

Marian ŁUPIEŻOWIEC

Katedra Geotechniki
Politechnika Śląska

MODEL DO PROGNOZOWANIA WPŁYWU WSTRZĄSÓW TECHNOLOGICZNYCH NA OTOCZENIE

Streszczenie. W pracy przedstawiono sprężysto-lepkoplastyczny model konstytutywny, który jest w stanie realistycznie opisywać odpowiedź gruntu na złożone ścieżki obciążenia oraz uwzględniający prędkość ich realizowania. Następnie zaproponowano zastosowanie modelu do symulacji procesu rozchodzenia się w podłożu drgań wywołanych wstrząsami technologicznymi. Zaprezentowano wyniki numerycznej symulacji zagadnienia przy użyciu programu ANSYS.

A MODEL FOR THE FORECASTING OF THE PROPAGATION TECHNOLOGICAL IMPACTS

Summary. The elasto-viscoplastic model, which is able realistically to describe the soil answer complex load paths and taking into consideration their rate of realizing is presented. An application of the model to simulate the process of vibration propagation in subsoil which is generated by technological impacts is used. Some results of numerical simulations of the problem using ANSYS program is described.

1. Wstęp

Przedmiotem analizowanym w pracy jest próba opisu drgań wywołanych wstrząsami technologicznymi i ich wpływ na otoczenie oraz znajdujące się w pobliżu konstrukcje inżynierskie. Źródłami wstrząsów bywają często ciężkie maszyny wykorzystywane w geoinżynierii przy wzmacnianiu słabego podłoża gruntowego. Przykładem może być formowanie kolumn kamiennych wbijanych lub zagęszczanie gruntów metodą ciężkiego ubijania. Wymienione rodzaje ulepszeń zostały zastosowane na Śląsku dzięki pracom Jubilata. Wykonywanie tych wzmocnień w pobliżu zabudowań może powodować uszkodzenia obiektów oraz gwałtowne protesty ludzi znajdujących się w strefie oddziaływania. W dotychczasowej praktyce stosowane były pomiary amplitud wychyleń lub

przyspieszeń wywoływanych drgań, a otrzymane wartości były porównywane z zamieszczonymi w normach. W razie ich przekroczenia podejmowano decyzję o zmniejszeniu wysokości ubijania (na rzecz większej liczby uderzeń) lub stosowano inną technologię.

Celem prac podejmowanych przez autora jest zastosowanie konsystentnego, sprężysto-lepkoplastycznego modelu do opisu formułowanego zagadnienia. Efektywność stosowania modelu do symulacji złożonych procesów obciążania wykazano w dysertacji doktorskiej [5]. Ze względu na występowanie tłumienia wewnątrz struktury równań konstytutywnych oczekuje się, że model ten będzie w stanie również realistycznie opisywać procesy rozchodzenia się drgań i ich tłumienia w podłożu.

2. Równania modelu konstytutywnego

Tworząc model konstytutywny do opisu wspomnianych zagadnień, założono, że odkształcenia całkowite ε dzielą się na część sprężystą ε^e i niesprężystą ε^{vp} . Prawo sprężystości – zależność między prędkością odkształceń sprężystych a prędkością naprężeń – przyjęto takie samo jak w modelach sprężysto-plastycznych. Następnie zdefiniowano powierzchnię ograniczającą, która oddziela stany normalnej konsolidacji (punkty na powierzchni) oraz stany prekonsolidacji (punkty wewnątrz powierzchni).

$$F\left(\sigma', p_c, \dot{p}_c\right) = q'^2 + M^2 p' \left(p' - \left(p_c + A \dot{p}_c \right) \right) = 0, \quad (1)$$

Przedstawione wyżej równanie powierzchni zależy od stanu naprężenia efektywnego, parametru wzmocnienia oraz jego prędkości. Użyta funkcja powierzchni ograniczającej jest uogólnieniem równania występującego w modelu MCC. Taka postać równania umożliwia modelowanie wpływu prędkości na przebieg procesu [4]. Prędkość odkształceń niesprężystych oblicza się z prawa płynięcia, które zakłada kierunek odkształceń jako normalny do powierzchni ograniczającej (stowarzyszone prawo płynięcia):

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \dot{A} \frac{\partial F}{\partial \sigma'}, \quad (2)$$

gdzie \dot{A} – funkcja skalarowa.

Następnym równaniem jest prawo wzmocnienia, które opisuje zależność między parametrem wzmocnienia a wartością odkształcenia niesprężystego:

$$\dot{p}_c = \frac{1+e}{\lambda-\kappa} p_c \left(\dot{\varepsilon}_v^{vp} + \xi \exp\left(-\xi_1 \varepsilon_s^{vp}\right) \dot{\varepsilon}_s^{vp} \right) - B \exp\left(\frac{q}{q_0}\right) p_c, \quad (3)$$

Pokazana w (3) forma równania, dzięki wolnemu wyrazowi po prawej stronie równania, umożliwia symulowanie zjawisk pełzania i relaksacji, które są charakterystyczne przy opisie lepkich właściwości materiałów. Taki kształt równania (3) został zaproponowany przez Dragona i Mroza [2]. Założono, że prawo wzmocnienia zawiera zależność od odkształceń objętościowych (co uwzględnione jest w modelu MCC), a także od odkształceń postaciowych [11]. Występujące w równaniach (1) i (3) wielkości A i B są parametrami modelu [5].

Poprzednio wspomniany układ równań przy założeniu warunku zgodności:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma'}\right)^T \dot{\sigma}' + \frac{\partial F}{\partial p_c} \dot{p}_c + \frac{\partial F}{\partial \dot{p}_c} \ddot{p}_c = 0, \quad (4)$$

proceedzi do równań konstytutywnych:

$$\dot{\sigma}' = D \left(\dot{\varepsilon} - \dot{A} \frac{\partial F}{\partial \sigma'} \right), \quad (5a)$$

$$s \ddot{A} + h \dot{A} + c = 0, \quad (5b)$$

gdzie występujące w powyższych wyrażeniach współczynniki zdefiniowane są poniżej:

$$s = -M^4 p' A p_c \frac{(1+e)}{\lambda - \kappa} \left[2p' - (p_c + A \dot{p}_c) \right] - M^2 \frac{1+e}{\lambda - \kappa} p' A p_c \cdot 2q' \xi \exp(-\xi_1 \varepsilon_s^{vp}),$$

$$h = -M^4 \left[2p' - (p_c + A \dot{p}_c) \right]^2 K - 12Gq'^2 - M^4 \frac{(1+e)}{\lambda - \kappa} \left[2p' - (p_c + A \dot{p}_c) \right] p' (p_c + A \dot{p}_c) +$$

$$- M^2 \frac{(1+e)}{\lambda - \kappa} p' \cdot 2q' \xi \exp(-\xi_1 \varepsilon_s^{vp}) (p_c + A \dot{p}_c + A p_c \dot{\varepsilon}_s^{vp}) +$$

$$- M^4 \frac{(1+e)}{\lambda - \kappa} p' A p_c (2\dot{p}_c - \dot{p}_c - A \dot{p}_c) - M^2 \frac{(1+e)}{\lambda - \kappa} A \cdot 2q' p_c \xi \exp(-\xi_1 \varepsilon_s^{vp}),$$

$$c = KM^2 \left[2p' - (p_c + A \dot{p}_c) \right] \dot{\varepsilon}_v + 6q' G \varepsilon_s - M^2 p' B (p_c + A \dot{p}_c).$$

Zaprezentowane powyżej równania mają skomplikowaną formę, dlatego też użyto metod numerycznych do ich rozwiązania bez wyznaczenia zamkniętych formuł relacji σ - ε , [9].

Dla stanu prekonsolidacji założono, że powierzchnia plastyczności zredukowana została do punktu, zwanego biegunem sprężystości S . Następnie dla każdego procesu obciążenia zachodzi zasada odwzorowania radialnego (rys. 1), które rządzi zachowaniem bieżącego punktu P .

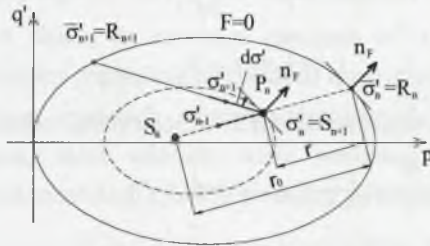
Moduł wzmocnienia w punkcie P definiuje się następująco:

$$K_P = K_R + H(\sigma', \varepsilon_v^{vp}, \varepsilon_s^{vp}) \cdot \frac{r}{r_0 - r}, \quad (6)$$

gdzie: $K_R = \frac{\partial F}{\partial p_c} \left(\frac{\partial p_c}{\partial \varepsilon^{vp}} \right)^T \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma'} \right)$ jest modułem wzmocnienia w punkcie refleksyjnym R ,

a $H = C \left(\frac{r}{r_0 - r} \right)^{\mu-1}$ jest funkcją wzmocnienia. Taka forma funkcji H umożliwia symulację silnej nieliniowości w zakresie małych odkształceń. Uwzględniając powyższe założenia, podany w równaniu (4b) współczynnik h przyjmie postać:

$$\begin{aligned} h = & -M^4 \left[2p - (p_c + A p_c) \right]^2 K - 12Gq^2 - M^4 \frac{(1+e)}{\lambda - \kappa} \left[2p - (p_c + A p_c) \right] p (p_c + A p_c) + \\ & - M^2 \frac{(1+e)}{\lambda - \kappa} p \cdot 2q \xi \exp(-\xi_1 \varepsilon_s^{vp}) (p_c + A p_c + A p_c \varepsilon_s^{vp}) + \\ & - M^4 \frac{(1+e)}{\lambda - \kappa} p A p_c (2p - p_c - A p_c) - M^2 \frac{(1+e)}{\lambda - \kappa} A \cdot 2q p_c \xi \exp(-\xi_1 \varepsilon_s^{vp}) + C \left(\frac{r}{r_0 - r} \right)^\mu. \end{aligned}$$



Rys. 1. Zasada odwzorowania radialnego

Fig. 1. The radial projection rule

W zaproponowanym modelu (por. [3]) biegun sprężysty S zmienia swoje położenie po każdym ostrym zwrocie ścieżki naprężenia (rys. 1), który może być zapisany warunkiem:

$$\mathbf{n}^T \cdot d\sigma' < 0, \quad (7)$$

gdzie \mathbf{n} jest jednostkowym gradientem powierzchni ograniczającej, a $d\sigma'$ – przyrostem naprężenia. Gdy bieżący punkt osiągnie powierzchnię ograniczającą, dalsze zachowanie się materiału podlega równaniom wyprowadzonym dla stanu normalnej konsolidacji.

3. Sformułowanie zagadnienia dynamiki

Zaprezentowany w poprzednim punkcie model został wykorzystany do symulacji zagadnień, w których pominięto wpływ sił bezwładności. Do analizy omawianego zagadnienia należy uwzględnić zarówno siły d'Alamberta, jak i tłumienie, dzięki któremu wywoływane drgania po pewnym czasie ustają. Ponieważ omawiany w pracy model jest w stanie ująć lepkie tłumienie (por. wyniki symulacji pełzania [5]), więc też oczekuje się, że będzie w stanie realistycznie opisać odpowiedź gruntu na wywołany impuls.

Zgodnie z powyższymi rozważaniami przyjęto poniższą postać równania różniczkowego problemu:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}(\sigma, \kappa, \dot{\kappa}) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{P}(t), \quad (8)$$

gdzie: \mathbf{M} – macierz mas, \mathbf{K} – macierz sztywności, która w ogólności jest funkcją parametru wzmocnienia κ oraz jego prędkości $\dot{\kappa}$, \mathbf{P} – obciążenie, \mathbf{u} – poszukiwany wektor przemieszczeń.

Do równania (8) należy dołączyć odpowiednie warunki początkowo – brzegowe.

Proponując powyższą zależność, pominięto często dotychczas przedstawiany człon odpowiedzialny za tłumienie, który jest proporcjonalny do prędkości przemieszczeń. Zamiast tego zależność (8) zawiera w sobie bardziej złożoną formułę, dzięki której możliwa jest analiza tłumienia i zanikania drgań w podłożu.

4. Propozycja rozwiązania

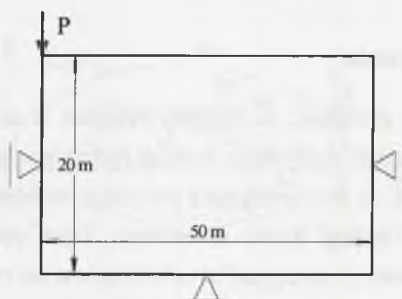
Rozwiązanie zagadnień dynamiki, to odrębny problem w analizach metody elementów skończonych. Dotyczy to przede wszystkim sytuacji, gdzie przyjęty został nieliniowy model materiału, z którego wynika, że do rozwiązania pozostaje problem przyrostowo – iteracyjny. Oprócz iteracji wewnątrz każdego kroku czasowego, która pozwala scałkować równania konstytutywne, należy również je sprzęgnąć z całkowaniem po czasie. Podobny problem był do rozwiązania w pracy [5], jednak w tym przypadku problem jest bardziej złożony. Dlatego też opracowanie algorytmu odpowiedniej procedury obliczeniowej dla bardziej skomplikowanego modelu będzie celem dalszych prac.

Na dzień dzisiejszy nie jest jeszcze dostępna wersja systemu MES, która umożliwia analizę dynamiki gruntów i konstrukcji. Dlatego też do przeliczenia przykładu zastosowano program ANSYS, który jest dostępny na Wydziale Budownictwa Pol. Śl. oraz umożliwia analizę zagadnień dynamiki.

W programie ANSYS do całkowania po czasie zastosowana została metoda całkowania Newmarka [1]. Poprzez przyjęcie odpowiednich parametrów całkowania otrzymuje się albo jawny schemat Eulera, albo schemat niejawny. Ten drugi z wymienionych sposobów obliczania dominuje w obecnie tworzonych systemach i procedurach obliczeniowych (por. [4], [7]). Ponadto, do iteracji dla bieżącego kroku obliczeniowego wykorzystana została metoda Newtona-Raphsona. Wymienione procedury iteracyjne zaprogramowane są wewnątrz pakietu MES i opisane szczegółowo w dokumentacji programu [1].

5. Przykład obliczeniowy

Jako przykład rozwiązania tytułowego zagadnienia analizowano rozchodzenie się drgań wywołanych impulsem siły w masywie gruntowym. W analizie pominięto tłumienie, skupiono się przede wszystkim na uzyskaniu zmiany amplitudy drgań w zależności od odległości źródła impulsu. W obliczeniach ograniczono się do przypadku osiowej symetrii, a geometria modelu została przedstawiona na rys. 2. Dla uproszczenia przyjęto, że impuls od spadającego ubijaka przyłożony jest do jednego punktu jako impuls siły skupionej, działającej w krótkim czasie t_m . Jako model konstytutywny materiału przyjęto model Druckera-Pragera z niestowarzyszonym prawem płynięcia. Model ten, choć niezbyt nadaje się do opisu tak poważnych zagadnień geotechniki, przyjęty został z konieczności, gdyż program ANSYS nie zawiera bardziej zaawansowanych modeli gruntów.



Rys. 2. Geometria modelu numerycznego

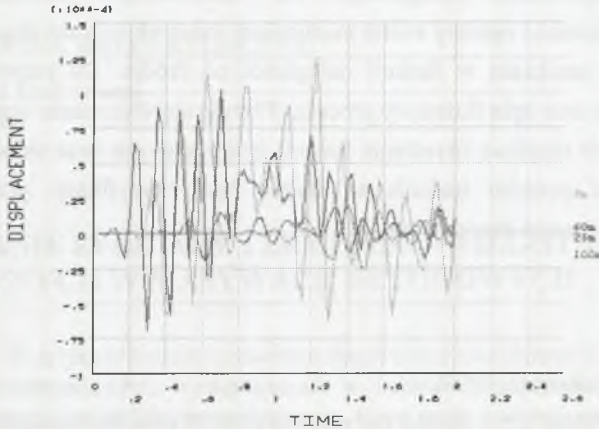
Fig. 2. The geometry of numerical model

Obliczenia przeprowadzono dla następujących wartości parametrów:

wymiary geometryczne modelu: szerokość: $r = 50$ m, wysokość: $h = 20$ m, stan osiowo-symetryczny, maksymalna wartość siły (impuls): $P_{\max} = 2$ MN, czas działania impulsu: $t_m = 0,07$ s, parametry modelu Druckera-Pragera: spójność: $c = 15$ kPa, kąt tarcia wewnętrznego: $\phi = 25^\circ$, kąt dylatacji: $\psi = 0^\circ$.

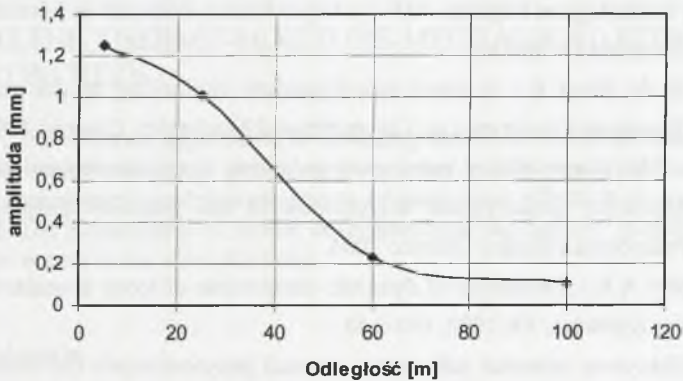
Wyniki obliczeń przedstawione są na rysunkach 3 i 4. Na rys. 3 pokazano zależność wychyleń od czasu. Ponieważ nie uwzględniono tłumienia, więc po pewnym czasie obserwuje się ustalanie drgań na określonym poziomie. Nietrudno zauważyć, że po ok. 1 s drgania ustalają się na pewnym poziomie, widoczna jest też oczywista właściwość zmniejszania się amplitudy drgań wraz ze wzrostem odległości od źródła. Tendencja ta została w bardziej czytelny sposób przedstawiona na rys. 4. Innym wnioskiem z obliczeń może być oszacowanie częstotliwości rozchodzenia się fali w masywie gruntowym. Licząc piki na wykresie (16) i dzieląc ich liczbę przez czas analizy 2 s, otrzymuje się wartość 8 Hz. Jak na tak zgrubną analizę uzyskano bardzo dobrą zgodność z podaną w [6] wartością 10 Hz.

Oczywiście wyniki tej analizy należy rozpatrywać w sensie jakościowym – omawiać można jedynie tendencje i charakter otrzymanych krzywych. Jednak wyniki tej wstępnej analizy mogą świadczyć o poprawnym opisie zagadnienia od strony fizyki.



Rys. 3. Zależność przemieszczeń od czasu

Fig. 3. Time – displacement dependence



Rys. 4. Zależność amplitud wychyleń od odległości od źródła drgań

Fig. 4. Dependence of displacement amplitudes on the distance from the impacts source

6. Podsumowanie i wnioski

Zaprezentowany w pracy model konstytutywny można zaliczyć do klasy zaawansowanych modeli stanu krytycznego z rozszerzonym opisem dla stanu prekonsolidacji. Jest on w stanie realistycznie opisywać zachowanie się gruntu zarówno na złożone ścieżki obciążenia, jak i na prędkość, z jaką są one realizowane. Ponadto, oczekuje się, że będzie on w stanie symulować lepkie tłumienie w zagadnieniach dynamicznych, podobnie jak symulował procesy pełzania i relaksacji w zagadnieniach quasi-statyki. W tym celu konieczna

będzie implementacja tworzonego modelu w istniejący system MES, co będzie celem dalszych prac autora.

Pokazane w rozdziale 5 wstępne wyniki obliczeń numerycznych dowodzą poprawności sformułowania zagadnienia brzegowego dla omawianego problemu. Prawdłowo (przynajmniej jakościowo) opisany został mechanizm rozchodzenia się drgań w podłożu, ich częstotliwość oraz zanikanie w funkcji odległości od źródła. Do rozwiązania pozostaje symulacja tłumienia oraz opis ilościowy procesu. Planuje się wykonanie serii badań „in situ”, dzięki którym będzie możliwe określenie funkcji materiałowych oraz oszacowanie wartości ich parametrów, a ponadto badania te służyć będą weryfikacji przyjętego sposobu modelowania rozważanego zagadnienia.

Literatura

1. Ansys Theory Reference, 1997.
2. Dragon A. and Mroz Z.: A model for plastic creep of rock-like materials accounting for the kinetics of fracture. *Int. J. Rock Mech Sci. & Geomech.*, **16**, 1979, 253-259.
3. Gryczmański M., Jastrzębska M., Łupieżowiec M.: A model for the forecasting of the propagation technological impacts. XIV Colloque Franco-Polonais de Mecanique des Sols Appliquée, Grenoble (w druku).
4. Heeres O. & de Borst R.: A novel rate-dependent subloading model and its implicit integration. European Conference on Computational Mechanics, Cracow 2001.
5. Łupieżowiec M.: Konsystenty jednopowierzchniowy sprężysto-lepkoplastyczny model o silnie nieliniowym wzmocnieniu anizotropowym dla gruntów spoistych. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2004.
6. Pan J.L., Selby A.R.: Simulation of dynamic compaction of loose granular soil. *Advanse in Engineering Software*, **33**, 2002, 631-640.
7. Truty A.: Efektywny schemat całkowania równań przyrostowych dla modelu Modified Cam-Clay. XV Konferencja Naukowa “Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”. Korbiewów 2003, 29-36.

Wyniki przedstawione w pracy są częścią projektu nr 4 T07E 019 30 pt. „Modelowanie wpływów technologicznych na otoczenie”, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Sikora