

*Monika Gwoździł-Lason**

WYKORZYSTANIE PROSTYCH MODELI NUMERYCZNYCH PODŁOŻA GRUNTOWEGO DO WYBORU OPTYMALNYCH METOD JEGO WZMOCNIENIA

1. Wstęp

W prezentowanej pracy, przedstawiono koncepcję modeli numerycznych podłoża gruntowego z elementami wzmacniającymi, która została wyznaczona w oparciu o wyniki otrzymane z przeprowadzonych symulacji komputerowych i analiz. Niniejsze rozważania są kontynuacją wcześniej opublikowanych prac, które były realizowane w ramach projektu badawczego nr 4T07E 022 29, finansowanego ze środków na naukę w latach 2005/2007 jako grant promotorski. W przytoczonych pracach [2–9] opisano kolejne etapy przeprowadzonych badań i analiz oraz przedstawiono wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych wykonanych przy użyciu programu Z_Soli oraz zakładając sprężysto-plastyczny model ośrodka gruntowego.

Wzmacnianie słabego podłoża gruntowego, od kilkudziesięciu lat znajduje powszechne zastosowanie w praktyce, co bezpośrednio wynika z szybkiego i wszechstronnego rozwoju budownictwa oraz nowoczesnych technik fundamentowania. Wybór lokalizacji różnorodnych obiektów budowlanych lub tras komunikacyjnych na terenach o złych lub bardzo złych parametrach wytrzymałościowych nie stanowi już większego problemu. Dysponując odpowiednimi środkami finansowymi i aktem własności lub użytkowania nieruchomości gruntowej, sporządza się stosowną ekspertyzę geotechniczną określającą rodzaj gruntów występujących na przedmiotowej nieruchomości oraz parametry fizyczne i mechaniczne podłoża w celu odpowiedniego zaprojektowania i zrealizowania inwestycji. W przypadku stwierdzenia konieczności polepszenia parametrów wytrzymałościowych gruntu, wybiera się odpowiednią metodę i technologię wzmocnienia podłoża gruntowego, w zależności od rodzaju gruntu oraz typu i wielkości obciążeń jakie będą przekazywane z budowli na podłoże.

* Instytut Geotechniki, Politechnika Krakowska, Kraków

W niniejszej pracy, zaprezentowano procedurę modelowania podłoża gruntowego wraz z elementami wzmacniającymi w postaci kolumn kamiennych i pali żelbetowych, w celu wyboru optymalnej metody lub technologii wzmocnienia. Optymalna metoda wzmocnienia gruntu, jest tutaj rozumiana jako najlepsza metoda dla celu w jakim dany model jest tworzony w tym przypadku mając na względzie aspekty ekonomiczne.

2. Założenia początkowe dla proponowanego modelu

Prezentowana w niniejszym referacie propozycja prostych modeli numerycznych gruntu jest adresowana dla metod wzmacniania podłoża w drodze inkluzji materiału o korzystniejszych właściwościach mechanicznych, w szczególności: dla kolumn kamiennie-żwirowych, a także dla pali betonowych i żelbetowych, wykonywanych w różnych technologiach. Taki rodzaj wzmacniania podłoża gruntowego jest stosowany pod inwestycjami drogowymi — budowa nasypów drogowych oraz pod inwestycjami komercyjnymi, gdzie pod stopami lub ławami fundamentowymi centrów handlowych, hoteli, osiedli mieszkalnych czy parkingów, projektowane są kolumny lub pale wzmacniające podłoże. Proponowane tutaj modele numeryczne są dwuwymiarowe w układzie „budowla — wzmocnione podłoże” z uwzględnieniem niejednorodności strefowej. Model fizycznej rzeczywistości rozważany jest jako oddziaływujące na siebie obciążenia zewnętrzne przekazywane z budowli i elementy wzmacniające podłoże wraz z otaczającym je gruntem. Do opisu zachowania się każdej ze stref zaproponowanego modelu przyjęto najprostsz model konstytutywny przyrostowej teorii plastyczności — ośrodek sprężysto idealnie plastyczny zdefiniowany za pomocą warunku stanu granicznego Coulomba-Mohra oraz Druckera-Pragera z stowarzyszonymi prawami płynięcia.

Przedmiotowe dwuwymiarowe modele 2D uwzględniają przestrzenną charakterystykę analizowanych zagadnień poprzez rozmycie parametrów charakteryzujących poszczególne materiały i wyodrębnione strefy modelowe na założoną jednostkę reprezentatywną. Do przeprowadzenia stosownych symulacji numerycznych i analiz wykorzystuje się oprogramowanie Z_Soil.PC. Poczynionym powyżej założeniom jakie przyjęto do utworzenia proponowanych modeli numerycznych wzmocnionego podłoża gruntowego przyświeca cel przedstawienia możliwie najprostszego modelu obliczeniowego z uwagi na ekonomikę i efektywność samego procesu projektowania i pozyskiwania danych wyjściowych, a równocześnie takiego modelu, który przedstawi poprawną postać deformacji analizowanego ośrodka i z założoną na wstępie dokładnością oraz wyznaczy jego nośność (rozumianą tutaj jako „obciążenie graniczne”) czy wielkość osiadania pod zadaniem obciążeniem przenoszonym z obiektów inżynierskich.

3. Procedura modelowania

Podstawą modelowania jest ustalenie na wstępie właściwości modelu oraz dobór jego parametrów, gdyż modelowanie fizyczne układu rzeczywistego polega na identyfikacji pa-

rametrów, istotnych z punktu widzenia zakresu i sposobu modelowania zjawisk zachodzących w podłożu gruntowym z elementami wzmacniającymi. W związku z poczynionymi założeniami początkowymi dla omawianych modeli, niezbędne dane na wejściu charakteryzujące poszczególne materiały wchodzące w skład modelu numerycznego zestawiono w tabeli 1.

Charakterystyki materiałowe poszczególnych stref modelu uzupełniają dane dotyczące wielkości kąta dylatacji, który został przyjęty jako $\psi = 0$ w dla gruntów spoistych, natomiast dla gruntów niespoistych określono jego wartość jako większą bądź równą 0, ale równocześnie mniejszą bądź równą kątowi tarcia wewnętrznego, czyli zawartą w przedziale $0 \leq \psi \leq \phi$.

TABELA 1

Parametry charakteryzujące poszczególne materiały wchodzące w skład modelu wzmocnionego ośrodka gruntowego

Model	Nazwa	Symbol	Jednostka
Coulomba-Mohra (C-M) & Druckera-Pragera (D-P)	moduł odkształcenia	E	MPa
	ciężar objętości	g	kN/m ³
	współczynnik Poissona	ν	–
	kąt tarcia wewnętrznego	ϕ	°
	spójność	c	kPa
	kąt dylatacji	ψ	°

Następnym krokiem jest dyskretyzacja ciągłego modelu matematycznego w celu zamodelowania numerycznego modelu dyskretnego. Ocena wyników otrzymanych z przeprowadzonych symulacji numerycznych, ich interpretacja i weryfikacja to finałowe czynności całego procesu modelowania numerycznego. Z przeprowadzonych badań wynika, że różnorodność stosowanych metod wzmacniania podłoża nie pozwala na przyjmowanie jednolitej procedury obliczeniowej nie tylko w odniesieniu do poszczególnych metod, ale również koniecznym jest indywidualne rozwiązanie w obrębie jednej metody dla różnych technologii wykonania. Wnioski jakie nasuwają się z analizy zebranych wyników pozwalają na podanie wskazówek do modelowania numerycznego zmodyfikowanego podłoża gruntowego uwzględniających geometrię, parametry materiałowe, a także zasięg stref przejściowych dla proponowanych prostych modeli numerycznych.

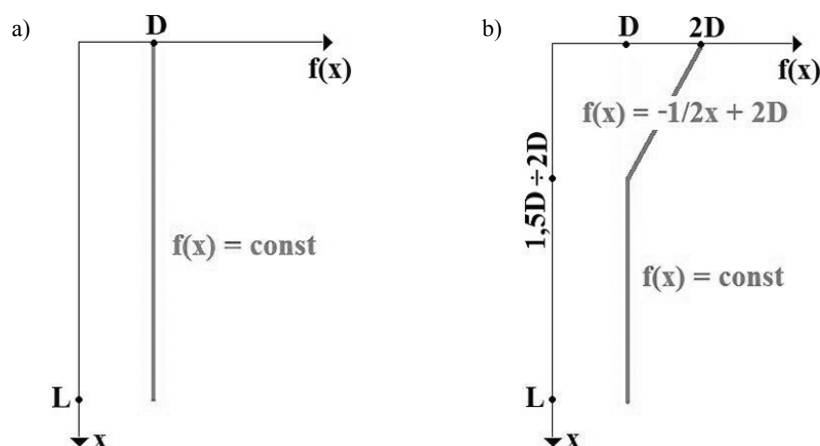
4. Koncepcja prostych modeli wzmocnionego podłoża gruntowego

4.1. Geometria modeli

Wyniki z przeprowadzonych testów potwierdzają wpływ geometrii modelu numerycznego na otrzymane wyniki z przeprowadzanych symulacji, określające nośności wzmocnionego podłoża gruntowego.

Wnioski z wykonanych analiz pozwoliły na sformułowanie następujących twierdzeń:

- 1) Naturalnym modelem geometrycznym pali jest walec o długości L i średnicy D , podobnie jest w przypadku modelowania pracy kolumn kamiennych wykonanych w rękawie geosyntetycznym. Tak przyjęty model geometryczny w układzie 2D, można opisać funkcją $f(x) = const$ (na całej długości L kolumny czy pala) — rysunek 1a.
- 2) Kształt modelu geometrycznego może próbować uwzględniać metodę i technologie wykonywania wzmocnienia. Z przeprowadzonych analiz wynika, iż dla kolumn formowanych metodą udarową, dobre rozwiązanie daje zamodelowanie geometrii kolumny w postaci walca połączonego z ściętym stożkiem, w taki sposób, że średnica kolumny jest funkcją zmienną, opisaną w taki sposób, że przy powierzchni średnica górna wynosi $D_G = 2D$ i następnie zwęża się ona na głębokości $1,5D \div 2D$ do rozmiaru średnicy dolnej $D_D = D$, czyli dla $x \in (0; 2D) f(x) = -\frac{1}{2}x + 2D$ i dla $x \in (2D; L) f(x) = const$ — rysunek 1b.



Rys. 1. Funkcje opisujące kształt modelu geometrycznego, dla wybranych metod i technologii wzmocnienia podłoża gruntowego

4.2. Ilość i charakterystyka stref przejściowych

W przypadku wzmocnienia podłoża kolumnami wykonywanymi w technologii Vibro, dobrym rozwiązaniem jest przyjęcie modelu geometrycznego opisanego jako funkcja stała $f(x) = const$ (na całej długości kolumny — rys. 1a), jednakże nie jest to wystarczające, gdyż z przeprowadzonych analiz wynika, iż znaczący wpływ na końcowy wynik obliczeń ma szerokość i ilość zamodelowanych stref przejściowych.

Na podstawie szeregu przeprowadzonych symulacji oceniono wpływ szerokości i wielkości parametrów opisujących „strefy dogęszczone” na nośność całego układu, czyli gruntu wzmocnionego kolumnami wykonanymi w technologii wibrowymiany i wibroflotacji.

Analizując otrzymane dane stwierdzono, że przy stosowaniu technologii wibroflotacji, która doprowadza w efekcie do poprawienia stopnia zagęszczenia w całej strefie oddziaływania gruntu — w modelu można uwzględnić dwie strefy przejściowe pomiędzy materiałem kolumny, a podłożem $D_{SP1} = D_{SP2} = D/3$ (gdzie D — to średnica elementu wzmacniającego), o parametrach oszacowanych jako średnia ważona z wagą dwa dla materiału elementu wzmacniającego oraz z wagą jeden dla materiału ośrodka gruntowego. Natomiast przy stosowaniu technologii wibrowymiany (głównie w gruntach mieszanych i spoistych, które słabo lub wcale nie poddają się zagęszczeniu własnemu) — w modelu obliczeniowym uwzględnić można jedną strefę przejściową o szerokości $D_{SP} = D/2$, a parametry tej strefy można opisać jako średnia arytmetyczną z danych charakteryzujących element wzmacniający i grunt bezpośrednio z nim sąsiadujący. Ponadto z przeprowadzonych badań wynika, iż w wielu przypadkach poprawnym jest zamodelowanie pojedynczej strefy przejściowej pomiędzy elementem wzmacniającym, a warstwą słabą o szerokości $D_{SP\ GC-WL} = D$, dla której parametry można przyjąć jako średnia ważona pomiędzy parametrami elementu wzmacniającego z wagą 2 i parametrami warstwy słabej z wagą 1.

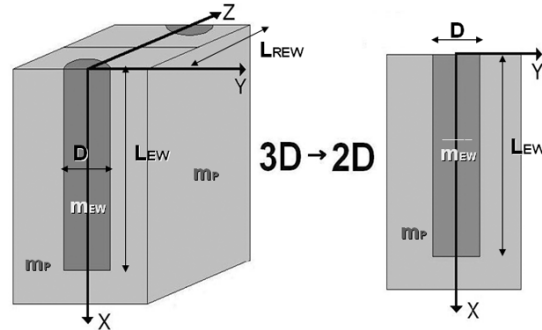
4.3. Parametry strefy kontaktowej

Na podstawie wyników z przeprowadzanych badań numerycznych dla analizowanych modeli płaskich, dobrą zbieżność wyników z porównywalnymi danymi pozyskanymi z badań *in situ* dało zamodelowanie parametrów pionowej strefy kontaktowej jako 2/3 wartości kąta tarcia wewnętrznego materiału o lepszych parametrach. Kąt tarcia wewnętrznego dla poziomych linii kontaktowych oddzielających sztywne elementy (nasypu lub fundamentu) przekazujące obciążenie zewnętrzne z budowli na pierwszą warstwę podłoża gruntowego, był przyjmowany do opisu linii kontaktowej jako 3/4 kąta tarcia wewnętrznego gruntu o większym kącie tarcia wewnętrznego.

4.4. Wyznaczenie cech modelu ekwiwalentnego (przejście 3D →2D)

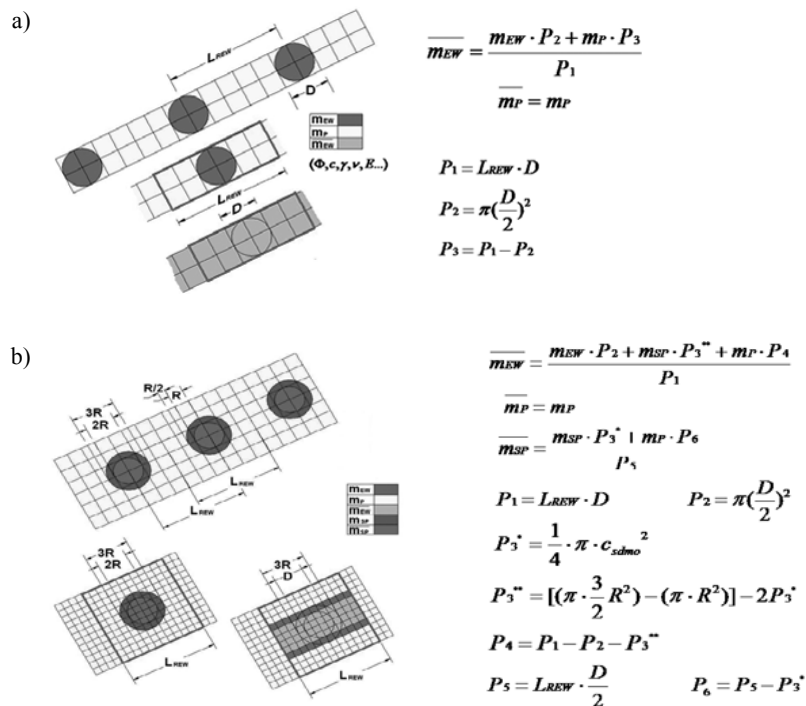
Przeprowadzone obliczenia i analizy były wykonywane dla modeli płaskich, dla których parametry wyodrębnionych warstw materiałowych odpowiednio przeskalowywano na reprezentatywną jednostkę długości, tak by odzwierciedlić redystrybucję sił wewnętrznych na element wzmacniający i jego otoczenie — co w efekcie stanowi zastępnik dla modelu przestrzennego w szczególności przy modelowaniu podłoża pod inżynierskimi obiektami liniowymi.

Procedurę przejścia z zagadnienia 3D na model 2D poprzez rozmycie parametrów wyodrębnionych stref materiałowych modelu przedstawiono na rysunku 2, gdzie: m_p — oznacza charakterystykę materiałową podłoża, m_{EW} — charakterystykę materiałową elementu wzmacniającego, natomiast \bar{m}_{EW} — oznacza zmodyfikowaną („rozmytą”) charakterystykę materiałową elementu wzmacniającego, D — jest to średnica elementu wzmacniającego, natomiast L_{EW} — to długość elementu wzmacniającego, a L_{REW} — to rozstaw elementów wzmacniających.



Rys. 2. Schemat przejścia z zagadnienia przestrzennego na model dwuwymiarowy

Charakterystyka materiałowa obiektu rzeczywistego (3D) $m(\Phi, c, \gamma, \nu, E, \dots)$ wyznaczana jest na podstawie badań *in situ* i badań laboratoryjnych, a następnie jest przeskalowywana w charakterystykę materiałową dla poszczególnych stref materiałowych przyjętego modelu (2D) $m(\Phi, c, \gamma, \nu, E, \dots)$ poprzez „rozmycie” parametrów na jednostkę długości, zgodnie z schematem przedstawionym na rysunku 3.



Rys. 3. Procedury „rozmycia” parametrów materiałowych na zasadzie wyznaczenia średniej ważonej w odniesieniu do wyznaczonej jednostki powierzchni

Oznaczenia przyjęte na rysunku 3 oznaczają odpowiednio: m_{SP} — charakterystyka materiałowa strefy przejściowej, \overline{m}_{SP} — zmodyfikowana („rozmyta”) charakterystyka materiałowa strefy przejściowej i c_{sdmo} — cięciwa koła o większym promieniu styczna do koła o mniejszym promieniu.

5. Wnioski końcowe

Przedstawiono w niniejszej pracy koncepcję opisu zachowania się ośrodka gruntowego wraz z elementami wzmacniającymi w ramach teorii plastyczności ciał niejednorodnych i strefowo zmiennych. Opisane tutaj wytyczne tworzenia prostych modeli numerycznych wzmocnionego podłoża gruntowego są wynikiem prowadzonych symulacji numerycznych, analiz i wstępnych weryfikacji wykonywanych w ramach prowadzonych badań. Wstępnie wyznaczony przedział dokładności otrzymanych wyników w obrębie badanego modelu będzie nadal analizowany i weryfikowany. Modelowanie wzmocnionego ośrodka gruntowego przy użyciu bardziej wyrafinowanych modeli jest jak najbardziej zalecane, jednakże celem jaki został postawiony na wstępie niniejszej pracy było przedstawienie koncepcji prostych modeli numerycznych, których zastosowanie pozwoli na przeprowadzenie potrzebnych symulacji i analiz w celu wyboru optymalnej metody i technologii wzmocnienia słabego gruntu z myślą o wykorzystywaniu tych modeli do szacowania kosztów wzmocnienia gruntu dla danej nieruchomości na etapie wykonywania operatu szacunkowego, a tym samym określenia wpływ kondycji gruntu na wartość rynkową analizowanej nieruchomości gruntowej. Zastosowanie i rozpowszechnienie takiej procedury postępowania przy zakupie nieruchomości komercyjnych lub nieruchomości gruntowych na cele publiczne, wykazuje celowość wykonywania dokładnych ekspertyz geotechnicznych podłoża gruntowego, a następnie opracowań zawierających zestawienia wyników przeprowadzonych symulacji numerycznych określających nośność ośrodka gruntowego przy założonych metodach wzmocnienia i w efekcie końcowym oszacowania wartości rynkowej nieruchomości gruntowej z uwzględnieniem wpływu parametrów geotechnicznych nieruchomości gruntowej na jej wartość — co przekłada się na ceny transakcyjne kupna — sprzedaży, czyli ma wymiar finansowy, który na pewno zostanie zauważony przez inwestorów.

LITERATURA

- [1] Boulon M., Nova R.: Modelling of soil — structure interface behavior a comparison between elastoplastic and rate type laws, *Computers and Geotechnics*, Vol. 9, 21–46, 1990
- [2] Gaszyński J., Gwóźdź M.: Deformation of soil layer reinforced by gravel columns and geosynthetic, *Proceeding of the 6th International Geotechnical Conference - New methods in geotechnical engineering*, Bratislava June 23–24, 2003, p. 223–228
- [3] Gaszyński J., Gwóźdź-Lasoń M.: Numerical models of reinforced soil, *Proceeding of the 16th ICSMGE International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Osaka, September 12–16, 2005
- [4] Gaszyński J., Gwóźdź-Lasoń M.: A numerical study of deformation and stress behavior of the subsoil reinforced by gravel columns, *Proceeding of the XIII Danube — European Conference on Geotechnical Engineering*, Slovenia, Ljubljana, May 29–31, 2006

- [5] *Gaszyński J., Gwóźdź-Lasoń M.*: Model Numeryczny Ośrodka Gruntowego z Palisadą Kolumn — XIV Krajowej KMGiG i III Ogólnopolskiej KMG, Białystok, 20–23.06.2006, T. 1, Zeszyt Naukowy Budownictwo, Vol. 28, 2006
- [6] *Gaszyński J., Gwóźdź-Lasoń M.*: FEM Analysis of Reinforced Subsoil Under Shopping Center — Proceeding of the XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid 2007
- [7] *Gaszyński J., Gwóźdź-Lasoń M.*: Analiza numeryczna wzmocnionego podłoża gruntowego pod Centrum Handlowym Sarni Stok w Bielsku-Białej, Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii, Geotechnika w Budownictwie i Górnictwie, Szklarska Poręba, 2007
- [8] *Gwóźdź-Lasoń M.*: Modele obliczeniowe podłoża gruntowego w aspekcie różnych metod i technologii wzmocnienia, Praca Doktorska, Politechnika Krakowska, 2007
- [9] *Gwóźdź-Lasoń M.*: Czynniki wpływających na wartość rynkową nieruchomości gruntowych o przeznaczeniu komercyjnym — Nieruchomości C.H. BECEK wrzesień 2006, Nr 09(97), 2007, 35–38
- [10] *Goughnour R.R.*: Research & Development, Vibroflotation Foundation Company, U.S.A. (1983) Settlement of vertically loaded stone columns in soft ground, Proceedings of The Eight European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering/ Helsinki, Vol. 1, 235–240
- [11] *Griffiths D.V.*: Numerical modeling of interfaces using conventional finite elements, Proceedings of the 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya, Balkema / Rotterdam / Boston, Vol. 2, 1985, 837–844
- [12] *Lewis R.W., Schrefler B.A.*: A finite element method in the deformation and consolidation of porous media. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Ltd. 1998
- [13] *Z_Soil.PC 2003, 2D User Manual*, ZACE Services Ltd., Lozanna, 1998