

Mieczysław KANIA, Antoni FLORKIEWICZ, Sławomir JANIŃSKI
Politechnika Poznańska

NUMERYCZNA SYMULACJA ZACHOWANIA SIĘ MODELU KOLUMNY KAMIENNEJ

Streszczenie. W referacie rozważane są modele interakcji w systemie 'kolumna kamienna-bardzo słaby grunt'. Artykuł przedstawia podejście do ustalania wielkości współczynnika wzmocnienia gruntu z wykorzystaniem metody elementów skończonych i koncepcji komórki jednostkowej. Wyniki obliczeń porównano z danymi uzyskanymi z badań doświadczalnych.

NUMERICAL SIMULATION OF STONE COLUMN MODEL BEHAVIOUR

Summary. In this contribution 'stone column – very soft soil' interaction models are considered. The paper outlines an approach to estimation of soil improvement factor by numerical simulation, based on unit cell concept and the finite element method. The results of calculations are compared with data obtained from experimental investigations.

1. Wprowadzenie

Wzmacnianie słabego podłoża gruntowego za pomocą pionowych elementów w postaci kolumn kamiennych, wykonywanych przy użyciu różnych technologii, od kilkadziesiąt lat znajduje coraz powszechnie zastosowanie w praktyce [1], [2]. Dążenie do doskonalenia inżynierskich sposobów obliczeń kolumn powoduje, że teoretyczne modele współpracy budowli z podłożem gruntowym wzmocnionym kolumnami kamiennymi nadal są przedmiotem intensywnych badań i analiz (np.[3], [4], [5], [6], [7]). Badania te realizowane są w różnych formach - jako doświadczenia fizyczne w małej skali, badania terenowe lub symulacje numeryczne.

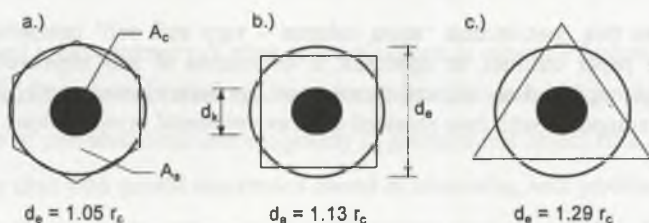
W niniejszej pracy omówiono rezultaty numerycznej symulacji zachowania się modelu kolumny żwirowej otoczonej homogenizowaną gytą, badanego w ramach eksperymentów

prowadzonych w skali półtechnicznej [7], [8]. Do modelowania numerycznego zastosowano metodę elementów skończonych (MES), wykorzystując oprogramowanie pakietu Z_SOIL PC [9], ukierunkowane na rozwiązywanie zadań z dziedziny geomechaniki.

Celem przedstawianych w referacie badań jest doświadczalna weryfikacja rozwiązań numerycznych MES w zakresie rozkładu obciążenia na kolumnę oraz otaczający ją słaby grunt.

2. Założenia ogólne

Analizę zachowania się słabego podłoża wzmocnionego kolumnami kamiennymi prowadzi się najczęściej dla pewnej powtarzalnej struktury, tzw. komórki jednostkowej o średnicy d_c , składającej się z pojedynczej kolumny o średnicy d_k i otaczającego ją gruntu (rys. 1). Średnicę d_c osiowo-symetrycznej, walcowej komórki jednostkowej wylicza się na podstawie rozstawu r_c kolumn w siatce, z geometrycznych zależności podanych na rysunku poniżej.



Rys. 1. Koncepcja komórki jednostkowej dla różnego rozmieszczenia kolumn (a – w siatce trójkątnej, b – kwadratowej, c – sześciokątnej)

Fig. 1. Unit cell concept for various stone column arrangements (a – triangular, b – square, c – hexagonal)

Podstawowe założenie w analizie komórki jednostkowej przyjmowane jest zwykle w postaci równania:

$$p_0 \cdot A = p_c \cdot A_c + p_s \cdot A_s, \quad (1)$$

gdzie:

p_0 – średni nacisk jednostkowy na powierzchnię komórki,

A – powierzchnia poziomego przekroju komórki jednostkowej, składająca się z: powierzchni kolumny A_c i powierzchni otaczającego ją gruntu A_s ; $A = A_c + A_s$,

p_c i p_s – obciążenia jednostkowe przypadające odpowiednio na kolumnę i otaczający ją grunt.

Równanie (1) można zapisać w równoważnej postaci:

$$\frac{p_0}{p_s} = 1 + (n-1)\alpha, \quad (2)$$

gdzie:

$n = p_c / p_s$ – współczynnik koncentracji obciążenia,

$\alpha = A_c / A$ – współczynnik wymiany.

Dla celów obliczeń projektowych wprowadza się również ([10], [11]) bezwymiarowy współczynnik wzmocnienia $\beta > 1.0$:

$$\beta = \frac{s_0}{s} = \frac{p_0}{p_s} \quad (3)$$

wyrażający stosunek osiadania s_0 podłoża bez wzmocnienia, do osiadania s podłoża ulepszonego kolumnami (co odpowiada także stosunkowi obciążeń jednostkowych p_0 i p_s).

Prowadzi to bezpośrednio do równania:

$$\beta(n, \alpha) = 1 + (n-1)\alpha \quad (4)$$

W praktyce współczynnik wzmocnienia β obliczany jest zwykle z formuły Priebego [11]:

$$\beta = 1 + \alpha * \left[\frac{0.5 + f_\alpha}{K_{ac} * f_\alpha} - 1 \right], \quad (5)$$

gdzie:

$$K_{ac} = \lg^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_c}{2} \right); \quad f(\nu_s, \alpha) = f_\alpha = \frac{1 - \nu_s^2}{1 - \nu_s - 2\nu_s^2} * \frac{(1 - 2\nu_s) * (1 - \alpha)}{1 - 2\nu_s + \alpha}$$

Zamiennie stosowany jest także współczynnik redukcji osiadań $R = (1/\beta) \leq 1.0$, będący odwrotnością współczynnika wzmocnienia [12]. Znajomość współczynnika β lub R jest bardzo ważna, pozwala bowiem ocenić wpływ projektowanego rozmieszczenia kolumn kamiennych (współczynnika wymiany α) na rozdział obciążenia zewnętrznego p_0 : na kolumnę (p_c) i otaczający ją grunt (p_s).

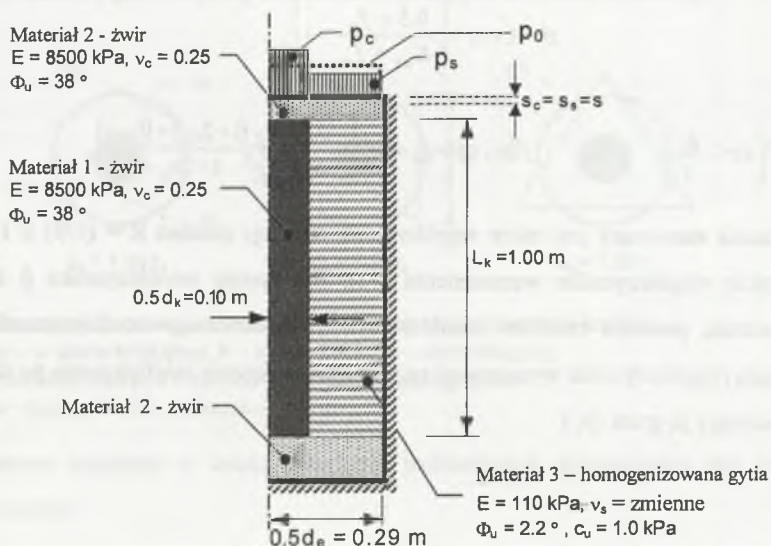
3. Opis modelu i eksperymentu numerycznego

W doświadczeniu fizycznym omówionym w pracy [7] badano zachowanie się cylindrycznej komórki jednostkowej. Charakterystyczne wymiary modelowanego układu pokazano na rysunku 2. Dla rozpatrywanego układu geometrycznego komórki jednostkowej współczynnik wymiany $\alpha = (d_k/d_c)^2$ wynosił 0.12.

Model komórki jednostkowej odwzorowano siatką 6179 elementów skończonych. Konstrukcja siatki dla zadania osiowo-symetrycznego, rozmieszczenie poszczególnych materiałów w siatce i warunki brzegowe odpowiadały warunkom realizacji badań eksperymentalnych [7, 8].

Przyjęto idealnie szorstki kontakt gruntu z dnem sztywnej konstrukcji pojemnika. Zastosowana w doświadczeniu technika eliminacji tarcia na kontakcie gruntu i sztywnych bocznych ścian pojemnika badawczego pozwoliła na uproszczenie modelu numerycznego i pominięcie elementów kontaktowych na bocznych brzegach pojemnika.

Układ obciążeniowy komórki jednostkowej stanowiły dwie płyty o dużej sztywności, przekazujące pionowe obciążenie na podścielającą je warstwę żwiru, odpowiednio nad głowicą kolumny (p_c) i nad otaczającą ją gytią (p_s). Obciążenie zadawano kinematycznie w postaci jednakowych przemieszczeń górnej powierzchni płyt. Przemieszczenia narastały liniowo - od wartości zerowej do maksymalnego przemieszczenia pionowego $s_c=s_s=0.02$ m, stosowanego w rozpatrywanym zadaniu badawczym.



Rys. 2. Charakterystyka geometryczna modelu komórki jednostkowej z kolumną żwirową

Fig. 2. Geometrical description of the unit cell model with a gravel column

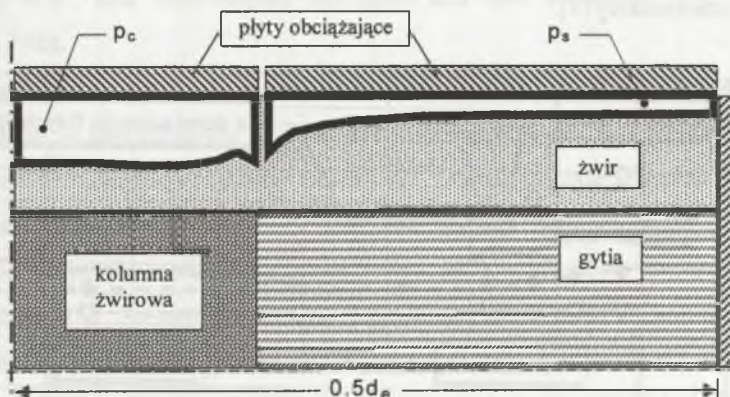
W zakresie odwzorowania właściwości materiałów w modelu MES przyjęto założenia korespondujące z warunkami realizacji eksperymentu fizycznego. Materiał płyt przekazujących

obciążenia opisano za pomocą modelu idealnie sprężystego. Ośrodek gruntowy w postaci górnej i dolnej warstwy żwiru, żwiru kolumny oraz otaczającej ją gytii opisany został z wykorzystaniem modelu sprężysto-plastycznego z warunkiem plastyczności Druckera-Pragera $F(\sigma)_{DP} = a_\phi * I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0$, oraz z kątem dylatacji $\psi=0^\circ$. Prezentowane w niniejszym opracowaniu obliczenia wykonano dla ośrodka nieważkiego.

Ustalone w [8] podstawowe parametry wytrzymałościowe materiałów, uwzględniane w obliczeniach MES, pokazano na rysunku 2. W eksperymencie numerycznym w kolejnych zestawach danych przyjęto różne wielkości współczynnika Poissona dla homogenizowanej gytii, równe odpowiednio $\nu_s = 0.3, 0.4, 0.45, 0.48, 0.485, 0.490, 0.495$.

4. Wyniki obliczeń

Jednym z wyników obliczeń MES były wielkości naprężeń na styku płyt obciążających i powierzchni ośrodka gruntowego, określające rozkład obciążeń na kolumnę oraz otaczający ją słaby grunt. Przykładowy rozkład obciążenia pionowego, dla współczynnika Poissona $\nu_s=0.45$ oraz przemieszczenia $s = 0.02$ m, pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Obliczony rozkład obciążeń pionowych na kolumnę żwirową i otaczający grunt
Fig. 3. Calculated vertical loads distribution on gravel column and surrounding soil

Obliczone metodą elementów skończonych rozkłady obciążeń były podstawą do ustalenia wielkości współczynnika wzmocnienia β , zgodnie ze wzorem (4). Współczynniki β dla wszystkich zestawów danych, określone przy maksymalnej wartości zadanych

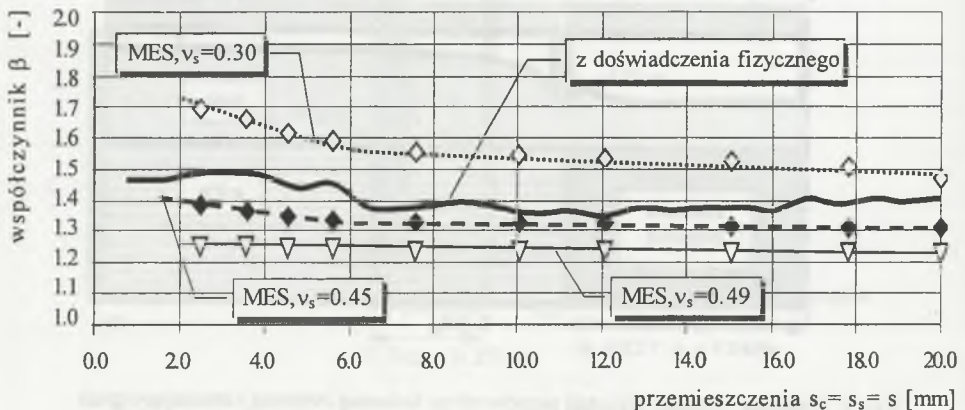
przeszyczeń pionowych $s = 0.02$ m, zamieszczono w tablicy 1. Dla porównania w tablicy podano także odpowiednie wielkości β obliczone według wzoru (5). Wielkość współczynnika wzmocnienia otrzymana z badań doświadczalnych dla $s = 0.02$ m wynosiła $\beta = 1.42$.

Tablica 1

Współczynnik wzmocnienia β dla różnych wielkości współczynnika Poissona gytii

	Numer zestawu danych						
	1	2	3	4	5	6	7
Współczynnik Poissona ν_s gytii	0.300	0.400	0.450	0.480	0.485	0.490	0.495
Współczynnik wzmocnienia β według obliczeń MES	1,47	1,38	1.31	1,26	1,25	1,24	1,20
Współczynnik wzmocnienia β według Priebego	1.60	1.51	1.50	1.472	1.468	1.463	1.458

Na rysunku 4 pokazano przebieg zmienności obliczonych w modelu MES współczynników wzmocnienia w funkcji przemieszczeń dla wybranych wielkości ν_s gytii. Na tym samym rysunku zamieszczono również wykres zmian wielkości β uzyskany z badań w skali półtechnicznej [8].

Rys. 4. Zależność współczynnika wzmocnienia β od zadanych przemieszczeńFig. 4. Relationship between applied displacements and β improvement factor

Z porównania wykresów na rysunku 4 wynika, że w całym przedziale zadawanych przemieszczeń najlepszą zgodność symulacji numerycznej i doświadczenia fizycznego

uzyskano dla współczynnika Poissona homogenizowanej gytii $\nu_s=0.45$. Dla pozostałych analizowanych wartości widoczna jest również dobra jakościowa zgodność przebiegu zależności $\beta = f(s)$.

5. Wnioski

Przeprowadzona weryfikacja sprężysto-plastycznego modelu MES, z warunkiem plastyczności Druckera-Pragera, dla geometrycznego schematu komórki jednostkowej, wykazała poprawność przyjętych założeń. W szczególności potwierdzono przydatność rozwiązania MES w poszukiwaniu ważnej w praktyce projektowania kolumn kamiennych informacji o wartości współczynnika wzmocnienia β . Wartości β określone według formuły Priebego, które nie zależą od przemieszczeń pionowych, w rozpatrywanym przypadku są wyższe od wartości uzyskanych doświadczalnie, a także z symulacji numerycznych MES.

LITERATURA

1. Van Impe W.F.: Soil improvement techniques and their evolution. A.A. Balkema, Rotterdam 1988.
2. Gryczmański M., Seifert J.: Zastosowania kolumn kamiennych wykonywanych metodą wibrowymiany w makroregionie śląskim. Mat. Ogólnopolskiego Sympozjum „Krajowe doświadczenia wzmocniania podłoża - Gdańsk'92”, Gdańsk 1992, sesja I, s. 57-64.
3. Gryczmański M.: Metody analizy i osiadania podłoża wzmocnionego kolumnami kamiennymi. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 5, 1993, s. 224-231.
4. Hu W., Wood D.M., Stewart W.: Ground improvement using stone column foundations: results of model tests. Proc. Int. Conf. on Ground Improvement, Macau 1997, s. 247-256.
5. Pieczyrak J.: Rzeczywiste parametry kolumn kamiennych ustalane metodą in situ. XLVI Konf. Nauk. KILiW PAN, t.3, Krynica 2000, s. 67-72.
6. Szypcio Z.: Bearing capacity of a single column. Studia Geotechnica et Mechanica, vol. XXII, nr 3-4, 2000, s. 55-53.
7. Florkiewicz A., Janiński S., Wojnicki J.Z.: Nośność graniczna kolumn kamiennych ustalona na drodze eksperymentalnej. XLVII Konf. Nauk. KILiW PAN, t.3, Krynica 2001, s. 195-202.

8. Raport z realizacji projektu badawczego KBN nr 7 T07E 007 15, „Doskonalenie metod wymiarowania kolumn kamiennych wzmacniających słabe podłoże gruntowe”. Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Ładowej, Poznań 2000.
9. Z_SOIL[®].PC v. 4.32, Lausanne, December 2000.
10. Priebe H.: Abschätzung des Setzungsverhaltens eines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes. Die Bautechnik, vol. 53, nr 5, 1976, s. 160-162.
11. Centre for Civil Engineering Research and Codes: Building on soft soils. CUR Report 162, A.A. Balkema, Rotterdam 1996.
12. Balaam N.P., Booker J.R.: Effect of stone column yield on settlement of rigid foundations in stabilized clay. Int. J. Num. Analyt. Methods Geomech., vol. 9, nr 4, 1985, s. 331-351.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Maciej GRYZMAŃSKI

Abstract

The improvement of weak soils by stone columns has now become a well-established method, but some questions concerning the theoretical approach and design, are still open. One of them is an evaluation of reasonable values of the soil improvement factor β , defined as the ratio of settlements of the unimproved ground and settlements of the soil reinforced by stone columns. The β factor is the main design parameter, which governs the behaviour and performance of the improved ground. In order to estimate values of the β factor, numerical analyses have been performed using axially symmetrical, elasto-plastic solutions of the finite element method and the unit cell idea. In numerical simulations values of Poisson's ratio of the soft soil ranged from 0.3 to 0.495. Loads distribution between the soft soil and the stone column has been analysed and the relationship between applied displacements and β factor was obtained. The accuracy of the method was verified by experimental investigations in semi-technical scale. Comparisons between the findings of numerical study and the results from model tests exhibit reasonable agreement. An analysis of data presented in the paper indicates that β improvement factor values calculated according to Priebe's formula are overestimated, when compared with results of the finite element simulation and model tests.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego Politechniki Poznańskiej TB-12-930/03-DS, finansowanego przez KBN.