

Andrzej BARTOSZEWICZ, Piotr E. SROKOSZ
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski

Eugeniusz DEMBICKI
Politechnika Gdańska

ZASTOSOWANIE ANALIZY WSTECZNEJ DO WYZNACZENIA PARAMETRÓW GRUNTU NIESPOISTEGO NA PODSTAWIE WYNIKÓW BADAŃ MODELOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych, będących symulacjami badań modelowych nośności jednorodnego, niespoistego podłoża gruntowego, ograniczonego warstwą sztywną, przeprowadzonych w płaskim stanie odkształcenia ośrodka gruntowego. Opisano zastosowaną w obliczeniach procedurę poszukiwania wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu na podstawie analizy krzywej obciążenie-osiadanie, uzyskanej z badań modelowych. W obliczeniach zastosowano program komputerowy oparty na metodzie elementów skończonych. W artykule przedstawiono kilka przykładów uzyskanych wyników.

APPLICATION OF BACK ANALYSIS FOR DETERMINATION OF NONCOHESIVE SOIL'S PARAMETERS BASED ON THE MODEL TESTS' RESULTS

Summary. This paper presents the results of numerical calculations, which are the simulations of model tests of bearing capacity of homogeneous, noncohesive soil limited by rigid layer with regard to two-dimensional aspect of this phenomenon. A procedure of determination of the soil's strength parameters based on a load-settlement curve obtained from model tests are described. In calculations a computer program based on finite element method was applied in calculations. Some examples of obtained results are presented in the paper.

1. Wprowadzenie

Podstawowym zagadnieniem dziedziny geotechniki jest określanie fizyko-mechanicznych, a szczególnie wytrzymałościowych, parametrów materiałów, z jakich zbudowane jest podłoże gruntowe. Analiza wsteczna jest często jedną z najdokładniejszych metod wyznaczania wartości cech wytrzymałościowych, gdy znane są wyniki badań i obserwacji terenowych. Metoda ta, a raczej grupa tych metod, to bardzo skomplikowane i pracochłonne procedury numeryczne, stąd powszechny wzrost zainteresowania nimi w dobie szybkiego rozwoju powszechnej komputeryzacji. Uogólniając, metoda polega na dobieraniu (szukaniu wg ustalonego algorytmu) takich wartości parametrów materiałowych, aby obliczenia (z wykorzystaniem np. metody elementów skończonych, metody elementów brzegowych, metody różnic skończonych, z zaimplementowanymi prawami konstytutywnymi opisującymi zależności naprężenie-odkształcenie, odpowiadające zachowaniu się danego materiału pod obciążeniem), dały w wyniku takie wartości osiadań, ugięć czy nośności, jakie są obserwowane na istniejących obiektach w skali naturalnej bądź w laboratorium, w skali modelowej. Kryterium zbieżności w algorytmach poszukiwawczych opisuje założona (przyjęta) funkcja celu. Minimalizacja wartości tej funkcji jest podstawowym zadaniem algorytmu poszukiwawczego. W większości wypadków funkcją tą jest suma najmniejszych kwadratów różnic pomiędzy wartościami obserwowanymi w doświadczeniu a wynikami obliczeń. Stosowane przez badaczy podejścia do tego zagadnienia możemy podzielić na dwie kategorie: probabilistyczną i deterministyczną. Z probabilistycznego punktu widzenia w algorytmach poszukiwawczych w prosty sposób możemy uwzględnić struktury błędów pomiarowych (nieuniknionych podczas prac terenowych, wynikających chociażby z dokładności sprzętu pomiarowego), czy wykorzystać informacje "a priori", znane wcześniej zależności lub przewidywane parametry opisujące materiał lub zjawisko. Jedną z probabilistycznych definicji zależności pomiędzy wynikami obserwacji i obliczeń jest metoda Bayesa, która zakłada, że nieznaną parametr jest rozważany jako zbiór przypadkowych wartości, a optymalną-szukaną wartość tego parametru uzyskuje się szukając ekstremalnej i jednocześnie globalnej (tzn. obowiązującej w całym zakresie poszukiwań) wartości wyrażenia, stanowiącego założoną funkcję celu.

W niniejszym artykule przedstawiono próbę uzyskania wartości trzech parametrów materiałowych: siecznego modułu odkształcenia, kąta tarcia wewnętrznego i kąta dylatacji na podstawie wyników własnych badań modelowych. Biorąc pod uwagę istniejące tendencje

do wykorzystywania w praktyce inżynierskiej szeroko pojętych metod komputerowych oraz to, że zagadnienie oddziaływania fundamentu bezpośredniego na podłoże gruntowe stanowi wieloletni temat badawczy realizowany przez autorów (grant KBN nr 772089203 i 8T07E01920), powstała idea uzupełnienia istniejącego stanu wiedzy o wyniki badań modelowych oraz analiz numerycznych nośności i odkształcalności podłoża gruntowego, ograniczonego warstwą sztywną.

2. Opis metody obliczeń

Symulacje numeryczne objęły wszystkie przeprowadzone badania modelowe nośności jednorodnego podłoża gruntowego, ograniczonego sztywną warstwą nieodkształcalną, obciążonego modelem fundamentu bezpośredniego o szerokości $B=20$ cm w następujących wariantach:

- dwa rodzaje gruntów niespoistych: piasek drobny "Lubiatowo" i piasek gruby "Rybaki II",
- fundament powierzchniowy i zagłębiony ($D = 0,25B$).

Opis badań modelowych zawarto w artykułach Bartoszewicza i Srokosza [2,4]. Obliczenia wykonano uwzględniając dwa skrajne warianty warunków w kontakcie pomiędzy modelem fundamentu a powierzchnią zasypu: kontakt idealnie gładki ($\mu=0$) oraz kontakt szorstki ($\mu=\text{tg}\Phi$). W obliczeniach zastosowano program PLAXIS 6.3 Pro, udostępniony w ramach współpracy naukowej z Laboratoire Sols, Solides, Structures, w Grenoble. Odkształcalny ośrodek gruntowy zdyskretyzowano piętnastowęzłowymi trójkątnymi elementami, prowadząc obliczenia z wykorzystaniem liniowo-sprężysto-idealnie-plastycznego prawa konstytutywnego z kryterium Coulomba-Mohra. Zdefiniowano następujące funkcje celu:

$$F_1 = \frac{|\int f_c(Q,s) - \int f_c(Q,s)|}{\int f_c(Q,s)} \quad (1)$$

$$F_2 = \sum (s_i^* - s_i^e)^2 \quad (2)$$

gdzie: $f_c(Q,s)$ - funkcja opisująca zależność osiadania od obciążenia dla wartości pomierzonych,

$f_c(Q,s)$ - funkcja opisująca zależność osiadania od obciążenia dla wartości obliczonych,

s_i^e - pomierzona wartość osiadania odpowiadająca obciążeniu i

s_i^c - obliczona wartość osiadania odpowiadająca obciążeniu i .

Minimalizację funkcji celu przeprowadzono metodą gradientową, w której kolejne przybliżenia wartości ze zbioru poszukiwanych parametrów uzyskujemy przez wyznaczenie takich przyrostów zmiennych, aby określony przez nich kierunek opisywał najszybszą zmianę wartości funkcji celu. Przykładowy wektor jednostkowy możemy przedstawić za A. Strzałkowskim [6]:

$$g_i = \frac{\frac{\partial F}{\partial x_i}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial F}{\partial x_j}\right)^2}} \quad i = 1..m \quad (3)$$

x_i - zbiór poszukiwanych parametrów,

lub stosując następujące zależności [1]:

$$\nabla F(x) = \frac{\partial F(x)}{\partial x} = \left[\frac{\partial F(E, v, \Phi, \Psi)}{\partial E}, \frac{\partial F(E, v, \Phi, \Psi)}{\partial v}, \frac{\partial F(E, v, \Phi, \Psi)}{\partial \Phi}, \frac{\partial F(E, v, \Phi, \Psi)}{\partial \Psi} \right]^T \quad (4)$$

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} - \delta \nabla F(x^{(i)}) \quad (5)$$

$$Q(\delta) = F(x^{(i)} - \delta \nabla F(x^{(i)})) \quad \delta \in (0, \Delta), \Delta > 0 \quad (6)$$

gdzie: δ - współczynnik kroku,

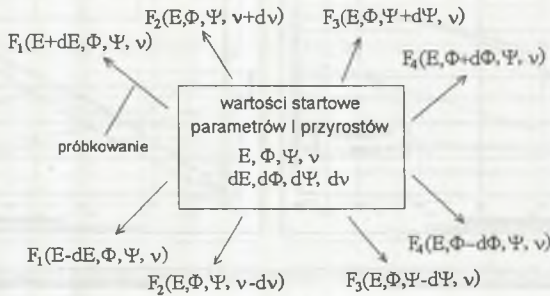
$Q(\delta)$ - funkcja opisująca zmiany wartości funkcji celu w danym kierunku z krokiem δ .

W obliczeniach wykorzystuje się liniowe przybliżenie funkcji $Q(\delta)$:

$$F(x^{(i)} - \delta \nabla F(x^{(i)})) \cong F(x^{(i)}) - \delta \left[\frac{\partial F(x)}{\partial x} \Big|_{x=x^{(i)}} \right]^T \nabla F(x^{(i)}) = F(x^{(i)}) - \delta |\nabla F(x^{(i)})|^2 \quad (7)$$

Szczegóły implementacji numerycznej powyższej metody czytelnik może znaleźć w pracy [1].

W celu określenia gradientu każdy etap obliczeń rozpoczynał się od wyznaczenia inkrementów wartości parametrów wyznaczających kierunek poszukiwania optymalnego rozwiązania (rys.1). Proces, nazwany "próbkowaniem", polegał na wyznaczeniu wrażliwości funkcji celu na niewielką zmianę jednego z parametrów, będącego elementem zbioru poszukiwanych wartości.

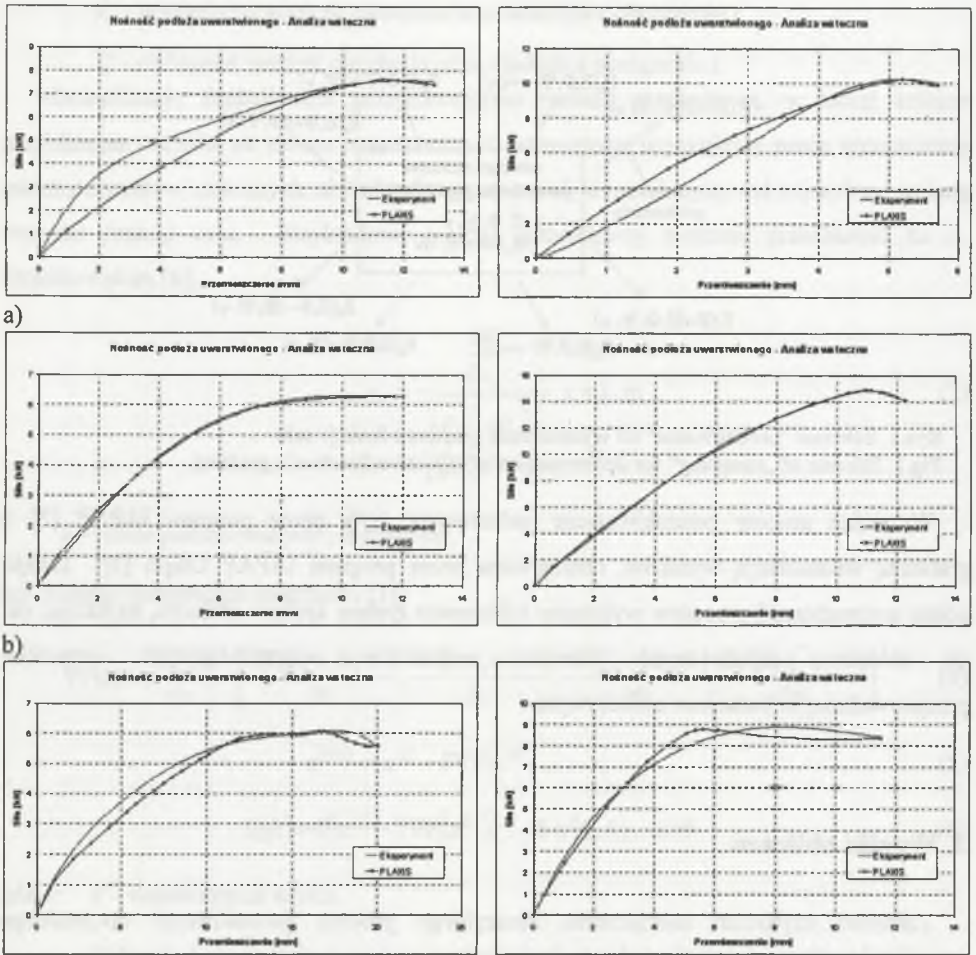


Rys.1. Schemat "próbkowania" do wyznaczenia gradientu funkcji celu
 Fig.1. Scheme of „sampling” for determination of objective function’s gradient

Wszystkie procesy poszukiwawcze nadzorowane były przez program IAPAP [5] z graficzną wizualizacją wyników, obsługiwaną przez program IAPAP Graph [5]. Dzięki pełnej automatyzacji procesów wykonano kilkanaście tysięcy kroków obliczeń, uzyskując ok. 40 zbiorów poszukiwanych wartości parametrów, odpowiadających wszystkim przeprowadzonym badaniom modelowym.

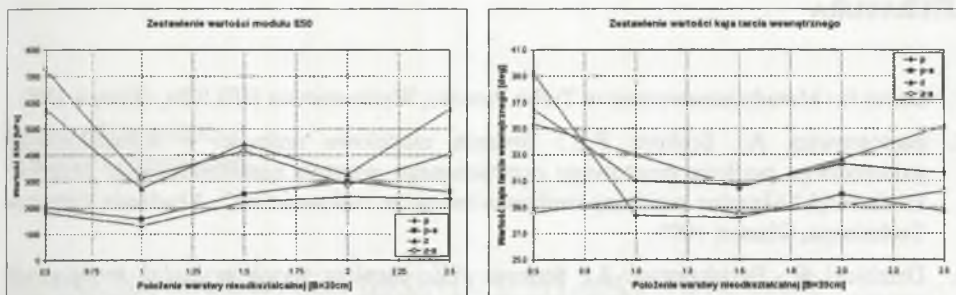
3. Wyniki obliczeń

Założone kryterium zakończenia iteracyjnego procesu poszukiwania optymalnego rozwiązania często stawiało zbyt ostre wymagania algorytmowi liczącemu. Wiele wyników, spośród szerokiego spektrum krzywych uzyskanych z doświadczeń, nie mogło być powtórzonych drogą symulacji w obliczeniach numerycznych; minimalizacja zawodziła przez brak możliwości dopasowania krzywych obliczeniowych i doświadczalnych (rys.2a,c) sprawiając kłopoty algorytmowi optymalizującemu, uniemożliwiając uzyskanie zbieżności w procesie minimalizacji. Mimo to ponad połowę wyników badań modelowych udało się powtórzyć w obliczeniach (rys.2b), uzyskując bardzo niskie końcowe wartości funkcji celu ($F_{cal}=0,008 \ll F_{crit}=0,05$).



Rys. 2. Końcowe wyniki obliczeń; a) słabe dopasowanie, b) dobre dopasowanie, c) trudności z uzyskaniem zbieżności procesu iteracyjnego
 Fig.2. Final results of calculations; a) weak fitting, b) good fitting, c) difficulties with obtaining convergence in iteration process

Uzyskane wartości parametrów materiałowych pokryły szeroki zakres wartości liczbowych. Na rys. 3 przedstawiono uzyskane wyniki dla ścieżnego modułu E_{50} i kąta tarcia wewnętrznego Φ (wyniki spełniające kryterium $F_{cal} < F_{crit}$). Jak można zauważyć, największe rozrzuty uzyskanych wartości obserwuje się dla doświadczeń z warstwą sztywną na głębokości względnej $H < 1B$ i $H > 2B$. W zakresie $H \in < 1B; 2B >$ wyniki przedstawiają zadowalającą zbieżność.



Rys. 3. Wartości modułu odkształcenia i kąta tarcia wewnętrznego odpowiadające różnym miąższościom podłoża

Fig.3. Values of strain modulus and internal friction angle for different thickness of subsoil

4. Wnioski

Przedstawiona metoda wyznaczania nieznanymi wartościami parametrów mechanicznych materiału podłoża gruntowego stanowi pierwszy krok autorów w tworzeniu systemu algorytmów poszukujących, opartych na wykorzystaniu gotowych aplikacji komputerowych bazujących na metodzie elementów skończonych. Gradientowa minimalizacja złożonych funkcji celu nie pozwala na odnalezienie rozwiązania optymalnego, ważnego w całym dopuszczalnym zakresie możliwości. Odszukane rozwiązanie lokalne - zależne od punktu startowego - nie może być przyjmowane jako satysfakcjonujące. Rozwiązaniem tej kwestii są metody oparte na np. algorytmach genetycznych, które przeszukują cały interesujący badacza obszar rozwiązań, okupione jest to jednak znacznie większym nakładem obliczeń. W Katedrze Geotechniki UWM w Olsztynie powstało już kilka implementacji algorytmów genetycznych, które są stosowane aktualnie do interpretacji wyników sondowań statycznych CPTU w gruntach organicznych.

Podziękowania

Autorzy pragną złożyć podziękowania Komitetowi Badań Naukowych za finansowanie tematu badawczego pt. „Wpływ położenia warstwy nieodkształcalnej na nośność i odkształcalność jednorodnego podłoża gruntowego obciążonego fundamentem pasmowym”.

LITERATURA

1. Baron B.: Metody numeryczne w Turbo Pascalu, Wydawnictwo HELION, Gliwice 1995.
2. Bartoszewicz A., Srokosz P.E.: Badania modelowe nośności i odkształcalności jednorodnego podłoża gruntowego ograniczonego warstwą nieodkształcalną. Materiały konferencji "Aktualne problemy naukowo-badawcze budownictwa", Akademia Rolniczo-Techniczna, Olsztyn 1999.
3. Dembicki E., Bartoszewicz A., Srokosz P.E.: Analiza wyników badań modelowych nośności jednorodnego podłoża gruntowego ograniczonego warstwą nieodkształcalną. XX Konferencja MGIF, Szczecin-Międzyzdroje 2000.
4. Srokosz P.E., IAPAP (Invers Analysis Plaxis Application Program), wersja 2.1, Olsztyn 2000.
5. Srokosz P.E., IAPAP Graph, Program do wizualizacji wyników analizy wstecznej, wersja 1.0, 2000.
6. Strzałkowski A., Śliżyński A.: Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów. PWN, Warszawa 1978.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

Abstract

The authors of the presented paper intend to describe a problem of determination of some parameters for noncohesive soil, taking into consideration the results of numerical simulations of model tests of bearing capacity of homogeneous subsoil limited by rigid layer with regard to two-dimensional aspect of this phenomenon. A simple description of an example procedure of determination of the soil's strength parameters based on a load-settlement curve obtained from model tests is presented. In calculations a computer programs were applied : PLAXIS based on finite element method and IAPAP master governing application (a gradient method of minimisation of the objective function). Some examples of obtained results are presented in the paper taking into consideration the influence of the relative position of rigid layer.