

Sławomir KWIECIEN*
Politechnika Śląska

PRÓBNE OBCIĄŻENIE WBIJANEJ KOLUMNY KAMIENNEJ. ANALIZA NUMERYCZNA UKŁADU: KOLUMNA - SŁABE PODŁOŻE

Streszczenie. W artykule przedstawiono stanowisko do próbnych obciążeń wbijanej kolumny kamiennej w warunkach polowych. Wyniki badań w postaci krzywej „obciążenie-osiadanie”, uzupełnione inwentaryzacją kolumny po próbnym obciążeniu, stanowiły podstawę do poszukiwania parametrów układu: kolumna-słabe metody analizy wstecznej.

FIELD LOAD TEST OF STONE COLUMN. NUMERICAL ANALYSIS OF STONE COLUMN – WEAK SOIL SYSTEM

Summary. The paper presents a field test station for load plate test of rammed stone column. Results in form of „load – settlement” curve and inventory after load plate test were basis of search “stone column – weak soil” parameters in back analysis.

1. Wstęp

Kolumny kamienne formowane metodą wymiany dynamicznej stosowane są głównie do wzmocnienia podłoża w postaci gruntów spoistych i/lub organicznych o kilkumetrowej miąższości. Takie wzmocnienie powoduje wzrost nośności, zmniejszenie osiadań oraz przyspiesza proces konsolidacji słabego gruntu.

Badania nad nośnością tak formowanych kolumn w warunkach polowych są dość skąpe. Najczęściej sprowadzają się one do badań odbiorczych w postaci próbnych obciążeń kolumn naciskiem o wartościach równych lub niewiele większych od obciążeń rzeczywistych. Realizowane jest to w postaci balastów statycznych, dających jednostkowy nacisk do ok. 200 - 300 kPa [2]. Dla zbadania zachowania się kolumny pod wpływem obciążenia zakres ten jest

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Jerzy Sękowski, prof. w Politechnice Śląskiej.

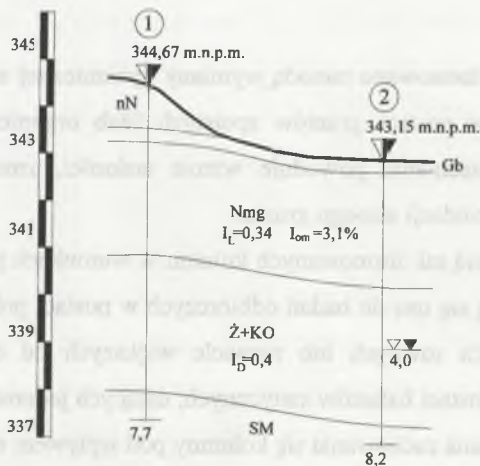
zbyt mały. Silnie zagęszczone kolumny kamienne wykazują o wiele większą nośność. Stąd też skonstruowano stanowisko badawcze, umożliwiające obciążenie w większym zakresie, w którym to siła uzyskiwana jest siłownikami hydraulicznymi, zapartymi o stalowe belki zakotwione do pali.

Wyniki badań w postaci krzywej „obciążenie – osiadanie”, uzupełnione o inwentaryzację kolumny po przeprowadzonym próbnym obciążeniu, stanowiły podstawę analizy MES układu „kolumna – słabe podłoże”. Takie podejście prezentowane było już w pracy [4], na podstawie wyników badań laboratoryjnych. Prawidłowe określenie geometrii obciążonej próbnie kolumny pozwoliło na uzyskanie dużej zbieżności krzywej numerycznej z krzywą rzeczywistą.

2. Próbne obciążenie kolumny kamiennej formowanej metodą wymiany dynamicznej

2.1. Poletko badawcze

Poletko badawcze zlokalizowane było na budowie obwodnicy miejscowości Lubień koło Myślenic. Podłoże w wierzchniej warstwie budowały utwory czwartorzędowe w postaci namulów o miąższości dochodzącej do kilku metrów, podścielone warstwą żwirów. Poniżej występowały warstwy skał miękkich, w postaci piaskowców i łupków. Przekrój geotechniczny w otoczeniu kolumny pokazano na rys. 1.

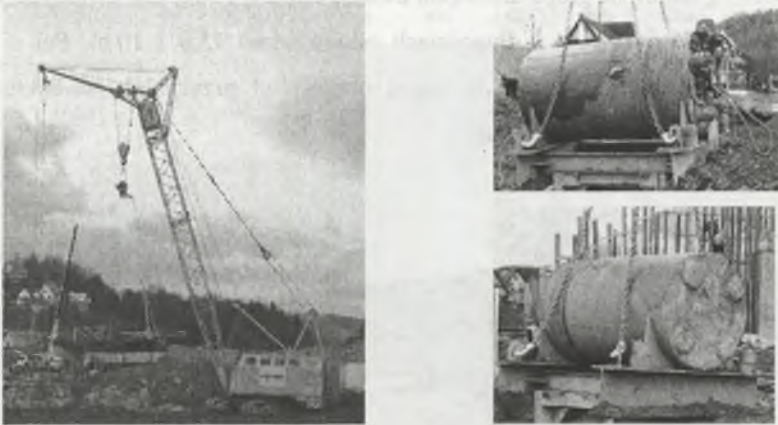


Rys. 1. Przekrój geotechniczny w otoczeniu kolumny

Fig. 1. Subsoil condition of investigation site

2.2. Formowanie kolumny kamiennej

Pracujący na poletku badawczym sprzęt firmy Keller Polska (rys. 2) umożliwił zrzut z wysokości 13,5 m ubijaka w kształcie stożka ściętego o średnicach dolnej 1 m i górnej 1,2 m, wysokości 1,8 m i masie 11,5 t.



Rys. 2. Sprzęt do formowania kolumn metodą wymiany dynamicznej (Keller Polska)
Fig. 2. Facility of dynamic replacement process (Keller Polska)

Kolumny wykonane zostały z przekruszu skalnego o frakcji 0/400, z leżącego nieopodal kamieniołomu, w siatce trójkąta równobocznego o boku 3 m.

Badana kolumna uformowana została przez 16-krotny swobodny zrzut ubijaka. Ilość materiału potrzebnego na uformowanie kolumny wyniosła $13,65\text{m}^3$. Przy założeniu, że jej przewidywana długość wynosi ok. 2,7 m (miąższość namułu) oczekiwana średnica mogła wynieść ok. 2,5 m.

2.3. Konstrukcja stanowiska badawczego

Dobór elementów konstrukcyjnych stanowiska (belka oporowa, pale kotwiące) zaprojektowano, tak aby umożliwiły uzyskanie sił koniecznych do utraty stateczności wykonanej kolumny. Nośność kolumny określona została z warunku Braunsa [1]. W głównej mierze nośność ta jest uzależniona od kąta tarcia wewnętrznego materiału kolumny - Φ oraz spójności bez drenażu gruntu słabego - c_u . Na podstawie badań połową sondą obrotową ustalono, że spójność c_u namułu mieści się w przedziale od 25-30 kPa. W przypadku materiału kamiennego kąt Φ przyjęto z przedziału od 35 do 45°.

Dla takich założeń otrzymano nośność kolumny kamiennej w przedziale $p_k = 803 \div 963 \text{ kPa}$. Ze względów technicznych próbne obciążenie głowicy kolumny

realizowano przy użyciu płyty stalowej o średnicy $D=1,2$ m. Stąd otrzymano, że $Q_k = 908 + 1090$ kN (gdzie $Q_k = p_k \cdot A$, A-pole powierzchni płyty obciążającej).

Dostępne środki ekonomiczne pozwoliły na zaprojektowanie stanowiska badawczego, przenoszącego siłę równą 1,5-krotnej przewidywanej nośności ($Q_k = 1650$ kN).

Belkę oporową stanowiła grupa dziesięciu dwuteowników I 500, zakotwionych w gruncie palami o średnicy 75 i 150 cm i długościach odpowiednio 15,8 i 10 m. Pał o większej średnicy był jednym z grupy pali, na której oparty był przyczółek wiaduktu. Widok stanowiska badawczego pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Widok stanowiska do próbnych obciążeń kolumny kamiennej

Fig. 3. Model station of load plate test of stone column

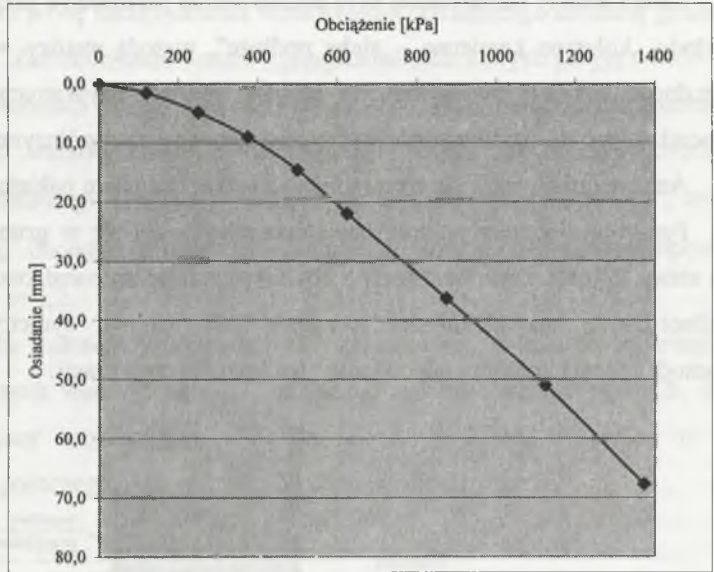
2.4. Próbné obciążenie i inwentaryzacja kolumny

Próbne obciążenie kolumny przeprowadzono metodą stałych stopni obciążenia. Do poziomu 625 kPa stopień ten wynosił 125 kPa, a powyżej 250 kPa. Każdy stopień utrzymywany był tak długo, aż prędkość osiadania kolumny wyniosła co najwyżej 0,05 mm/15 minut. Obciążenia realizowane były za pomocą trzech siłowników hydraulicznych o zakresie 0-1300 kN. Pomiar osiadań umożliwiły trzy elektroniczne czujniki o zakresie 0-100 mm i dokładności odczytu 0,01 mm. Obciążenie końcowe wyniosło $q = 1373$ kPa, co stanowiło wartość równą ok. 1,5-krotnej wartości teoretycznej nośności kolumny.

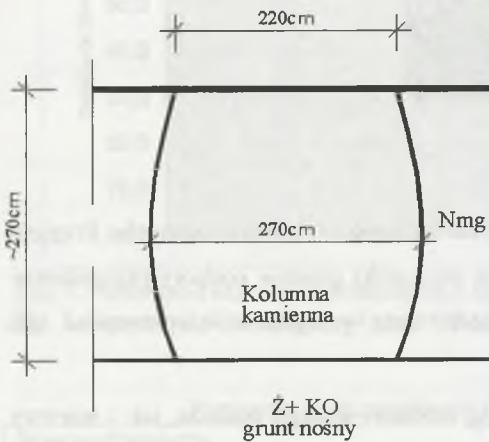
Wyniki próbnych obciążeń przedstawiono na rys. 4.

Odkrywka kolumny wykonana po badaniu potwierdziła wcześniejsze przypuszczenia o jej dużej średnicy. Przy średnicy ubijaka 1,2 m wykonana kolumna miała szerokość od 2,2 - 2,7 m (rys. 5).

Obciążenie [kPa]	Osiadanie [mm]
0	0
120	1,58
251	4,87
375	9,04
500	14,62
625	21,99
874	36,35
1123	50,98
1373	67,71



Rys. 4. Wyniki próbnego obciążenia kolumny kamiennej
 Fig. 4. Results of load plate test of stone column



Rys. 5. Wyniki inwentaryzacji kolumny kamiennej
 Fig. 5. Results of inventory of stone column

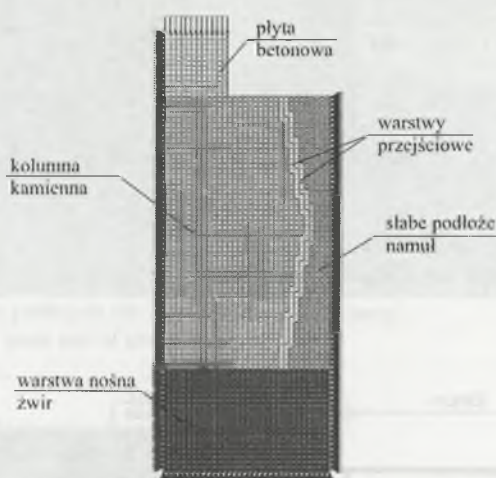
3. Analiza numeryczna układu „kolumna – słabe podłoże”

3.1. Opis przyjętego modelu badawczego i wyniki analizy

Celem analizy numerycznej było poszukiwanie parametrów przyjętego modelu gruntu dla układu „kolumna kamienna – słabe podłoże”, metodą analizy wstecznej. Jako kryterium zgodności krzywej numerycznej z krzywą osiadań, uzyskanych na podstawie próbnych obciążeń (rys. 4), użyto wartość tzw. zmodyfikowanego współczynnika determinacji R^2 .

Analizę numeryczną przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu obliczeniowego Z-Soil.

Ponieważ kolumna próbnie obciążana znajdowała się w grupie kolumn rozstawionych w siatce trójkąta równobocznego o boku 3 m, całość sprowadzono do zagadnienia komórki jednostkowej, zamodelowanej następnie jako osiowo symetryczna (rys. 6). Kształt zamodelowanej kolumny odpowiadał wynikom inwentaryzacji.



Rys. 6. Geometria modelu MES

Fig. 6. Geometry of FEM model

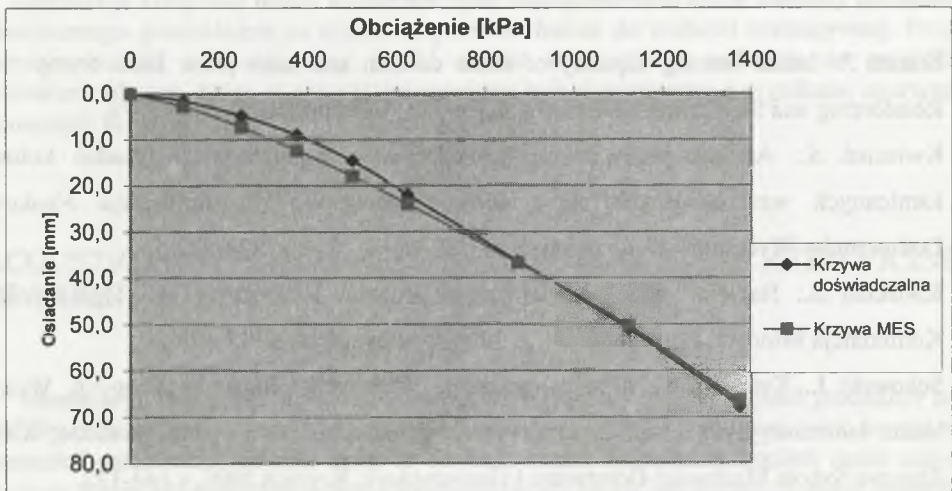
Całość podzielono na 2480 czterowęzłowych elementów czworobocznych. Przyjęto standardowe warunki brzegowe, jak dla zagadnień mechaniki gruntów podpory przegubowo-przesuwne wzdłuż pionowych krawędzi komórki oraz przegubowo-nieprzesuwne dla krawędzi poziomej.

Do opisu materiału kolumny i otaczającego ją zarówno słabego podłoża, jak i warstwy podścielającej użyto zmodyfikowanego modelu Coulomba – Mohra, zawierającego pięć parametrów: moduł odkształcenia E , współczynnik Poissonsa ν , kąt tarcia wewnętrznego ϕ , spójność c oraz kąt dylatacji ψ . W modelu tym powierzchnia plastyczności w przekroju

dewiatorowym przechodzi przez punkty załamania sześciokąta równobocznego nierównokątnego (model Coulomba–Mohra), ale ma charakter krzywej gładkiej. W zagadnieniu zastosowano niestwarzyszone prawo pływnięcia.

Bazując na doświadczeniach laboratoryjnych i numerycznych, przedstawionych w pracach [3] i [4], podjęto próbę uwzględnienia wzmocnienia otaczającego kolumnę gruntu, na skutek jej formowania. Założono dwie warstwy przejściowe, dla których przyjęto liniową zmianę parametrów o wartościach równych 1/3 i 2/3 różnicy pomiędzy parametrami kolumny a słabym podłożem. Dla warstwy żwiru, podścielającego podłoże słabe przyjęto stałe parametry modelu obliczeniowego (jak dla $I_D=0,5$), w postaci: $E=140$ MPa, $\phi=38,5^\circ$, $c=1$, $\nu=0,25$. Płytę betonową, obciążającą kolumnę, zamodelowano jako liniowo-sprężystą o parametrach $E=27$ GPa, $\nu=0,2$.

Dla tak postawionych założeń przeprowadzono kilkadziesiąt symulacji, zmieniając kolejno parametry przyjętych warstw. Na rys. 7 pokazano krzywą numeryczną MES, dla której uzyskano największy współczynnik determinacji $R^2 = 0,997$. W tabelicy nr 1 przedstawiono parametry poszczególnych warstw, uzyskane analizą wsteczną.



Rys. 7. Porównanie krzywej doświadczalnej z krzywą MES

Fig. 7. Comparing of numerical and empirical curves

Tabela 1

Parametry poszczególnych warstw uzyskane analizą wsteczną

Warstwa/Parametry	E [MPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ν	ψ [°]
Kolumna	80	40,5	10	0,3	15
Warstwa przejściowa nr 1 (bliżej kolumny)	53	28	18	0,3	10
Warstwa przejściowa nr 2 (bliżej namułu)	27	15	26	0,3	5
Namuł	1,5	3	35	0,3	0

4. Uwagi końcowe

Uzyskana na podstawie próbnych obciążeń krzywa „obciążenie – osiadanie” stała się podstawą do poszukiwań parametrów przyjętego modelu gruntu, dla układu „kolumna kamienna – słabe podłoże”.

Przeprowadzona analiza numeryczna wykazała bardzo wysoką zgodność krzywych empirycznej i numerycznej. Badanie MES poprzedzone zostało dokładną inwentaryzacją, której celem było uchwycenie kształtu kolumny i jej głównych parametrów geometrycznych, takich jak średnica i jej zmiana wzdłuż długości. Dodatkowo, w analizie ujęto wpływ wzmocnienia słabego podłoża otaczającego kolumnę (na skutek jej wbicia), przez wprowadzenie warstw przejściowych. Interesującym byłoby skonfrontowanie uzyskanych parametrów modelu z wartościami parametrów geotechnicznych, uzyskanych w badaniach polowych i laboratoryjnych. Stanowi to przedmiot aktualnych zainteresowań autora.

LITERATURA

1. Brauns J.: Initial bearing capacity of stone column and sand piles. Proc. Symp. Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practise, Sydney 1978.
2. Kwiecień S.: Analiza porównawcza obliczonych i pomierzonych osiadań kolumn kamiennych wzmacniających słabe podłoże gruntowe, V Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, z. 102, Wisła 2004, s. 273-282.
3. Kwiecień S.: Badania modelowe wbijanych kolumn kamiennych. III Ogólnopolska Konferencja Młodych Geotechników, z. 29, Augustów 2006, s.117-126.
4. Sękowski J., Kwiecień S.: Próbne obciążenia wbijanych kolumn kamiennych. Wyniki badań laboratoryjnych i analiza numeryczna układu: kolumna - słabe podłoże, XXIX Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu i Geoinżynierii, Krynica 2006, s.163-172.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zenon Szypcio