłynął się. Algorytm obliczeniowy przewiduje w takiej sytuacji przyjęcie dla tego elementu rezydualnej wartości modułu G i prowadzenie dalszych obliczeń. Program na mikrokomputer powinien być tak napisany, aby drukował numer upłynionego elementu i liczbę cykli odpowiadającą chwili upłynienia. W ten sposób można śledzić rozwój stref upłynienia w dnie.

Pewnego komentarza wymaga sama metoda analizy. Zauważmy, że wobec założenia o sinusoidalnym charakterze falowania rozwiązanie będzie powtarzało się w obrębie długości fali L . Wobec tego naturalne wydaje się przeprowadzenie obliczeń numerycznych w obrębie jednej długości fali (patrz rys. 3).



Rys. 3. Schemat przyjęty do obliczeń numerycznych

Zauważmy też, że w obrębie jednego cyklu falowania, o okresie $T = 2\pi/\omega$, w każdym punkcie warstwy leżącym na jednym poziomie (np. w przekroju $x-x$ na rys. 3) wystąpią te same naprężenia, tylko nieco przesunięte w czasie. Teoria zagęszczania, którą stosujemy w niniejszej pracy, sformułowana jest dla amplitud naprężenia i odkształcenia cyklicznego. Amplitudy te będą jednakowe we wszystkich punktach leżących na jednym poziomie, w ramach jednego cyklu. Wobec powyższego, dla zadanej wartości ΔN , można przeprowadzić obliczenia metodą elementów skończonych tylko jeden raz, dla schematu obciążenia przed-

stawionego na rys. 3. Otrzymamy w ten sposób rozkład E_x , E_y i E_{xy} w badanym fragmencie dna, a następnie obliczymy rozkład J . Następnie porównujemy wartości J otrzymane dla elementów leżących na jednym poziomie i jako miarodajną wartość wybieramy J_{\max} z badanego zbioru J . Dla tej wartości obliczamy generację ciśnienia porowego i następnie modyfikujemy G . Widać stąd, że G będzie zmieniało się tylko z głębokością.

Przedstawiona metoda opiera się na uśrednieniu zachowania podłoża w przedziale odpowiadającym liczbie cykli ΔN . Dobór ΔN musi wynikać z eksperymentów numerycznych i nie może w istotny sposób wpływać na wartość rozwiązania. Może to być przykładowo 10 cykli, 20 czy też 1 cykl. Widzimy, że proponowana teoria i związana z nią metoda rozwiązania zagadnienia brzegowego nie dają nam informacji o tym, co dzieje się z ciśnieniem porowym w ramach poszczególnego cyklu. Zresztą ta sprawa nas nie interesuje. Interesuje nas uśredniony trend w zmianach ciśnienia porowego, to znaczy sam proces generacji.

Dzięki przyjętym założeniom proponowana metoda jest bardzo efektywna z punktu widzenia numeryki. Wykorzystuje się w niej program na metodę elementów skończonych dla ośrodka sprężystego. Za pomocą tego programu wyznacza się jednorazowo rozkład odkształceń w dnie, dla każdego kroku obliczeniowego. Program taki jest stosunkowo prosty i może być stosowany na mikrokomputerach.

W następnym rozdziale przedstawiono wyniki obliczeń przeprowadzonych dla konkretnych danych odpowiadających Morzu Bałtyickiemu.

4. Przykład analizy

Do obliczeń numerycznych wybrano następujące dane: głębokość morza $d=15$ m, miąższość dna $h=15$ m, długość fali $L=60$ m, wysokość fali $H=2, 4, 6$ m (obliczenia przeprowadzono dla różnych programów obciążeń, którym odpowiadały różne wysokości fali).

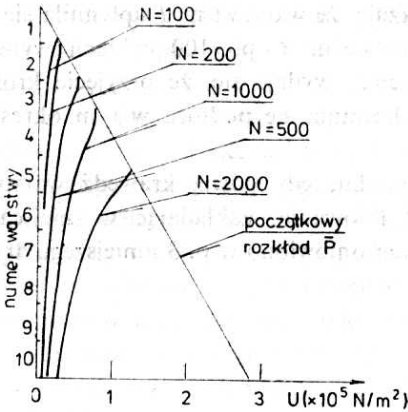
Współczynniki G_0 i G_1 występujące w równości (3.4) przyjęto odpowiednio 0,1 i 0,7. Należy tutaj nadmienić, że moduł G wyrażony jest w jednostce 10^8 N/m², zaś naprężenia w jednostce 10^5 N/m². Dlatego też rezydualny moduł ścinania (gdy $\bar{p}=0$) wynosi rzeczywiście $G=G_0=0,1 \times 10^8$ N/m². W obliczeniach numerycznych używa się mnożników skalujących przy odpowiednich jednostkach ze względu na wygodę. Współczynnik Poissona $\nu=0,2$, współczynnik $K_0=1$.

Współczynniki występujące w równaniu (3.5) są odpowiednio równe: $D_1=1,74$, $D_2=0,115$. Porowatość początkowa $\phi_0=0,4$, zaś współczynnik ściśliwości szkieletu gruntuowego $\kappa=2$. Współczynnik κ wyrażony jest w jednostce 10^{-8} m²/N, a więc odwrotności jednostki modułu G . Liczby te odpowiadają średnio zagęszczonego piaskowi.

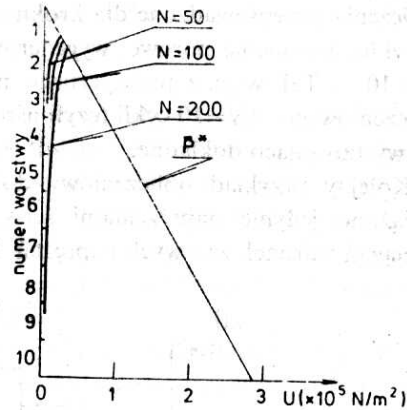
Jako pierwszy przykład rozpatrzmy zachowanie się podłoża pod działaniem fali o wysokości $H=6$ m. W pierwszej kolejności obliczenia przeprowadzono dla 2000 cykli falowania z krokiem obliczeniowym $\Delta N=100$ cykli. Jest to dosyć duże przybliżenie, gdyż metoda obliczeniowa zakłada uśrednione zachowanie się podłoża w obrębie jednego cyklu obliczeniowego, odpowiadającego liczbie cykli ΔN . Ten duży krok obliczeniowy pozwoli nam z grubsza zorientować się w charakterze generacji ciśnienia porowego.

Analizowany obszar podzielono w kierunku pionowym na 10 części, a w kierunku poziomym na 20 części tak, że w sumie jest $10 \times 20 = 200$ prostokątnych elementów skończonych.

Na rys. 4 przedstawiono generację ciśnienia porowego dla przypadku $H=6$ m i $\Delta N=100$. Widać, że w pierwszym kroku obliczeniowym upłynęła się warstwa nr 1. Po liczbie cykli $N=400$ upłynęła się już druga warstwa. Na rys. 4 zaznaczono rozkład u tylko dla wybranych wartości liczby cykli N , ale tendencja do upłynięcia jest widoczna. Rozwój strefy upłyniętej następuje w dół warstwy. Po 1000 cyklach już trzy górne warstwy uległy upłynięciu, a dla $N=2000$ widzimy, że bliska upłynięcia jest już piąta warstwa.



Rys. 4. Generacja ciśnienia porowego przy fali $H=6$ m i kroku obliczeniowym $\Delta N=100$



Rys. 5. Generacja ciśnienia porowego dla $H=6$ m i $N=10$

Otrzymane wyniki są jakościowo zgodne z wynikami uzyskanymi przez innych autorów, np. [1, 15], nie wnikając w sposoby otrzymania tych rezultatów. Szybkie upłynięcie warstwy nr 1 spowodowane jest tym, że moduł ścinania w tej warstwie jest najmniejszy, małe jest tam początkowe naprężenie efektywne \bar{p}^* , jak też tym, że analizę przeprowadza się przy założeniu warunków bez odpływu wody z porów. Otrzymano zatem generację „najszybszą z możliwych”, gdyż dopuszczenie częściowego drenażu ciśnienia porowego spowoduje wydłużenie procesu generacji. Otrzymany wynik należy zatem traktować jako dolne oszacowanie procesu generacji ciśnienia porowego.

Nie należy do celów niniejszej pracy rozstrzygnięcie problemu, w jakim stopniu realistyczne są uzyskane wyniki. Celem pracy jest przede wszystkim dostarczenie efektywnego narzędzia analizy problemu generacji ciśnienia porowego. Widzimy, że narzędzie to daje wyniki jakościowo zgodne z obserwacją. Niestety, autorzy nie dysponowali odpowiednim materiałem doświadczalnym, który mógłby pozwolić na porównanie teorii z eksperymentem. Omawiana sytuacja jest chyba typowa dla geotechniki, gdzie nie zawsze udaje się np. ze względu na wysokie koszty uzyskać odpowiedni materiał empiryczny. Analiza teoretyczna jest, w takich przypadkach, znacznie mniej kosztownym sposobem uzyskania w miarę wiarygodnych wyników.

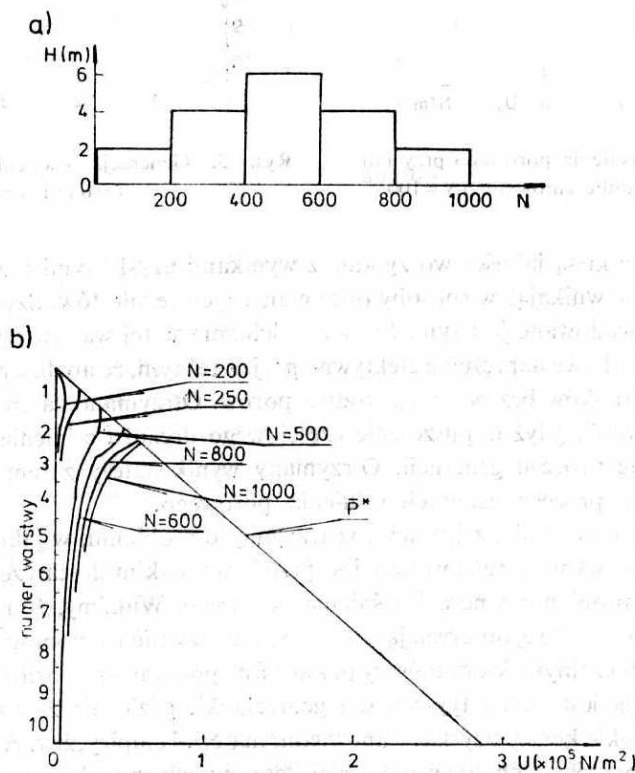
Przy wykonywaniu obliczeń dla konkretnych warunków należy oczywiście doświad-

czalnie wyznaczyć parametry charakteryzujące podłoże, tj. współczynniki G_0 , G_1 , D_1 , D_2 , κ itd.

Przypatrzymy się teraz, jaki ma wpływ na wyniki przyjęcie kroku obliczeniowego ΔN . Rozpatrzmy dwa przypadki $\Delta N=10$ i $\Delta N=5$, dla początkowego etapu obciążenia, do liczby cykli $N=200$.

Na rys. 5 przedstawiono generację ciśnienia porowego dla przypadku $H=6$ m i $\Delta N=10$ cykli. Upłynięcie warstwy nr 1 nastąpiło w 50 cyklu. Z porównania rys. 4 i 5 wynika, że rozkład ciśnienia wygenerowanego po 100 cyklach jest bardzo zbliżony w przypadkach $\Delta N=100$ i $\Delta N=10$. Przykładowo, w warstwie nr 3, po 100 cyklach obciążenia otrzymuje się odpowiednio $u=7,15 \times 10^{-2}$ oraz $7,39 \times 10^{-2}$ (oczywiście w jednostkach 10^5 N/m^2). Obliczenia przeprowadzone dla kroku $\Delta N=5$ pokazują, że warstwa nr 1 upłynęła się w 45 cyklu, a ciśnienie porowe, wygenerowane w warstwie nr 3, po 100 cyklach wynosi $7,4 \times 10^{-2}$. Tak więc, z praktycznego punktu widzenia, wydaje się, że przyjęcie kroku obliczeniowego $\Delta N=10$ cykli (czyli uśrednienie zachowania się podłoża w tym okresie) jest wystarczająco dokładne.

Kolejny przykład obliczeniowy dotyczył przypadku, gdy górną krawędź warstwy obciążono jedynie naprężeniami ściskającymi od falowania, zakładając w miejscach rozciagań warunek zerowych naprężeń. Przypadek ten omówiono w p. 3 niniejszego arty-



Rys. 6. A – rozkład sztormu, B – generacja ciśnienia porowego spowodowana sztormem przedstawionym na rys. 6A

kułu. Jako krok obliczeniowy przyjęto $\Delta N=10$. Upłynnienie pierwszej warstwy nastąpiło po 50 cyklach obciążenia, podobnie jak w przypadku obciążenia pełną sinusoidą, przy dopuszczeniu rozciągań. Ciśnienie porowe wygenerowane w warstwie nr 3 po 100 cyklach wynosi $7,34 \times 10^{-2}$ wobec $7,39 \times 10^{-2}$ dla pełnej sinusoidy. Po 150 cyklach obciążenia otrzymujemy w warstwie nr 2 odpowiednio $1,7982 \times 10^{-1}$ i $1,7984 \times 10^{-1}$, czyli praktycznie jednakowy wynik. Wynika stąd wniosek, że formalne dopuszczenie rozciągań na górnej krawędzi dna nie ma praktycznie wpływu na proces generacji ciśnienia porowego.

I wreszcie, jako ostatni przykład, przedstawimy wyniki obliczeń dla bardziej złożonego programu obciążenia, odpowiadającego stopniowo rozwijającemu się, a następnie zanikającemu sztormowi. Oddziaływanie sztormu przedstawione jest w postaci pięciu, kolejno działających, pakietów fal o wysokościach odpowiednio 2, 4, 6, 4 i 2 m. Przyjęto że w każdym pakiecie jest 200 cykli obciążenia (rys. 6A). Krok obliczeniowy wynosi $\Delta N=10$.

Na rys. 6B przedstawiono generację ciśnienia porowego dla tego przypadku. Pierwszy pakiet fal, o wysokości fali $H=2$ m, nie powoduje upłynnienia, a jedynie wygenerowanie niewielkiego ciśnienia porowego. Upłynnienie pierwszej warstwy następuje na początku działania drugiego pakietu, o wysokości fali $H=4$ m, już w 250 cyklu. Druga warstwa upływnia się w 560 cyklu, czyli pod koniec działania pakietu fal o maksymalnej wysokości $H=6$ m. Widzimy też, że następne pakiety, o malejącej wysokości fali, powodują już stosunkowo niewielką generację ciśnień porowych.

Tak więc, w wyniku założonego sztormu, upłynęły się jedynie dwie górne warstwy dna, co odpowiada głębokości 3 m. Przedstawiony przykładowo sztorm odpowiada łącznie 1000 cyklom obciążenia. Czas trwania jednego cyklu wynosi około 6 s, a zatem łączny czas oddziaływania obciążeń cyklicznych na dno wynosi nieco ponad 1,5 godziny. Włączenie mechanizmu dysypacji ciśnienia porowego w tym czasie spowodowałoby zmniejszenie prędkości generacji. Problem ten będzie tematem odrębnej pracy, jako mający duży wpływ na badane zagadnienie, patrz [25].

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono efektywną metodę analizy problemu generacji ciśnienia porowego w dnie morskim poddanym obciążeniu cyklicznemu od falowania. Zaproponowana metoda oparta jest na opracowanej przez SAWICKIEGO [16, 17] teorii zagęszczania nawodnionego ośrodka sypkiego.

Opracowany algorytm obliczeniowy zakłada uśrednienie zachowania się podłoża w każdym kroku obliczeniowym, scharakteryzowanym liczbą cykli ΔN . Po każdym kroku oblicza się wygenerowane ciśnienie porowe, następnie modyfikuje się własności sprężyste podłoża, wyznacza rozkład odkształceń ścinających w tym kroku, następnie generację ciśnienia itd. Algorytm umożliwia analizę podłoża zbudowanego z różnych warstw, o różniących się własnościach. Najpoważniejszym uproszczeniem proponowanej metody jest przyjęcie założenia o warunkach bez odpływu wody z porów. Uwzględnienie mechanizmu dysypacji ciśnienia porowego będzie tematem kolejnej pracy.

Przedstawiona metoda oparta jest na realistycznych założeniach fizycznych. Wiele analiz przeprowadzanych przez innych autorów nie uwzględnia zmienności modułu ścinania wraz z głębokością, np. NATARAJA i GILL [13]. Wymienieni autorzy popełniają ponadto fundamentalne błędy w swoich pracach, które są sprzeczne z zasadami fizyki. Do najpoważniejszych błędów należy przyjmowanie wyróżnionego układu współrzędnych, o osiach skierowanych pionowo i poziomo. Następnie autorzy ci obliczają napężenie styczne w tym układzie, τ_{xy} , które czynią odpowiedzialnym za generację ciśnienia porowego, ignorując pozostałe składowe tensora odkształcenia. A przecież jeżeli obrócimy ten układ współrzędnych, co nam wolno zrobić, a następnie obliczymy τ_{xy} w tym układzie, to otrzymamy inną wartość ciśnienia porowego, co jest nonsensem. W ujęciu zaproponowanym przez autorów, za generację ciśnienia porowego odpowiedzialny jest niezmiennik tensora amplitud odkształcenia J , a zatem to ujęcie pozbawione jest mankamentów, które obarczają prace Nataraji i Gilla, jak też innych autorów.

Wiele prac na temat ciśnień porowych jest pisanych bardzo mętnie i czytelnik nie jest w stanie właściwie z nich skorzystać, chociażby w formie nauczania się jakiegoś narzędzia analizy. Autorzy takich prac, np. [1, 5], operują nazwami enigmatycznych programów, przedstawiają szereg wykresów porównawczych itd. Wydaje się, że przedstawiona praca wolna jest również i od tego typu mankamentów, gdyż na podstawie przedstawionego algorytmu zainteresowany czytelnik może napisać własny program i sprawdzić otrzymane wyniki. Warto tutaj zaznaczyć, że program taki napisał niezależnie W. Świdziński w języku Fortran. Autorzy wykorzystywali program napisany w języku Pascal. Testowe przykłady wykazały, że otrzymano identyczne wyniki.

Wydaje się, że przedstawiona metoda może być już z powodzeniem stosowana do analizy problemów o znaczeniu praktycznym.

Autorzy pragną wyrazić podziękowanie mgr. inż. W. ŚWIDZIŃSKIEMU za udział w dyskusjach dotyczących obliczeń numerycznych.

Niniejsza praca została napisana w ramach CPBP 02.12, temat 4.2, koordynowanego przez IBW PAN, Gdańsk.

LITERATURA

1. W. D. L. FINN, R. SIDDHARTHAN, G. R. MARTIN, Response of Seafloor to Ocean Waves, Proc. ASCE, Jnl Geotech. Eng., vol. 109, No. 4, 1983.
2. J. A. FOCHT Jr., L. M. KRAFT Jr., Progress in Marine Geotechnical Engineering, Proc. ASCE, Jnl Geot. Eng. Div., vol. 103, GT 10, 1977.
3. D. J. HENKEL, The role of waves in causing submarine landslides, Géotechnique, vol. 20, No. 1, 1970.
4. K. ISHIHARA, A. YAMAZAKI, Analysis of wave-induced liquefaction in seabed deposits of sand, Soils and Foundations, vol. 24, No. 3, 1984.
5. L. M. KRAFT Jr., S. C. HELFRICH, Stresses Due to Wave-Induced Bottom Pressures, Proc. ASCE, Jnl Geotech. Eng., vol. 109, No. 7, 1983.
6. O. S. MADSEN, Wave induced pore pressures and effective stresses in a porous bed, Géotechnique, vol. 28, No. 4, 1978.

7. W. W. MALLARD, R. A. DALRYMPLE, Water waves propagating over a deformable bottom, Proc. Offshore Tech. Conf. 2895, Houston, Texas, 1977.
8. S. MASSEL, Rozkład ciśnień porowych wywołanych falowaniem wiatrowym w piaszczystej warstwie dna morskiego, Rozpr. Hydrot., z. 44, 1982.
9. S. MASSEL, Zastosowanie teorii gruntowej warstwy granicznej w hydromechanice i inżynierii morskiej, Arch. Hydrot. XXXII, No. 2, 1985.
10. B. MAZURKIEWICZ, Mechanika gruntów dna morskiego, PWN, Warszawa—Łódź, 1985.
11. C. C. MEI, M. A. FODA, Wave-induced stresses around a pipe laid on a poro-elastic bed, Géotechnique, vol. 31, No. 4, 1981.
12. H. MOSHAGEN, A. TØRUM, Wave induced pressures in permeable seabeds, Proc. ASCE, Jnl Waterways, Harbors and Coastal Eng., vol. 101, WW1, 1975.
13. M. S. NATARAJA, H. S. GILL, Ocean Wave-Induced Liquefaction Analysis, Proc. ASCE, Jnl Geotech. Eng., vol. 109, No. 4, 1983.
14. J. H. PRĚVOST, O. EIDE, K. H. ANDERSON, Wave induced pressures in permeable seabeds, Proc. ASCE, Jnl Waterways, Harbors and Coastal Eng., vol. 101, WW4, 1975.
15. M. S. RAHMAN, W. Y. JABER, A simplified drained analysis for wave-induced liquefaction in ocean floor sands, Soils and Foundations 26, No. 3, 1986.
16. A. SAWICKI, An engineering model for compaction of sand under cyclic loading, Rozpr. Inż., 4, 1987.
17. A. SAWICKI, Uproszczony model zachowania się piasku przy obciążeniach cyklicznych, VIII Krajowa Konf. Mech. Gruntów i fundamentowania, Wrocław 1987.
18. A. SAWICKI, O ciśnieniach porowych w dnie morskim. Inż. Morska, nr 6, 1983.
19. A. SAWICKI, Mechanika ścinanego cyklicznie gruntu, Zesz. Nauk. PG, Bud. Wodne XXVII, Nr 400, 1987.
20. A. SAWICKI, W. ŚWIDZIŃSKI, P. ŚLIWIŃSKI, Zastosowanie modelu zagęszczania do analizy warstwy gruntu poddanej trzęsieniu ziemi, VIII Krajowa Konf. MGIF, Wrocław 1987.
21. A. SAWICKI, J. ŚWIDZIŃSKI, Redystrybucja obciążenia poboczniczy i podstawy pala obciążonego cyklicznie w ujęciu teorii zagęszczania, VIII Krajowa Konf. MSiF, Wrocław 1987.
22. A. SAWICKI, W. ŚWIDZIŃSKI, Oszacowanie osiadania fundamentu obciążonego cyklicznie, Arch. Hydrot. XXXIII, No. 1 - 2, 1986.
23. A. SAWICKI, W. ŚWIDZIŃSKI, Generacja ciśnienia porowego w podłożu pod falochronem, Arch. Hydrot. (w przygotowaniu do druku).
24. W. ŚWIDZIŃSKI, A. SAWICKI, Settlement analysis of a powerplant foundation, C. R. Colloque Franco-Polonais, Grenoble 1987.
25. H. B. SEED, I. M. IDRIS, On the Importance of Dissipation Effects in Evaluating Pore Pressure Changes due to Cyclic Loading, in: Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads, ed. G. N. Pande and O. C. Zienkiewicz, John Wiley and Sons Ltd, 1982.
26. T. YAMAMOTO, H. L. KONING, H. SELMEIJER, E. van HJUM, On the response of a poro-elastic bed to water waves, Jnl Fluid Mech., vol. 87, part 1, 1978.
27. T. YAMAMOTO, Wave-induced pore pressures and effective stresses in inhomogeneous seabed foundations, Ocean Engng., vol. 8, No. 1, 1981.

Генерация порового давления в морском дне, вызванная волнением

Содержание

Представлен анализ проблемы генерации порового давления в морском дне, вызванного давлением. Анализ проведен на основе предложенной А. Савицким теории уплотнения и эффективного численного алгоритма. Представленный алгоритм предполагает осреднение поведения основания на каждом расчетном шаге. На каждом расчетном шаге определяется генерируемое поровое давле-

ние, затем модифицируются упругие свойства основания, после чего осуществляется переход на следующий расчетный шаг. На каждом шаге один раз определяется распределение деформаций методом конечных элементов. Представленный метод полагает использование для численных расчетов микрокомпьютера. Рассмотрен численный алгоритм, представлены примеры и широкое обсуждение.

Wave-induced pore pressure generation in seabeds

Summary

An efficient method for estimating the wave-induced pore pressure generation in sandy seabeds is presented. The method is based on the compaction theory proposed by Sawicki and a simple numerical approach based on the averaging of seabed behaviour within the range of few, up to tens, cycles. The approach proposed takes into account a seabed inhomogeneity and the changes of soil properties during the pore pressure generation, up to liquefaction. It is also possible to study the development of liquefied zones in a subsoil. In the paper the fundamentals of the method are presented and discussed, as well as numerical results shown. An advantage of the method proposed is that it may be used to solve boundary value problems with the help of micro-computers, like IBM PCs for example. A criticism of some recent approaches to the problem of wave-induced pore pressure generation is also included in this paper.