ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: BUDOWNICTWO z. 102 Nr kol.1644

Monika GWÓŹDŹ–LASOŃ*
Politechnika Krakowska

MODELOWANIE WZMOCNIONEGO PODŁOŻA GRUNTOWEGO

Streszczenie. W pracy rozważa się problematykę wzmacniania słabego podłoża. Przedstawiono tutaj schemat numerycznej procedury modelowania ośrodka gruntowego z elementami wzmocnienia w postaci kolumn kamiennych. Niniejsze rozważania są swego rodzaju podsumowaniem i uogólnieniem wcześniejszych prac [2], [3], [4], [5], które wykorzystywały procedury symulacji numerycznych przy użyciu MES i programu Z_Soil oraz zakładały wykorzystanie sprężysto-plastycznego modelu Druckera-Pragera.

THE NUMERICAL MODELS OF REINFORCED SOIL

Summary. This paper presents the problem of numerical modelling and designing the reinforced soil (RS) which is considered to consist of weak subsoil reinforced by gravel columns and geosynthetics. The main assumption for the adopted numerical model was made by using continuum medium and we accepted a plane strain model. For our calculations we have accepted the classical model of finite element method FEM. Finally, we have examined the numerical models using the computer program Z_SOIL.

1. Wprowadzenie

Badania komputerowe (computational science) są względnie nową dyscypliną i obecnie nie ma zgodności co do dokładnej definicji określającej tę dziedzinę. W szerokim znaczeniu tego słowa - nauki komputerowe obejmują użycie komputerów do badania problemów naukowych, łącząc i uzupełniając obszar teorii i eksperymentu w tradycyjnych badaniach naukowych [10].

Zważywszy na tytuł niniejszej pracy, na wstępie należałoby odpowiedzieć na pytanie – co rozumiemy przez pojęcie *model* i *modelowanie*? [7],[10]. Otóż, *model* jest sztucznym tworem, który odzwierciedla i reprodukuje istotne cechy, związki i funkcje rzeczywistego obiektu lub zjawiska, natomiast *modelowanie* jest to całokształt czynności związanych z

* Opiekun naukowy: Dr hab. Jan Gaszyński, prof. Pol. Krakowskiej

budową modelu. Rzeczywistość i model muszą być podobne pod względem pewnych cech i funkcji. Fakt, że model uzyskuje się przez uproszczenie czegoś, jest przyczyną, iż łatwiej go używać niż oryginalnego obiektu lub zjawiska. Można pokusić się o stwierdzenie, że model jest abstrakcją rzeczywistości, którą tworzy się poprzez redukcję oryginalnych obiektów do tworów prostszych. Jednocześnie modele często mają cechy, które nie odpowiadają cechom obiektu rzeczywistego i zazwyczaj istnieje więcej niż jeden model danego zjawiska czy obiektu. W praktyce, możemy mówić o nieskończonej liczbie modeli cząstkowych (partial models), które mniej lub bardziej pasują do analizy i opisu szczególnych cech rzeczywistości.

Stwierdzenie, iż „(...) *Nic nie dzieje się wbrew naturze, jedynie wbrew naszej ograniczonej wiedzy*", stało się inspiracją oraz myślą przewodnią podjętego przeze mnie tematu pracy doktorskiej pt. „Modele numeryczne podłoża gruntowego w aspekcie różnych metod i technologii wzmocnienia". Celem tej pracy jest stworzenie, na bazie możliwie dostępnej wiedzy, optymalnych modeli numerycznych dla określonych technik wzmacniania podłoża, tak by z jednej strony, modele te były możliwie najprostsze, a zarazem jak najwierniej opisywały rzeczywiste zachowanie się złożonego ośrodka gruntowego i elementów wzmocnienia.

2. Model matematyczny i model numeryczny

Układ rzeczywisty – to pewien obszar w przestrzeni, obejmujący ośrodek ciągły i umiejscowione tam obiekty techniczne. W naszym przypadku jest to podłoże gruntowe wraz z elementami wzmocnienia. Badania teoretyczne mające na celu opisanie zachowania się takiego podłoża gruntowego, na skutek oddziaływań zewnętrznych lub wewnętrznych, wymagają stworzenia pewnego modelu myślowego, który wraz ze zbiorem formuł opisujących jego własności i wskazaniem przyjętych założeń oraz uproszczeń nazywany będzie modelem matematycznym lub modelem obliczeniowym (numerycznym) [6] [7].

2.1. Model matematyczny

Przez model matematyczny rozumiemy zbiór zależności matematycznych opisujących interesujące nas zjawisko fizyczne z określoną dokładnością. Sformułowanie matematycznego opisu procesu nazywamy modelowaniem matematycznym. Dla danego obiektu rzeczywistego można opracować różne modele matematyczne w zależności od

uproszczeń poczynionych przy opracowywaniu modelu, które to uproszczenia z jednej strony ułatwiają jego opis, z drugiej natomiast mają znaczący wpływ na dokładność poszukiwanego rozwiązania. Daleko idące uproszczenia mogą spowodować pominięcie istotnych cech układu rzeczywistego, jednakże zbyt złożony model matematyczny może spowodować błędy w rozwiązaniu ze względu na skomplikowany proces obliczeniowy [7], [8], [10].

Nie ma jednoznacznych wskazań, jak należy budować model matematyczny, jednak najczęściej stosowane uproszczenia techniczne to po pierwsze, założenie prostego kształtu rozważanego obszaru, przyjęcie liniowych charakterystyk dla pewnych właściwości fizycznych lub mechanicznych badanego ośrodka gruntowego i jego jednorodności oraz założenie, że właściwości fizyczne są stałe w czasie [6].

2.2. Model obliczeniowy – model numeryczny

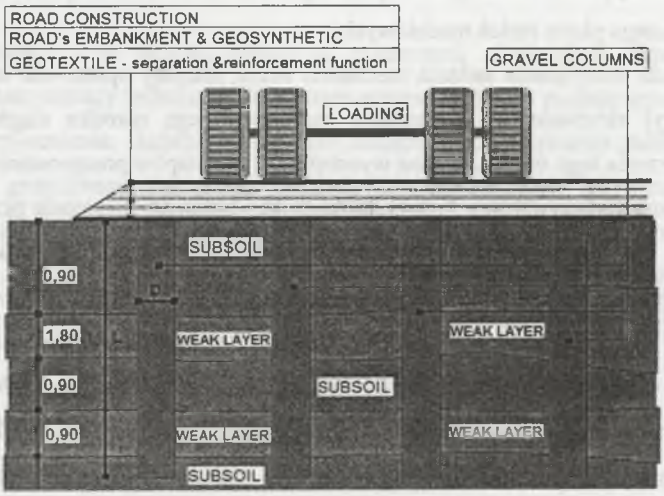
Modelowanie matematyczne odbywa się zazwyczaj za pomocą równań różniczkowych cząstkowych. Dyskretyzacja ciągłego modelu matematycznego polega na zastosowaniu jednej z metod numerycznych prowadzących do układów równań algebraicznych (dyskretyzacja pełna) lub równań różniczkowych zwyczajnych najczęściej z pochodnymi względem czasu (dyskretyzacja częściowa). Modelowanie numeryczne modelu dyskretnego polega na wyborze algorytmu numerycznego służącego do rozwiązywania równań modelu dyskretnego, natomiast rozwiązywanie numeryczne dyskretnych równań modelu to proces, który przebiega według przyjętego planu badań modelowych.

Stosując do rozwiązania zadania mechaniki MES, musimy opracować model dyskretny (obliczeniowy) ekwiwalentny do modelu matematycznego ośrodka ciągłego [6],[8]. W procesie tworzenia tego modelu można wyodrębnić kilka etapów postępowania: po pierwsze - podział rozpatrywanego obszaru V na podobszary V_e – elementy, następnie przyjęcie punktów węzłowych, tak aby można było przeprowadzić aproksymację poszukiwanej funkcji wewnątrz obszaru V_e za pomocą funkcji aproksymujących i niezależnych parametrów węzłowych. W kolejnych krokach określa się dla każdego elementu struktury macierzy opisujących własności danego modelu i tworzy macierze dla całego układu. Określenie warunków brzegowych i sposobu obciążenia ciała jest kolejnym etapem tworzenia modelu, w końcu rozwiązanie podstawowego układu równań i obliczenie, na podstawie wyznaczonych parametrów węzłowych, funkcji pochodnych. Problemy matematyczne powstające przy budowie i wykorzystaniu modeli wymagają często określenia wartości zmiennych stanu. Podanie ograniczeń transformuje takie problemy matematyczne w problemy numeryczne:

metody komputerowe mogą być stosowane do określenia zadanych wielkości, jeżeli relacje matematyczne, równania, nierówności, dane numeryczne są zadane. Matematyka numeryczna i numeryczne przetwarzanie danych zajmują się projektowaniem, analizą i zastosowaniem metod komputerowo wspomaganego rozwiązywania problemów numerycznych. Kombinacja problemu matematycznego (natury konstruktywnej) i zadań co do dokładności wyników nazywana jest problemem numerycznym [6], [7], [10].

3. Specyfikacja problemu i przyjęte założenia

Pierwszym krokiem w budowie modeli jest zespecyfikowanie problemu poprzez określenie celu badań, zakresu problemu i założenie żądanej dokładności. Celem przeprowadzanych badań jest stworzenie modeli numerycznych wzmocnionego podłoża gruntowego, które odzwierciedlałyby technologię wykonania kolumn kamiennych. Przyjęte do analizy podłoże gruntowe składa się z dwóch słabych warstw: pierwszej o miąższości 1,80 m, znajdującej się 0,90 m poniżej poziomu terenu i drugiej o miąższości 0,90 m na głębokości 3,60–4,50 m. Na powierzchni terenu, na materacu geosyntetycznym, zamodelowano nasyp drogowy o wysokości 0,60 m z zastosowaniem geokraty (rys. 1).



Rys. 1. Reprezentatywny przekrój poprzeczny wzmacnianego ośrodka gruntowego
Fig. 1. Geometry of models assumed for numerical computation

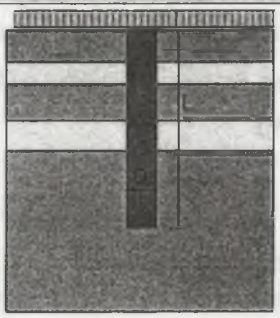
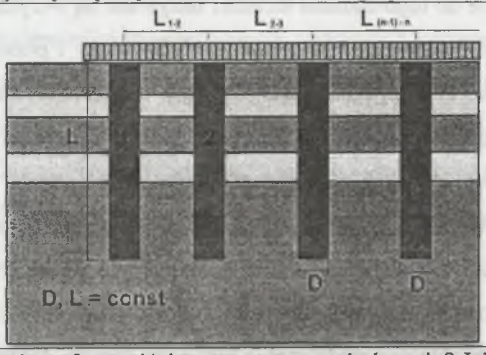
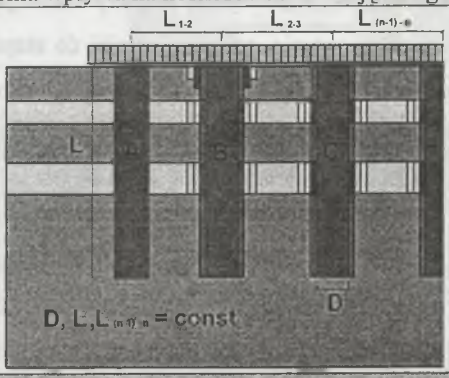
Dla tak przyjętego reprezentatywnego przekroju zaproponowano modele obliczeniowe wzmocnienia podłoża gruntowego kolumnami kamiennymi [2], [3], [4], [5]. Założono model płaski oraz symetrię układu modelowanego obszaru gruntu pod nawierzchnią drogową względem osi projektowanej jezdni. Dla kolejnych symulacji numerycznych przyjęto podłoże gruntowe i elementy wzmocnienia – kolumny kamienne, jako ośrodek sprężysto–plastyczny z zastosowaniem kryterium Druckera-Pragera, scharakteryzowany przez te same parametry (γ, β_F, β, K_x, K_y, S_r, α, E, ν, Φ, c, Ψ).

4. Numeryczny algorytm weryfikacji modelu

Zanim dany model może być powszechnie używany, jego ważność lub nieważność musi być określona. Stosowane do tego zadania techniki nazywane są weryfikacją i falsyfikacją. W czasie budowy model obliczeniowy jest często modyfikowany i ponownie formułowany w sposób bardziej dokładny. Każdy element tworzący model ma duży wpływ na wynik końcowy przeprowadzanych testów, dlatego przy budowie modelu ośrodka gruntowego wzmocnionego kolumnami kamiennymi wyszczególniono kilka etapów [9].

W pierwszym etapie prac testowych przyjęto jako model obliczeniowy pojedynczą kolumnę o znanej średnicy *D* i długości *L* umiejscowioną w podłożu gruntowym (rys. 2). Dla takiego przypadku wyznaczono formę deformacji, wielkość odkształcenia i nośność. Jednak tak sformułowane rozwiązanie nasuwało szereg pytań, np., czego dotyczy i co charakteryzuje wyznaczona nośność podłoża? oraz jak zachowuje się większy obszar podłoża?

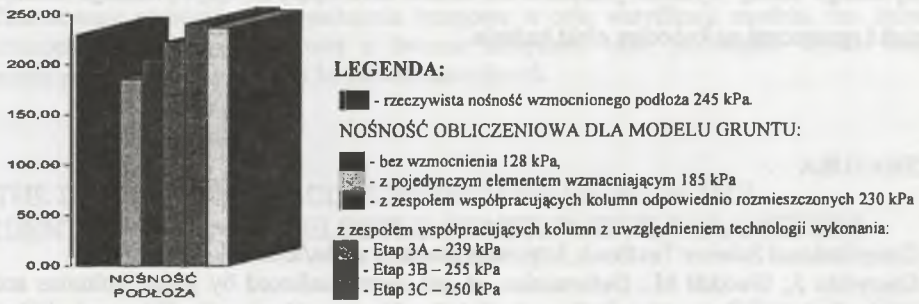
Chcąc udzielić odpowiedzi na to pytanie, należało przejść do etapu drugiego, w którym zmodyfikowano wcześniejszy model poprzez zaprojektowanie zespołu współpracujących ze sobą kolumn kamiennych o takiej samej średnicy i długości. Testom numerycznym poddano tutaj wpływ rozstawu kolumn (L_{1-2}, L_{2-3}, L_{3-4}, ... , $L_{(n-1)-n}$, gdzie n - ilość kolumn w danym przekroju) na nośność całego układu. W kolejnym kroku (dla schematu najlepiej rozmieszczonych kolumn) badano wpływ procesu konsolidacji na wielkość przemieszczenia i poprawę nośności całego układu. Wyniki otrzymane z przeprowadzonych symulacji potwierdziły znaczącą rolę kolumn kamiennych jako drenażu, w przyspieszaniu procesu konsolidacji. Jednakże wyciągnięte wnioski nasuwały kolejne pytania, a mianowicie: po pierwsze, jak zamodelować strefę przejściową gruntu przy kolumnie? Następnie, jak metoda i

ETAPY MODELOWANIA NUMERYCZNEGO PODŁOŻA GRUNTOWEGO Z ELEMENTAMI WZMACNIAJĄCYMI – KOLUMNAMI KAMIENNYMI			
		MODEL	ANALIZA
1 ETAP	MODEL POJEDYNCZEGO ELEMENTU WZMACNIAJĄCEGO GRUNT		Analiza kształtu deformacji, wielkości odkształceń i naprężeń oraz określenie nośności układu.
PYT. Czego dotyczy i co charakteryzuje wyznaczona nośność podłoża? Jak zachowuje się większy obszar wzmocnionego podłoża?			
2 ETAP	MODEL ZESPOŁU WSPÓŁPRACUJĄCYCH ELEMENTÓW WZMACNIAJĄCYCH PODŁOŻE		Analiza wpływu rozstawu kolumn na deformację, wielkości odkształceń i nośność podłoża. Analiza wpływu konsolidacji podłoża oraz roli kolumn kamiennych jako drenażu na wzrost nośności układu.
PYT. Jak zamodelować strefę przejściową gruntu przy kolumnie? Jak metoda i technologia wykonania wzmocnienia wpływa na nośność i deformację całego układu?			
3 ETAP	MODELOWANIE STREFY PRZEJŚCIOWEJ PRZY ELEMENCIE WZMOCNIENIA		Analiza wpływu kształtu oraz technologii wykonania na deformację podłoża, wielkości odkształceń i nośność całego układu. Analiza zasięgu strefy przejściowej oraz jej wpływ na końcowy wynik obliczeń.
PYT. Czy przyjęcie modelu płaskiego oraz schematu połówkowego ma wpływ na wyniki końcowe obliczeń? Czy model 3D dla jednego pala osiowo symetrycznego będzie dobrze oddawał pracę całego układu? Jak zamodelować rozpór boczny kolumn kamiennych? itd.			

Rys. 2. Kolejne etapy tworzenia modelu numerycznego dla wzmocnionego podłoża gruntowego
Fig. 2. Three consecutive stages of the numerical model development

technologia wykonania wzmocnienia wpływa na nośność i deformację całego układu? oraz czy uwzględnienie warstw przejściowych o polepszonych parametrach mechanicznych na skutek technologii wykonania kolumn ma znaczący wpływ na otrzymane w wyniku obliczeń informacje o rzeczywistych przemieszczeniach i nośności podłoża?

Tak więc następny etap modelowania wygenerował trzy nowe modele obliczeniowe, które uwzględniały kształt kolumn w zależności od technologii wykonania (kolumna kamienna w rękawie geosyntetycznym (rys. 2 etap 3A), wykonywana metodą udarową (rys. 2 etap 3B) lub wibrowymiany (rys. 2 etap 3C)). Z niniejszych rozważań wynika, iż istotnym czynnikiem w tworzeniu modelu numerycznego jest uwzględnienie technologii, w jakiej dana kolumna kamienna powstaje. Ma to wpływ na wyniki końcowe testów numerycznych, określających nośności podłoża oraz analizę przebiegu deformacji.



Rys. 3. Zależność wpływu rodzaju modelu obliczeniowego na wynik końcowy obliczeń
Fig. 3. Carrying capacity of the foundation for the detal accepted numerical models

Z racji limitu stron, na których należy zamieścić niniejszą pracę, przedstawiono tylko jeden wykres, opisujący relację otrzymanych z testów numerycznych wyników w odniesieni do rzeczywistej nośności wzmocnionego podłoża po wykonaniu inwestycji, czyli po wybudowaniu drogi przy Węźle Wielickim w Krakowie (rys. 3). Założone tutaj modele płaskie w rzeczywistości reprezentują zagadnienie przestrzenne, a co za tym idzie, podlegają standardowym procedurom homogenizacji, w związku z czym dalsze prace będą zmierzały w kierunku uwzględnienia przestrzennego charakteru modelu obliczeniowego. Problemem otwartym pozostaje tutaj kwestia oceny wartości modułów sztywności „stref dogęszczonych", co prawdopodobnie również wpłynie na wyniki przeprowadzanych testów obliczeniowych. Najważniejsze pytanie na jakie należy za każdym razem odpowiedzieć, to czy uwzględnienie kolejnych szczegółów modelu przybliża nas do rozwiązania rzeczywistego, czy też zbyt

komplikuje zadanie i powoduje, że procedury obliczeniowe i numeryczne przybliżenia generują błędy, które zaburzają wynik końcowego rozwiązania.

5. Podsumowanie

Badania teoretyczne, symulacja oraz eksperyment są silnie ze sobą połączone i żadna z tych metod poznawczych uzyskiwania wiedzy nie może być używana oddzielnie. Symulacja, czyli analityczne lub numeryczne rozwiązanie równań danego modelu, ma możliwość dawania pełnych i wiarygodnych wyników tylko wówczas, gdy jest weryfikowana teoretycznie i eksperymentalnie. W celu jak najlepszego zamodelowania układu rzeczywistego należy wykonać jeszcze wiele testów określających wpływ różnego rodzaju założeń i uproszczeń na końcowy efekt badania.

LITERATURA

1. Computational Science Textbook, http:/sage.moriarty.nmhs/textbook.
2. Gaszyński J., Gwóźdź M.: Deformation of soil layer reinforced by gravel columns and geosynthetic. 6th International Geotechnical Conference - New methods in geotechnical engineering, Bratislava June 23-24, 2003.
3. Gaszyński J., Gwóźdź M.: Deformacja podłoża wzmocnionego kolumnami z kruszywa z zastosowaniem geosyntetyków. XIII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Gliwice – Szczyrk 2003.
4. Gaszyński J., Gwóźdź M.: Modelowanie uwarstwionego podłoża gruntowego z uwzględnieniem wpływu współpracy kolumn kamiennych i geosyntetyków. XLIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB „Krynica 2003 r." Tom V.
5. Gaszyński J., Gwóźdź M.: Konsolidacja uwarstwionego podłoża gruntowego wzmocnionego kolumnami z kruszywa. II Problemowa Konferencja Geotechniki – „Współpraca budowli z podłożem", Białystok – Białowieża 2004, 231-240.
6. Modele obliczeniowe, http://zarembski.republika.pl/mes/model_obliczeniowy.htm.
7. Morrison F.: Sztuka modelowania układów dynamicznych, WNT, Warszawa 1996.
8. Ottosen N., Petersson H.: Introduction to finite element method, Prentice Hall, New York 1992.
9. Poroshasb H.B.,Meyerhof G.G.: Analysis of Behavior of Stone Columns and Lime Columns. Computers and Geotechnics, Vol.20 No 1. 1997.
10. Ueberhuber Ch.W.: Numerical computation. Springer Verlag, Berlin 1997.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Maciej Gryczmański