

STRESZCZENIE

1. Wprowadzenie, motywacja oraz cele pracy naukowej

Wprowadzenie oraz motywacja

W pracy doktorskiej podejmowane jest zagadnienie dynamiki gruntów jako ośrodka dwufazowego z zastosowaniem teorii mieszaniny. Rozważa się zachowanie gruntu przy obciążeniach szybko zmiennych w czasie uwzględniając zmianę prędkości oraz zmianę przyspieszenia. Obciążenie tego typu, to obciążenie dynamiczne, w którym uwzględniana jest siła tłumienia oraz siła bezwładności składników mieszaniny.

W zależności od stopnia dokładności rozróżnia się trzy rodzaje modeli gruntu z uwagi na liczbę faz w analizie dynamicznej. Modelem obecnie najdokładniejszym jest model trójfazowy gruntu składający się ze szkieletu i płynu z gazem w porach gruntu. Uwzględnia on ich wzajemne relacje i wciąż jest rozwijany i stanowi pole badawcze w wielu ośrodkach naukowych. Model ten prowadzi do złożonego układu równań ruchu co wymaga sprzętu obliczeniowego o dużej mocy. W modelu jednofazowym występuje jeden materiał gruntu, jako mieszanina o określonych parametrach fizycznych i mechanicznych w każdym punkcie ośrodka. Model ten stosowany jest głównie do analizy rozchodzenia się fal sejsmicznych i parasejsmicznych w gruncie z założeniem liniowo-sprężystego prawa fizycznego. Model dwufazowy stosowany jest głównie w przypadku gruntu w pełni nasyconego wodą, np. w analizie zapór wodnych, skarp lub zboczy oraz w przypadku gruntu suchego. W zagadnieniach propagacji fal od źródła drgań do punktu odbioru drgań, jakim jest budynek, najczęściej stosowany jest model jednofazowy. Jeśli wymagana jest analiza drgań gruntu wokół obiektu budowlanego, to odpowiedni jest model dwufazowy. Model trójfazowy często stosowany jest w analizie zjawisk zachodzących lokalnie.

Praca naukowa zawiera analizę numeryczną odpowiedzi gruntu na obciążania harmoniczne (cykliczne). W pracy rozważany jest problem wpływu poszczególnych składników obowiązujących równań (w tym sił bezwładności szkieletu i wody w porach), przy założeniu gruntu w pełni nasyconego wodą, jako ośrodka dwufazowego. Uwzględniany jest wpływ deformacji szkieletu gruntowego na zmianę ciśnienia wody w porach. Problem tego rodzaju jest określany, jako „coupled problem”, gdzie woda w porach powoduje odkształcanie szkieletu gruntu. W równaniu ruchu uwzględnia się założenie laminarnego (zgodnie z prawem Darcy) przepływu wody. Ponadto, w równaniu ruchu zakłada się, że: przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie cząstki wody są różne od przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie szkieletu. Rozważania prowadzone są w zakresie teorii dynamicznej konsolidacji Biota przy uwzględnieniu wpływu sił bezwładności. Analizowany jest przypadek jednowymiarowy (rozwiązany analitycznie) oraz przypadek dwuwymiarowy (w ujęciu MES).

Cele pracy naukowej

W pracy doktorskiej rozważane jest zagadnienie wpływu definicji poszczególnych faz modelu dwufazowego gruntu, fazy szkieletu, jego bezwładności oraz fazy płynnej, wody, jej bezwładności i tłumienia drgań. Praca doktorska dotyczy zagadnienia modelowania gruntu w zakresie obciążeń dynamicznych. Rozważane są następujące sformułowania:

A) dla problemu jednowymiarowego:

1. Wpływ przyjętego modelu gruntu w sformułowaniu przemieszczeniowym: a) modelu dwufazowego dokładnego (*fully dynamic FD*) uwzględniającego przemieszczenia szkieletu, wody i ciśnienie wody w porach; b)

modelu dwufazowego u-p (*partly dynamic PD*) przemieszczenia szkieletu i ciśnienia wody w porach, oraz c) modelu (*quasi-static QS*), stosowanego w zagadnieniach konsolidacji gruntu, bez udziału bezwładności szkieletu.

2. Przedstawienie różnic wyników trzech powyższych modeli oraz określenie dopuszczalnych zakresów zastosowań każdego z nich.

3. Analiza wpływu stopnia saturacji, parametrów fizycznych i częstotliwości wymuszenia na współczynnik amplifikacji drgań.

B) dla problemu dwuwymiarowego:

1. Określenie udziału szkieletu i ciśnienia wody w porach w modelu u-p, oraz analiza stosowanych obecnie uproszczeń tego modelu polegającego na pominięciu zmiany ciśnienia w czasie na tle powszechnie stosowanego modelu jednofazowego.

2. Przedstawienie różnic wyników obliczeń komputerowych (przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń), przy zastosowaniu własnego autorskiego programu komputerowego, różnic pomiędzy modelem u-p z uwzględnieniem i bez uwzględnienia zmiany ciśnienia w czasie.

3. Zaprezentowanie różnic w przemieszczeniach, prędkościach i przyspieszeniach pomiędzy modelem dwufazowym z powszechnie stosowanym modelem jednofazowym.

W pracy ograniczono się do analizy gruntu w zakresie małych odkształceń. Założenie to stosowane jest w zagadnieniach inżynierskich, np. w dynamice gruntów pod fundamentami maszyn. Przedstawione są wyniki osiadania, ciśnienia, naprężenia gruntu na przykładzie zadania płaskiego stanu odkształcenia.

Jak wspomniano wcześniej faza szkieletu i wody jest ze sobą powiązana. Równania ruchu w pełni nasyconego ośrodka gruntowego to układ trzech równań spełniających trzy zasady:

- Zasada pędu mieszaniny szkieletu i wody
- Zasada pędu cieczy
- Zasada zachowania masy przepływu

W tych równaniach uwzględnia się: ρ_f - gęstość cieczy (wody); $\rho = n\rho_f + (1 - n)\rho_s$; ρ - gęstość całkowita; ρ_s - gęstość szkieletu; \mathbf{b} - wektor sił masowych (w ogólności grawitacja); n - porowatość; \mathbf{w} - wektor średniej prędkości przepływu wody (Darcy'ego); K_f - moduł odkształcenia objętościowego cieczy w porach; \mathbf{L} - macierz operatorów różniczkowania; \mathbf{R} wektor wiskotycznej siły oporu przepływu zgodnie z równaniem $\mathbf{k} \mathbf{R} = \mathbf{w}$. Macierz współczynników wodoprzepuszczalności \mathbf{k} określona jest w jednostkach $[\text{długość}]^3 [\text{czas}]/[\text{masa}]$.

Niewiadomymi dla powyższego układu równań są:

- przemieszczenia szkieletu \mathbf{u}^s ,
- przemieszczenia wody \mathbf{u}^f ,
- ciśnienie wody w porach p .

2. Zakres pracy

Rozdział 1 obejmuje wprowadzenie, motywację oraz cele pracy naukowej.

Rozdział 2 pracy zawiera krótki opis historii rozwoju ośrodka porowatego. Wspomina najbardziej wpływowych naukowców oraz przedstawia zarys trzech epok w tej dziedzinie.

Rozdział 3 przedstawia szczegóły propagacji sprężystych fal w półprzestrzeni ośrodka gruntowego będącego pod wpływem obciążeń dynamicznych. Rozważany jest ośrodek jednofazowy (szkielet), dwufazowy (szkielet i woda) oraz trójfazowy (szkielet, woda i powietrze). Rozdział główną uwagę poświęca równaniom fal dylatacyjnych oraz poprzecznych.

Rozdział 4 jest wstępem do części obliczeniowej pracy doktorskiej. Przedstawia szczegółowy opis obowiązujących równań, które są bazą dla dalszej analizy. W ich skład wchodzi równania konstytutywne, równowagi, przedstawione są również na potrzeby pracy warunki początkowe oraz brzegowe.

Rozdział 5 wyjaśnia różnice między trzema możliwymi sformułowaniami dla przypadku jednowymiarowego. Oprócz różnic teoretycznych, przedstawione są różnice w wynikach na podstawie przykładu obliczeniowego rozwiązane analitycznie. Rozbieżności te są szczegółowo przeanalizowane i zestawione ze sobą. Dla każdego modelu określone są dopuszczalne zakresy poprawności rozwiązań. W ostatni podrozdziale Rozdziału 5 analizowane są wartości współczynnika amplifikacji dla różnych rodzajów gruntu, częstotliwości wymuszenia oraz stopni saturacji.

Rozdział 6 razem z Załącznikiem 1 przedstawia równania w przypadku dwuwymiarowego płaskiego stanu odkształcenia. Podobnie jak dla przypadku jednowymiarowego wyprowadzone są różne modele (uproszczenia), które następnie są ze sobą zestawione i porównane. Obliczenia prowadzone są w ramach aproksymacji metody elementów skończonych. Załącznik 1 prezentuje macierze MES dla ośmiowęzłowego elementu skończonego dla szkieletu oraz czterowęzłowego elementu skończonego dla ciśnienia.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie całości pracy oraz przedstawiono dalsze kierunki rozwoju naukowego.

3. Wnioski z pracy

Obliczenia prezentowane w pracy doktorskiej podzielono na dwie części. Pierwsza (Rozdział 5) dotyczy przypadku jednowymiarowego, a druga (Rozdział 6) dotyczy przypadku dwuwymiarowego. Obie części dotyczą opisu zachowania się ośrodka dwufazowego pod działaniem obciążenia harmonicznego.

A) W ramach analizy zadania jednowymiarowego wyniki pracy doktorskiej obejmują:

- W ramach celu A.1 przedstawiono analizę i dyskusję wpływu poszczególnych składników równania dynamiki gruntu jako ośrodka dwufazowego.
- W ramach celu A.2 dla przypadku jednowymiarowego przedstawiono wyniki rozwiązań analitycznych porównania wyprowadzonych modeli. Rozbieżności w wynikach dla poszczególnych sformułowań różnią się w zależności od częstotliwości wymuszenia oraz parametrów fizycznych gruntów. W pracy zaproponowano zakresy praktycznych zastosowań poszczególnych modeli w podrozdziale 5.1.4.
- W ramach celu A.3 przedstawiono wyniki wpływu parametrów fizycznych oraz stopnia saturacji na podstawowy okres drgań układu, ekstremalną amplitudę drgań oraz współczynnik amplifikacji drgań. Wpływ każdego z czynników został zaprezentowany na zamieszczonych w pracy wykresach.

B) W ramach analizy zadania dwuwymiarowego w sformułowaniu MES wyniki pracy doktorskiej obejmują:

- W ramach celu B.1 przedstawiono analizę i dyskusję wpływu poszczególnych składników równania dynamiki gruntu w ramach pełnego modelu u-p, następnie modelu u-p z pominięciem zmiany ciśnienia w czasie oraz

powszechnie stosowanego modelu jednofazowego. Każdy z tych modeli zapisano w postaci układu równań MES i zestawiono w podrozdziale 6.3.3.1.

- W ramach celu B.2 przedstawiono wyniki obliczeń komputerowych tzw. zadania „kolumny Biota” w którym wykazano znaczące różnice pomiędzy pełnym modelem u-p (Model 3) a modelem często stosowanym w praktycznych obliczeniach, w którym pomija się zmianę ciśnienia w czasie (Model 4). Udowodniono, że macierz ściśliwości w równaniu MES ma znaczący wpływ na wyniki, w szczególności na przemieszczenia, które są około 10 razy większe w przypadku jej uwzględnienia. Na podstawie zamieszczonych wyników można wywnioskować, iż Model 4 nie jest odpowiednim modelem dla krótkiego w czasie zjawiska obciążenia dynamicznego.
- W ramach celu B.3 przedstawiono wyniki obliczeń dla „kolumny Biota”, które wskazują na znaczące różnice w wynikach między modelem dwufazowym uwzględniającym zmianę ciśnienia wody w porach w czasie (Model 3) a powszechnie stosowanym modelem jednofazowym (Model 2). Występuje duża rozbieżność wyników między tymi modelami z uwagi na częstotliwość wymuszenia harmonicznego. Im wyższa częstotliwość wymuszenia, tym większe różnice w wynikach. Dodatkowo w podrozdziale 6.3.3.3 dokonano porównania Modelu 4 oraz dotychczas omówionych Modeli 2 i 3, dla gruntu typu 2 (piasek średni). Zamieszczone wyniki wskazują, iż Model 4 jest praktycznie niezależny od częstotliwości wymuszenia, a więc powinien być unikany przy analizie dynamicznej.

Podsumowując, głównym celem pracy doktorskiej było wykazanie wpływu sił bezwładności na wielkości amplitud przemieszczenia (osiadania) gruntu oraz prędkości i przyspieszenia przy obciążeniu dynamicznym typu harmonicznego. Siła bezwładności występująca w gruncie w ramach modelu dwufazowego, to iloczyn masy szkieletu gruntu i wody w porach z przyspieszeniem szkieletu i wody. Zatem na wielkość sił bezwładności ma wpływ zmiana masy i zmiana przyspieszenia.

W zagadnieniu jednowymiarowym porównano wyniki obliczeń modelu PD, w którym występują siły bezwładności szkieletu i wody z modelem uproszczonym bez siły bezwładności wody. Wyniki obu modeli przedstawiono na tle modelu opisującego zjawisko konsolidacji gruntu. Przedstawione wyniki wykazują znaczące rozbieżności wraz ze wzrostem częstotliwości wymuszenia dynamicznego

W przypadku dwuwymiarowego podobnie jako w przypadku jednowymiarowego wyniki obliczeń wskazują na znaczące różnice wpływu definicji sił bezwładności. Porównanie wpływu tych sił przedstawiono przez pokazanie znaczących różnic w wielkościach przyspieszenia szkieletu i ciśnienia wody w porach przy założeniu niezmienniej masy szkieletu gruntu. Szczegółową analizę zamieszczono w Rozdziale 6.