

ANDRZEJ SAWICKI, WALDEMAR ŚWIDZIŃSKI*

Generacja ciśnienia wody w porach w ilastym dnie morskim

1. Wstęp

Opis zachowania się ilastego dna morza ma duże znaczenie praktyczne ze względu na rozwój konstrukcji pełnomorskich. Konstrukcje takie jak np. platformy wiertnicze muszą być odporne na działanie falowania wiatrowego towarzyszącego sztormom. Obciążenia platform mają charakter cykliczny i są też cyklicznie przenoszone przez konstrukcję na podłoże, powodując w nim generację ciśnienia wody w porach, które z kolei prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości podłoża na ścinanie.

Zagadnieniem mechaniki cyklicznie obciążonych ilów rozpoczęto intensywnie interesować się w związku z budową platform wiertniczych na Morzu Północnym. W laboratoriach brytyjskich, holenderskich i norweskich przeprowadzono, niezależnie od siebie, szereg doświadczeń na próbkach t.zw. ilu „Drammen” w celu zbadania jego reakcji na obciążenie cykliczne. Badania przeprowadzono przy użyciu aparatów prostego ścinania cyklicznego i cyklicznych aparatów trójosioowych. Ich opis oraz zbiorcze zestawienie wyników przedstawiono w raporcie Norwegian Geotechnical Institute (*Research project ... 1975*), który jest, jak dotąd, najbardziej obszernym źródłem informacji na interesujący nas temat.

Wspomniane badania doświadczalne, które miały charakter rozpoznawczy, posłużyły za punkt wyjścia do empirycznych lub teoretycznych prób opisu zachowania się ilu pod wpływem obciążeń cyklicznych. Wydaje się, że pierwszą taką próbę podjął Andersen (1976), który zaproponował empiryczną metodę określenia t.zw. zakumulowanego odkształcenia cyklicznego. Jednym z celów postawionych przez zespół Andersena jest opracowanie metody umożliwiającej analizę stateczności konstrukcji pełnomorskich posadowionych na ilastym podłożu.

Interesujące podejście do opisu zachowania się ilu poddanego cyklicznemu ścinaniu przedstawili Eekelen i Potts (1978). Do opisu zachowania się materiału w zakresie obciążeń statycznych proponują oni przyjęcie modelu Cam-Clay, zaś efekty związane

*Prof. dr hab.inż. Andrzej SAWICKI, dr inż. Waldemar ŚWIDZIŃSKI, Instytut Budownictwa Wodnego PAN, ul. Kościarska 7, 80-953 Gdańsk-Oliwa

z obciążeniem cyklicznym opisane są teorią zaproponowaną wcześniej przez Eekelena (1977). W teorii tej przyjęto, że liczba cykli obciążenia jest zmienną ciągłą. Zachowanie się ładu określone jest zmienną zwaną *parametrem zmęczenia*, którego rolę pełni wygenerowane ciśnienie wody w porach.

Alternatywę do teorii Eekelena i Potts'a przedstawili Sawicki i Przewłócki (1988). Zaproponowali oni empiryczny model cyklicznie ścinanego ładu na podstawie danych doświadczalnych przedstawionych w raporcie NGI (*Research project ... 1975*). Model ten zdefiniowany jest przez równanie różniczkowe opisujące generację ciśnienia wody w porach oraz empiryczny wzór na moduł ścinania ładu.

W niniejszej pracy przedstawiono zastosowanie modelu zaproponowanego przez Sawickiego i Przewłockiego do analizy procesu generacji ciśnienia wody w porach w ilastym dnie morskim obciążonym cyklicznie i wywołanym stanem naprężenia na kontakcie: fundament konstrukcji pełnomorskiej – podłoże. Przy formułowaniu zagadnienia brzegowego wykorzystano opracowany wcześniej przez autorów algorytm numeryczny (Sawicki i in. 1988). Obliczenia przeprowadzono dla danych odpowiadających warunkom Morza Północnego. Obliczono również równania na generację ciśnienia wody w porach zaproponowane przez Eekelena i Potts'a (1978).

Należy wspomnieć, że wyniki niniejszej pracy mogą mieć pewne zastosowanie w warunkach polskich, gdyż duża część dna Bałtyku zbudowana jest z łąw. Badania laboratoryjne zjawisk zachodzących w łąwach bałtyckich pod wpływem obciążeń cyklicznych zostały już zapoczątkowane w IBW PAN (1988).

2. Sformułowanie problemu

Na rys. 1 przedstawiono prosty schemat układu: konstrukcja – podłoże. Dla uproszczenia przyjmuje się, że jedynymi siłami, które działają na kontakcie: fundament – podłoże są ciężar własny konstrukcji Q oraz moment M wywołany falowaniem. Moment M jest wielkością zmieniającą się cyklicznie. W przypadku ogólnym obciążenia powinna jeszcze wystąpić cyklicznie składowa pozioma wektora obciążenia, jednakże pominie ją w niniejszej pracy jako obciążenie drugorzędne.

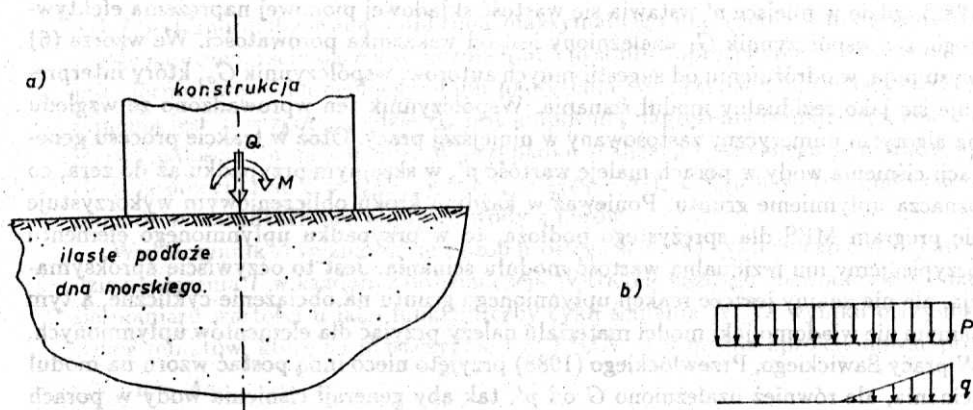
Ciężar własny konstrukcji wywiera na podłoże pewien nacisk, który przyjmuje się jako równomierne obciążenie p (rys. 1b). Moment M powoduje cykliczne zmiany składowej pionowej naprężenia, którego kształt można w przybliżeniu przedstawić tak, jak na rys. 1b. Wielkość q oznacza amplitudę składowej pionowej naprężenia cyklicznego przy krawędzi fundamentu. Zakłada się, że naprężenia od momentu M zmieniają się sinusoidalnie.

Naprężenia i odkształcenia w podłożu można zatem rozłożyć na część „statyczną” (lub niecykliczną) oznaczoną indeksem N i na część cykliczną oznaczoną indeksem C .

$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma}^N + \underline{\sigma}^C, \quad (1)$$

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}^N + \underline{\varepsilon}^C, \quad (2)$$

gdzie $\underline{\sigma}$ oznacza tensor naprężenia, $\underline{\varepsilon}$ jest tensorem odkształcenia.



Rys. 1. (a) Schemat konstrukcji na podłożu.

(b) Składowa normalna naprężenia w kontakcie: konstrukcja – dno

Zakładamy, że cykliczne składowe tensorów (1) i (2) zmieniają się harmonicznymi w czasie:

$$\tilde{\sigma}^C = e^{i\omega t} \tilde{T}, \quad (3)$$

$$\tilde{\varepsilon}^C = e^{i\omega t} \tilde{E}, \quad (4)$$

gdzie ω jest częstością kołową obciążenia cyklicznego, a wielkości $\tilde{T}$ i $\tilde{E}$ oznaczają tensory amplitud naprężenia i odkształcenia.

Zakłada się, że niecykliczna część tensora odkształcenia $\tilde{\varepsilon}^N$ (wywołana przez ciężar własny konstrukcji przy uwzględnieniu wyporu) może być wyznaczona standardowymi metodami mechaniki. W niniejszej pracy przyjęto, że układ pracuje w płaskim stanie odkształcenia oraz że reakcja podłoża jest sprężysta. Przy wyznaczaniu $\tilde{\sigma}^N$ wykorzystano standardowy program MES. Następnie wyznacza się w podłożu początkowy rozkład średniego naprężenia efektywnego p'_0 ze wzoru:

$$p'_0 = \frac{1}{3} \text{tr} \tilde{\sigma}^N - u_0, \quad (5)$$

gdzie u_0 oznacza początkowy rozkład ciśnienia wody w porach w podłożu.

Wyznaczenie początkowego rozkładu p'_0 jest istotne z tego względu, że od tej wielkości zależy moduł ścinania podłoża G , który przyjmujemy w postaci:

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

gdzie G_0 i G_1 są liczbami, które należy wyznaczyć doświadczalnie dla danego gruntu. Związek typu (6) został przyjęty przez autorów również dla nawodnionych piasków. Podobna postać wyrażenia na moduł ścinania jest zalecana również dla ilów, np. (Ishihara

1982), gdzie w miejsce p' wstawia się wartość składowej pionowej naprężenia efektywnego, zaś współczynnik G_1 uzależniony jest od wskaźnika porowatości. We wzorze (6) występuje, w odróżnieniu od sugestii innych autorów, współczynnik G_0 , który interpretuje się jako rezidualny moduł ścinania. Współczynnik ten wprowadzono ze względu na algorytm numeryczny zastosowany w niniejszej pracy. Otóż w trakcie procesu generacji ciśnienia wody w porach maleje wartość p' , w skrajnym przypadku aż do zera, co oznacza upłynnienie gruntu. Ponieważ w każdym kroku obliczeniowym wykorzystuje się program MES dla sprężystego podłoża, to w przypadku upłynnionego elementu przypisujemy mu rezidualną wartość modułu ścinania. Jest to oczywiście aproksymacja, ale nie znamy jeszcze reakcji upłynnionego gruntu na obciążenie cykliczne, a tym samym nie wiadomo jaki model materiału należy przyjąć dla elementów upłynnionych. W pracy Sawickiego, Przewłóckiego (1988) przyjęto nieco inną postać wzoru na moduł ścinania, ale również uzależniono G od p' , tak aby generacji ciśnienia wody w porach towarzyszyło zmniejszanie się oporu gruntu na ścinanie.

Zagadnienie brzegowe formuluje się dla amplitud obciążenia cyklicznego na kontakcie: fundament – podłoże. Wielkość q (patrz rys. 1) wywołana jest działaniem momentu M , który oblicza się redukując siły wywierane przez falowanie na konstrukcję do środka ciężkości fundamentu (Schjetne i in. 1979). Po wyznaczeniu początkowego rozkładu p_0 w podłożu, a tym samym określeniu początkowego rozkładu modułu ścinania G przystępuje się do obliczania generacji ciśnienia wody w porach od obciążeń cyklicznych.

Obciążenie q może być dowolną funkcją liczby cykli falowania N . W pracy Sawickiego i in. (1988) przedstawiono obliczenia dla historii obciążenia cyklicznego odpowiadającej rozwijaniu się i zanikaniu sztormu. W niniejszej pracy przyjmujemy dla uproszczenia, że wielkość q jest stała. Obliczenia przeprowadza się kolejnymi etapami przy założeniu, że w każdym etapie odpowiadającemu przedziałowi ΔN , właściwości podłoża nie zmieniają się, a jego reakcja jest sprężysta. W każdym kroku obliczeniowym oblicza się wygenerowane ciśnienie wody w porach zgodnie ze wzorami podanymi w rozdziale 3, a następnie modyfikuje się wartość modułu ścinania, zgodnie ze wzorem (6). W ten sposób elementy, w których wygenerowało się ciśnienie wody w porach, ulegają osłabieniu. Obliczenia przeprowadza się, krok po kroku, dla zadanego programu obciążenia cyklicznego, stosując opisaną powyżej prostą procedurę. W przypadku upłynnienia elementu przyjmowana jest w nim rezidualna wartość ścinania $G = G_0$, i obliczenia prowadzone są dalej.

3. Generacja ciśnienia wody w porach w ile

Problemy związane z generacją ciśnienia wody w porach w cyklicznie ścinanym ile oraz propozycję równania konstytutywnego opisującego tę generację przedstawiono w pracy Sawickiego, Przewłóckiego (1988). Jest to równanie różniczkowe o postaci:

$$\frac{du}{dN} = AT^3 \left[4\sqrt{N} + T \frac{1}{2\sqrt{N}} \right], \quad (7)$$

gdzie u oznacza wygenerowane ciśnienie wody w porach, N jest liczbą cykli obciążenia, A współczynnikiem empirycznym, który wyznacza się doświadczalnie dla danego ilu,

zaś T jest znormalizowaną amplitudą maksymalnego naprężenia ścinającego. Maksymalne naprężenie ścinające jest niezmiennikiem stanu naprężenia, a zatem równanie (8) jest sformułowane dla ogólnego stanu naprężenia. W przypadku prostego cyklicznego ścinania jest $T = \tau_{hc}/\tau_{hf}$, gdzie τ_{hc} jest amplitudą naprężenia ścinającego, zaś τ_{hf} jest wytrzymałością łu na ścinanie. W przypadku realizacji cyklicznego ścinania w aparacie trójosiowym jest $T = \tau_c/S_u$, gdzie $\tau_c = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$, a S_u jest wytrzymałością łu na ścinanie w warunkach bez odpływu wody z porów.

Współczynnik A wyznacza się z prób prostego ścinania cyklicznego o stałej amplitudzie naprężenia T w każdym z doświadczeń. W trakcie każdego doświadczenia dokonuje się pomiaru wartości u jako funkcji liczby cykli ścinania N . W wyniku otrzymuje się szereg punktów, które na płaszczyźnie $z = T^4\sqrt{N} \rightarrow u$ można aproksymować prostą:

$$u = Az. \quad (8)$$

Jeżeli u zostanie wyrażone w jednostce 10^5 N/m^2 , to wówczas $A = 1,5$ dla łu „Drammen” o stopniu przekonsolidowania $OCR = 1$, dla $\tau_{hf} = 0,84 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (patrz *Research project*... 1975). Dla danych doświadczalnych odpowiadających łowi bałtyckiemu (Werno i in. 1988), otrzymano $A = 1,28$, a zatem wartość zbliżoną do charakterystyki łu „Drammen”.

Jeżeli jest zadana historia obciążenia cyklicznego w postaci $T = T(N)$ to odpowiadającą tej historii generację ciśnienia wody w porach otrzymuje się poprzez scałkowanie równania (7). W przypadku obliczania ciśnienia wody w porach w podłożu pod fundament wielkość T jest obliczana za pomocą MES niezależnie w każdym kroku obliczeniowym. Np. w kroku i odpowiadającym liczbie cykli N_i aktualną wartość ciśnienia wody w porach obliczamy całkując równanie (7) przy warunku początkowym $u = u_{i-1}$ dla $N = N_{i-1}$:

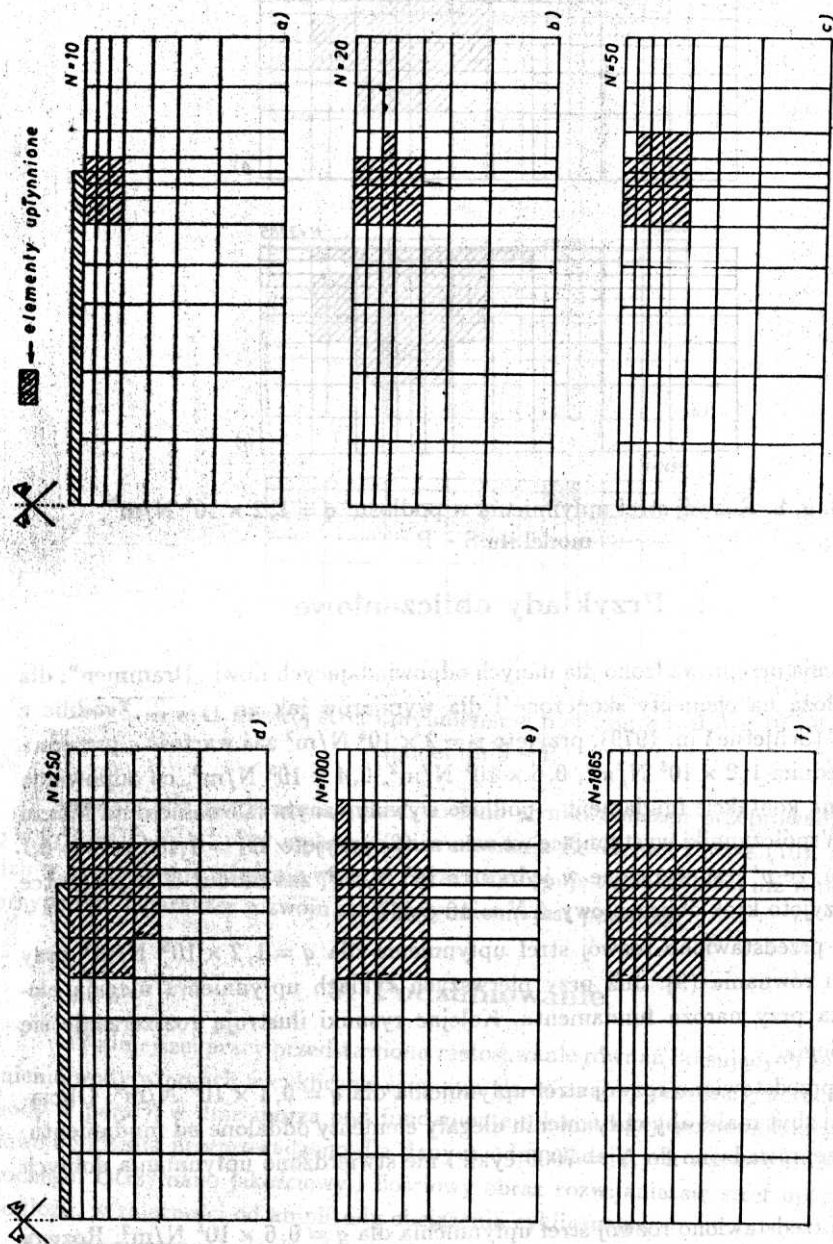
$$u_i = AT_i^4(\sqrt{N_{i-1} + \Delta N} - \sqrt{N_{i-1}}) + u_{i-1}. \quad (9)$$

Wiemy już, że ciśnienie wody w porach u_i spowoduje zmniejszenie modułu ścinania w elemencie. W następnym kroku obliczeniowym otrzymamy już inną wartość maksymalnego naprężenia ścinającego T_{i+1} .

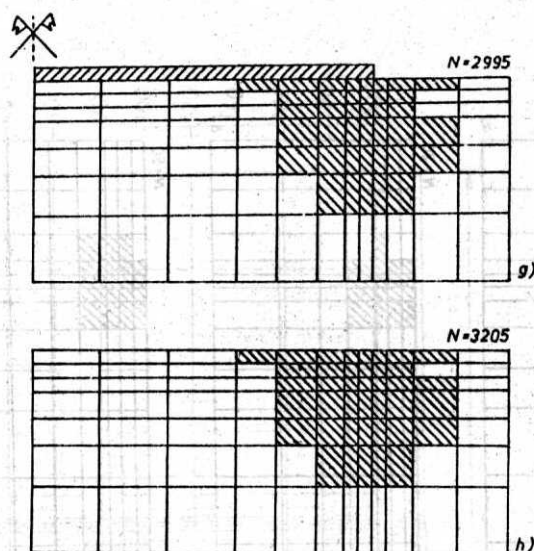
Zamiast równania (7) mogą być zastosowane związki zaproponowane przez Eekelena i Potts (1978):

$$\begin{aligned} \frac{du}{dN} &= A_1 \exp(W/B) \quad \text{dla } W > C \\ \frac{du}{dN} &= 0 \quad \text{dla } W \leq C, \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie dla łu „Drammen”: $A_1 = 0,454 \text{ N/m}^2$, $B = 0,073$, $C = 0,20$. Wielkość W oznacza znormalizowany drugi niezmiennik tensora amplitud naprężenia cyklicznego. W przypadku prostego ścinania cyklicznego jest $W = T$. W dalszym ciągu przyjmiemy tożsamość $W \equiv T$ i zrezygnujemy z równania (11), które oznacza, że w przypadku małych naprężeń cyklicznych generacja ciśnienia wody w porach jest mała i utrzymuje się na stałym poziomie. Eekelen i Potts twierdzą, że ich równanie jest słuszne dla łu „Drammen” o różnych stopniach przekonsolidowania $OCR = 1, 4, 10$. Porównanie modelu Eekelena i Potts z równaniem (7) przedstawiono w pracy Sawickiego i Przewłóckiego (1988).



Rys. 3.a-f. Rozwój stref upłynnienia w podłożu: $q = 1,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, model
 ilu „Sawicki - Przewłócki” (S - P)



Rys. 3. g, h. Rozwój stref upłynnienia w podłożu: $q = 1,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,
model iltu S - P

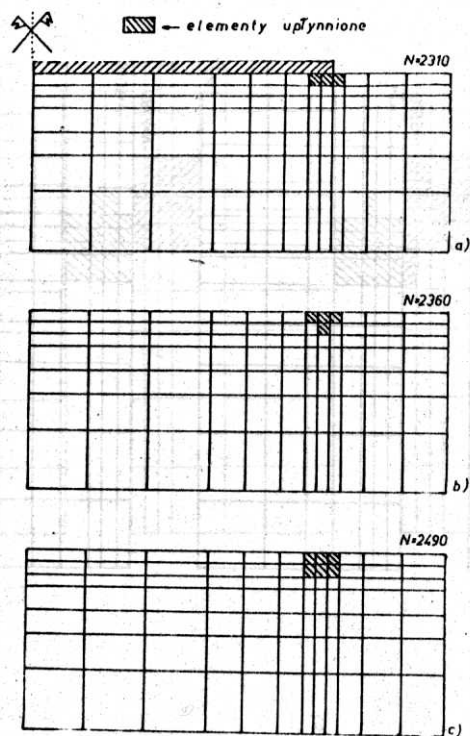
4. Przykłady obliczeniowe

Obliczenia przeprowadzono dla danych odpowiadających iltowi „Drammen”, dla podziału podłoża na elementy skończone i dla wymiarów jak na rys. 2. Zgodnie z literaturą, np. (Schjetne i in. 1979), przyjęto $p = 2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ zaś wartość q przyjmowano odpowiednio: $1,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $0,6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $0,4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, co odpowiada naprężeniom na kontakcie fundament - podłoże wywoływanym falowaniem na Morzu Północnym. Współczynniki występujące we wzorze (6) przyjęto: $G_1 = 1,486$ i $G_0 = 0,1$ przy założeniu, że p' jest wyrażone w jednostce 10^5 N/m^2 , zaś moduł G w jednostce 10^8 N/m^2 . Przyjęto krok obliczeniowy $\Delta N = 10$ cykli.

Na rys. 3 przedstawiono rozwój stref upłynnienia dla $q = 1,2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ przy wykorzystaniu równania (9). Już przy pierwszych cyklach upłynnieniu ulegają elementy podłoża przy narożu fundamentu. Kolejne rysunki ilustrują rozszerzanie się strefy upłynnienia.

Na rys. 4 przedstawiono rozwój stref upłynnienia dla $q = 0,4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Obciążenie jest tutaj zbyt małe, aby upłynnieniu ulegały elementy oddalone od fundamentu. Obliczenia przeprowadzono do $N = 7000$ cykli i nie stwierdzono upłynnienia dolnych elementów.

Na rys. 5 przedstawiono rozwój stref upłynnienia dla $q = 0,6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Rozwój stref upłynnienia jest tutaj nieco szybszy niż w poprzednim przypadku. Generacja postępuje do $N = 7790$ cykli. Obliczenia przeprowadzono do liczby $N = 20\,000$, ale nie stwierdzono upłynnienia się dalszych elementów.



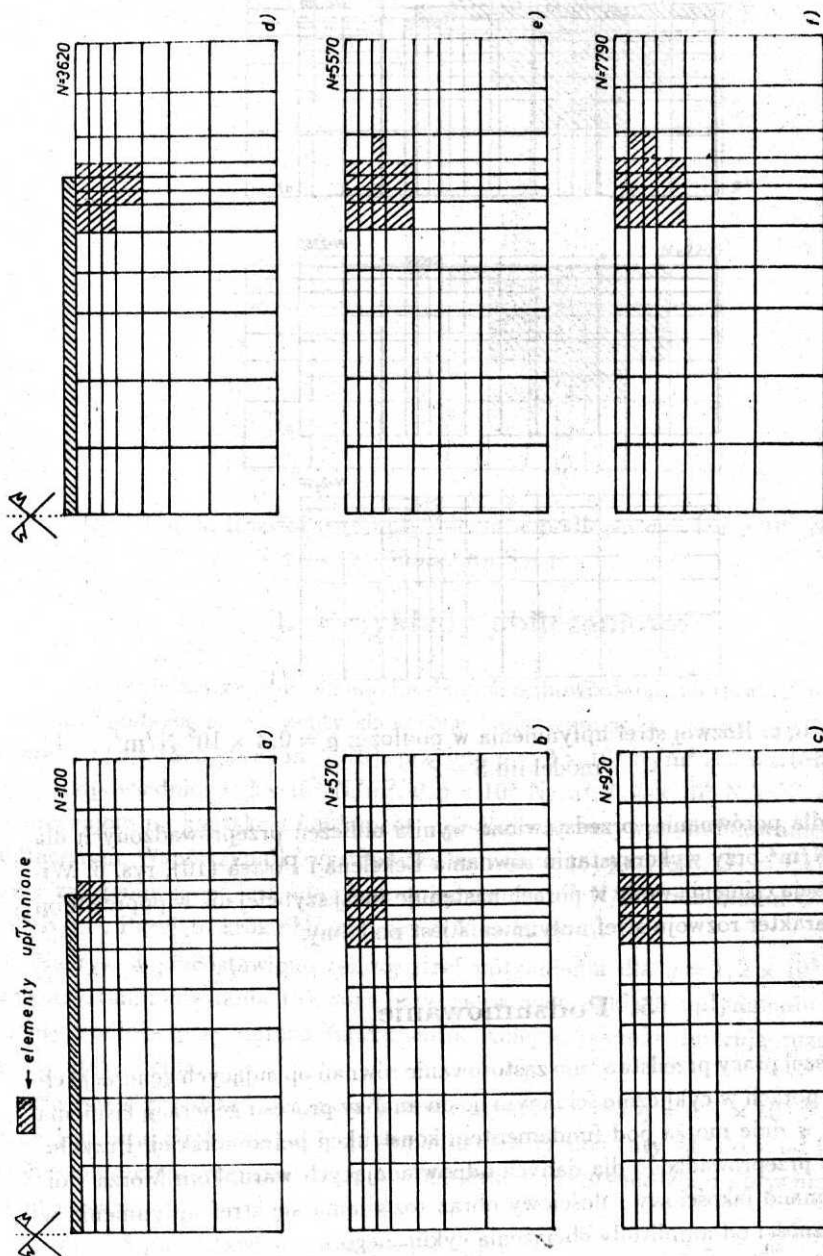
Rys. 4. a, b, c. Rozwój stref upłynnienia w podłożu: $q = 0,4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,
model ildu S - P

I wreszcie, dla porównania, przedstawiono wyniki obliczeń przeprowadzonych dla $q = 0,6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ przy wykorzystaniu równania Eekelena i Potts'a (10), rys. 6. Widzimy, że generacja ciśnienia wody w porach następuje tutaj szybciej niż w poprzednim przypadku. Charakter rozwoju stref upłynnienia jest podobny.

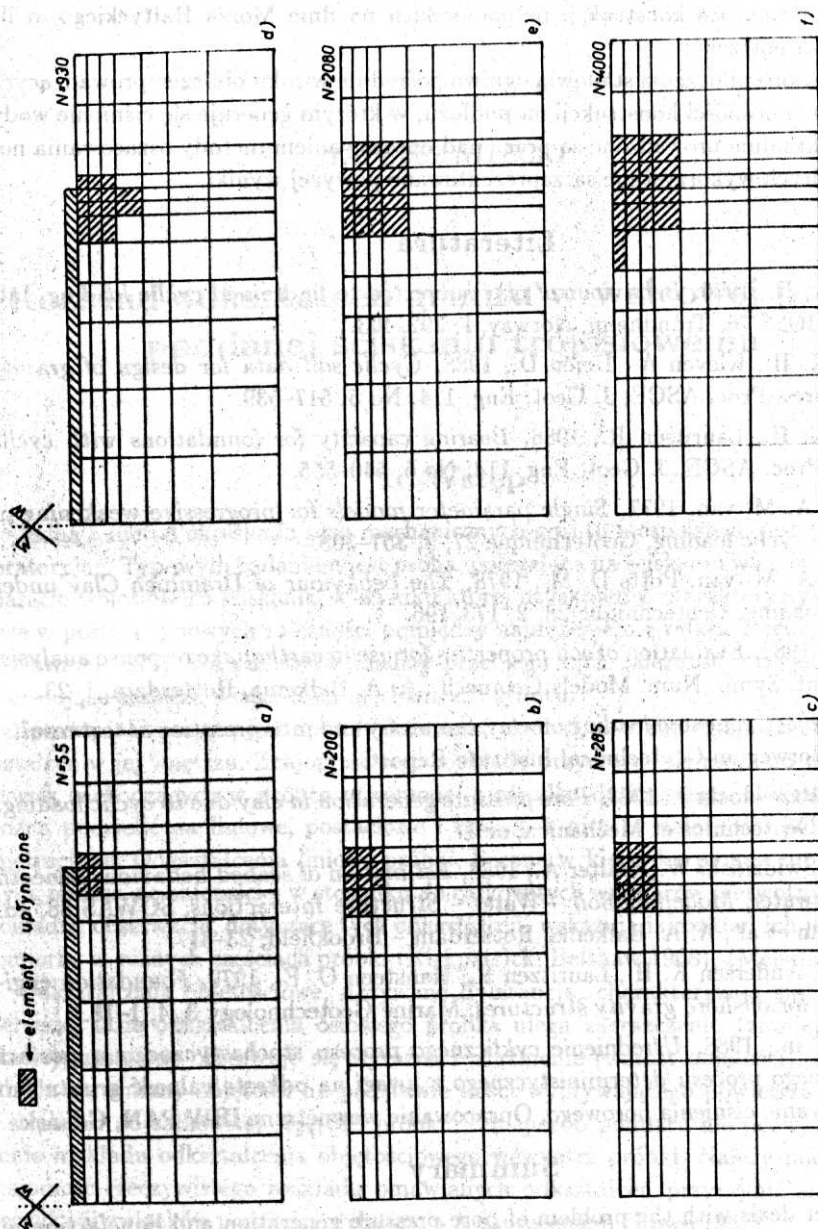
5. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono zastosowanie równań opisujących generację ciśnienia wody w porach w cyklicznie ścinanym ildzie do analizy procesu generacji ciśnienia wody w porach w dnie morza pod fundamentem konstrukcji pełnomorskiej. Przykładowe obliczenia przeprowadzono dla danych odpowiadających warunkom Morza Północnego. Otrzymano jakościowy i ilościowy obraz rozwijania się stref upłynnienia w podłożu, w zależności od amplitudy obciążenia cyklicznego.

Celem przeprowadzonych obliczeń była przede wszystkim ilustracja metody umożliwiającej analizę procesu generacji ciśnienia wody w porach, jak też przedstawienie zastosowania zaproponowanego wcześniej modelu ildu do analizy praktycznie ważnego zagadnienia. Zaproponowany model ildu i metoda analizy mogą być wykorzystane do



Rys. 5. Rozwój stref upłynnienia w podłożu: $q = 0,6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, model ilu (S - P)



Rys. 6. Rozwój stref upłynnienia w podłożu: $q = 0,6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, model ilu „Eekelen – Potts”

analizy zachowania się konstrukcji pełnomorskich na dnie Morza Bałtyckiego, o ile zaistnieje taka potrzeba.

Przedstawione obliczenia stanowią ogniwo pośrednie w toku obliczeń prowadzących do oszacowania nośności konstrukcji na podłożu, w którym generuje się ciśnienie wody w porach. Aktualnie prowadzone są prace nad opracowaniem metody oszacowania nośności, w których wykorzystane są zaprezentowane powyżej wyniki.

Literatura

- Andersen K. H., 1976, *Behaviour of clay subjected to undrained cyclic loading*, Int. Conf. BOSS'76, Trondheim, Norway, 1, 392-403.
- Andersen K. H., Kleven A., Heien D., 1988, *Cyclic soil data for design of gravity structures*, Proc. ASCE, J. Geot. Eng. 114, No 5, 517-539.
- Andersen K. H., Lauritsen R., 1988, *Bearing capacity for foundations with cyclic loads*, Proc. ASCE, J. Geot. Eng. 114, No 5, 540-555.
- Eekelen H. A. M. van, 1977, *Single parameter models for progressive weakening of soils by cyclic loading*, Geotechnique 27, 3, 357-368.
- Eekelen H. A. M. van, Potts D. M., 1978, *The behaviour of Drammen Clay under cyclic loading*, Geotechnique 28, 2, 173-196.
- Ishihara K., 1982, *Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis*, Proc. Int. Symp. Num. Models Geomech., A. A. Balkema, Rotterdam, 1-23.
- Research project, repeated loading on clay. Summary and interpretation of test results*, 1975, Norwegian Geotechnical Institute Report.
- Sawicki A., Przewłócki J., 1988, *Pore pressure generation in clay due to cyclic loading*, Studia Geotechnica et Mechanica, nr 1.
- Sawicki A., Świdziński W., Walter A., 1988, *Estimation of seabed behaviour beneath a breakwater, Modelling Soil - Water - Structure Interactions*, SOWAS 88, ed. Kolkman et al., A. A. Balkema, Rotterdam - Brookfield, 23-31.
- Schjetne K., Andersen K. H., Lauritzen R., Hansteen O. E., 1979, *Foundation engineering for offshore gravity structures*, Marine Geotechnology 3, 4, 1-15.
- Werno M. i in., 1988, *Uśrednienie cyklicznego procesu stochastycznego w postaci cyklicznego procesu deterministycznego z uwagi na odkształcalność gruntu lub generowanie ciśnienia porowego*, Opracowanie wewnętrzne IBW PAN, Gdańsk.

Summary

This paper deals with the problem of pore pressure generation and liquefaction in the clayey seabed under the foundation of off-shore structure. The method of analysis is based on the empirical model proposed by Sawicki and Przewłócki and finite element code. Some comparative calculations for the alternative model of Eekelen and Potts have been made. All calculations have been carried out for the North Sea conditions. The numerical examples show that the method proposed gives realistic predictions from the quantitative and qualitative point of view.