

Sławomir KWIECIEN*
Politechnika Śląska

ANALIZA PORÓWNAWCZA OBLICZONYCH I POMIERZONYCH OSIADAŃ KOLUMN KAMIENNYCH WZMACNIAJĄCYCH SŁABE PODŁOŻE GRUNTOWE

Streszczenie. W pracy porównano wyniki obliczonych i pomierzonych osiadań trzech kolumn kamiennych wzmacniających słabe podłoże gruntowe pod zrealizowanymi obiektami inżynierskimi. Osiadania kolumn oszacowano metodami wykorzystującymi koncepcję komórki jednostkowej (metody wg: Priebe, Balaam i Booker oraz Van Impe - Madhav). Odniesieniem dla obliczeń porównawczych i wynikających stąd wniosków były wyniki próbnych obciążeń kolumn w warunkach in situ.

COMPARISON OF CALCULATED AND MEASURED SETTLEMENTS IN WEAK SOIL REINFORCED WITH STONE COLUMN

Summary. Settlements of three stone columns reinforcing a weak subgrade under constructed engineering structures have been calculated and compared with the measured values. The settlements have been evaluated by three methods utilizing the concept of a unit cell (Priebe, Baalam and Booker, as well as Van Impe – Madhav methods). The results of trial loads performed on-site make the background for the theoretical considerations and following conclusions.

1. Wstęp

Coraz częściej inżynier budowlany staje przed problemem posadowienia obiektów budowlanych i inżynierskich na gruntach słabych i silnie odkształcalnych. Sytuacja taka występuje między innymi wówczas, gdy w podłożu pojawiają się grunty spoiste w stanie od plastycznego po płynny lub grunty organiczne, charakterystyczne np. dla starorzeczy cieków wodnych oraz rejonów podmokłych i bagiennych.

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Jerzy Sękowski

Obecnie istnieje wiele metod wzmacniania słabego podłoża gruntowego [2]. Jedną z nich są kolumny kamienne, wykonywane metodą udarową. Takie wzmacnianie podłoża powoduje nie tylko wzrost jego nośności, ale również redukcję osiadań oraz przyspiesza konsolidację słabego gruntu [3], [11]. Ponadto takie zalety, jak: ekonomiczność, szybkość i prostota wykonania spowodowały, że wzmacnianie podłoża za pomocą kolumn kamiennych doczekało się licznych realizacji w praktyce [3].

Przy projektowaniu posadowienia obiektów na podłożu wzmocnionym kolumnami kamiennymi zmuszeni jesteśmy do rozważenia stanów granicznych nośności oraz użytkowania. Stosowane obecnie metody obliczeń obu stanów granicznych szeroko zaprezentowane zostały w pracy [4]. Odniesiono je do kolumn wykonywanych techniką wibrowymiany. Nasuwa się jednak pytanie, na ile metody te są słuszne w przypadku kolumn formowanych w gruncie z wykorzystaniem udarów o wysokiej energii.

W referacie skupiono się na stanie granicznym użytkowania podłoża wzmocnionego wbijanymi kolumnami kamiennymi. Dokonano analizy porównawczej osiadań takich kolumn, określonych wybranymi metodami obliczeniowymi z wartościami uzyskanymi z próbnych obciążeń. Podstawą analizy porównawczej były trzy zrealizowane przykłady z praktyki inżynierskiej.

2. Obliczanie osiadań podłoża wzmocnionego kolumnami kamiennymi z wykorzystaniem koncepcji komórki jednostkowej

2.1. Uwagi ogólne

Zgodnie z [4] koncepcje modelowania podłoża z regularną siatką kolumn, na potrzeby przewidywania ostatecznych osiadań, możemy podzielić na dwie grupy. Charakterystyczne dla nich są:

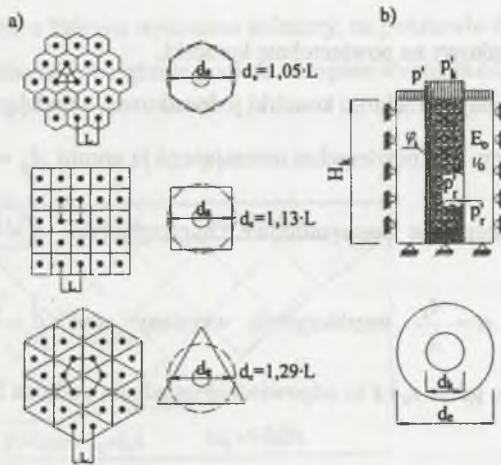
- redukcja obszaru analizy do tzw. komórki jednostkowej,
- homogenizacja kompozytu „grunt - kolumny”.

W referacie, na potrzeby analizy porównawczej, wykorzystane zostaną trzy najczęściej stosowane w obliczeniach projektowych metody określania osiadań podłoża wzmocnionego kolumnami kamiennymi. Wszystkie z nich bazują na założeniach koncepcji komórki jednostkowej.

2.2. Komórka jednostkowa

Przy projektowaniu kolumn kamiennych mamy do wyboru trzy możliwe regularne siatki rozstawu kolumn: sześcioboczną, kwadratową oraz trójkątną (rys. 1a). Każdą z siatek możemy podzielić na jednostkowe obszary wpływu poszczególnych kolumn. Są to odpowiednio obszary: sześcioboczny, kwadratowy oraz trójkątny (rys. 1a).

Jeżeli nacisk na wzmocnione podłoże jest równomierny, całość możemy rozpatrywać jako zbiór niezależnych graniastosłupowych komórek. Dla wygodniejszego prowadzenia obliczeń figury podobszarów zastępujemy okręgami o tej samej powierzchni (rys. 1a), sprowadzając analizę osiadania do zagadnienia osiowo symetrycznego równowagi walcowej komórki jednostkowej, współosiowej z kolumną (rys. 1b).



Rys. 1. Konstrukcja komórki jednostkowej

- a) typowe siatki i odpowiadające im podobszary wpływu oraz ekwiwalentna średnica,
- b) przekrój osiowy komórki

Fig. 1. Construction of a unit cell

- a) typical grids and corresponding domains of each column influence and equivalent diameter
- b) axial intersection of a unit cell

Zgodnie z [4] współczesne metody, rozwinięte w ramach koncepcji komórki jednostkowej, opierają się na następujących założeniach (rys. 1b):

- podłoże otaczające kolumnę tworzy skończoną rurę grubościenną z materiału sprężystego, izotropowego, jednorodnego i nieważkiego, o powierzchniach doskonale gładkich,

- górny brzeg i wewnętrzna powierzchnia boczna rury poddane są odpowiednio: pionowemu naciskowi p' z fundamentu i poziomemu oddziaływaniu kolumny p_r' ,
- dolny brzeg i zewnętrzna powierzchnia boczna rury są podparte przegubowo przesuwnie,
- kolumna obciążona pionowym naciskiem p_k' z budowli i poziomym oddziaływaniem otaczającego podłoża p_r' podlega całkowitemu lub częściowemu uplastycznieniu, z reguły bez zmiany objętości,
- osiadania kolumny s_k oraz otaczającego podłoża s są identyczne i nie zmieniają się w planie komórki.

Dla tak określonych założeń, zgodnie z [7] równanie wyjściowe ma postać:

$$p_o A_e = p_k' A_k + p_r' A_g, \quad (1)$$

gdzie:

p_o - średni nacisk jednostkowy na powierzchnię komórki,

A_e - powierzchnia poziomego przekroju komórki jednostkowej, składająca się z:

powierzchni kolumny A_k i powierzchni otaczającego ją gruntu $A_g = A_e - A_k$.

Ponadto, definiuje się następujące bezwymiarowe charakterystyki: $n = \frac{p_k'}{p}$ współczynnik

koncentracji obciążenia, $\alpha = \frac{A_k}{A_e}$ współczynnik wymiany oraz $\beta = \frac{s_o}{s}$ współczynnik

efektywności wzmocnienia, gdzie s_o i s to odpowiednio osiadania podłoża bez wzmocnienia i podłoża wzmocnionego.

W związku z tym równanie (1) możemy zapisać w następującej postaci:

$$\beta = 1 + (n-1)\alpha, \quad (2)$$

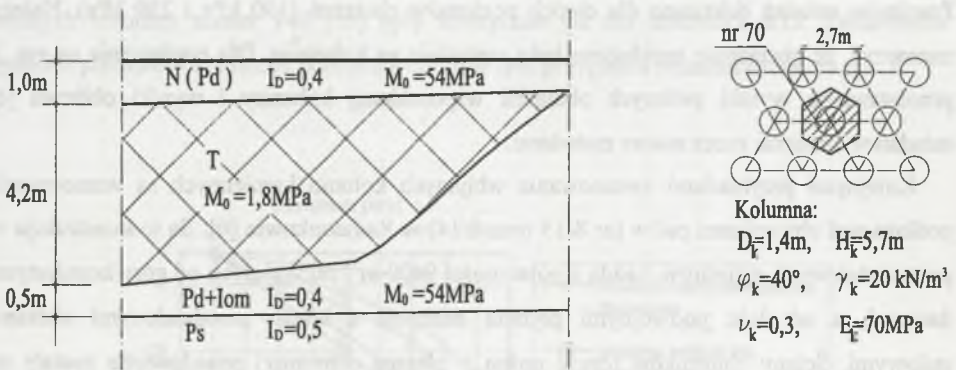
Jak widać, do określenia efektywności wzmocnienia gruntu kolumnami wystarczy znajomość współczynnika β . W literaturze przedmiotu znanych jest szereg metod obliczeniowych, wykorzystujących koncepcję komórki jednostkowej do określania osiadania podłoża wzmocnionego kolumnami. Na potrzeby obliczeń w prezentowanej pracy wykorzystano trzy spośród nich, najczęściej stosowane w praktyce projektowej. Są to: metoda wg Priebe [4], [9], Balaam i Booker [1], [4] oraz metoda wg Van Impe – Madhav [14].

3. Analiza porównawcza osiadań podłoża gruntowego wzmocnionego kolumnami kamiennymi

Pierwszy z przykładów poddanych analizie obejmował wzmocnienie słabej strefy podłoża pod nasypem, który wraz z estakadą łączy dwie główne arterie miasta Zabrze [5]. Warstwę wymagającą stabilizacji kolumnami kamiennymi stanowiło przypowierzchniowe wyklinowanie torfu i podścielającego go piasku drobnego z domieszką części organicznych o łącznej miąższości 4,7 m. Warstwę nośną planowanych kolumn tworzyły średnio zagęszczone piaski średnie. Kolumny wykonywane były z powierzchni nasypu o wysokości 1 m (rys. 2), wykonanego dla umożliwienia pracy sprzętu ciężkiego.

Parametry słabego podłoża ustalone zostały na podstawie dokumentacji geotechnicznej, a parametry materiału, z którego wykonano kolumny, na podstawie literatury [8], [10].

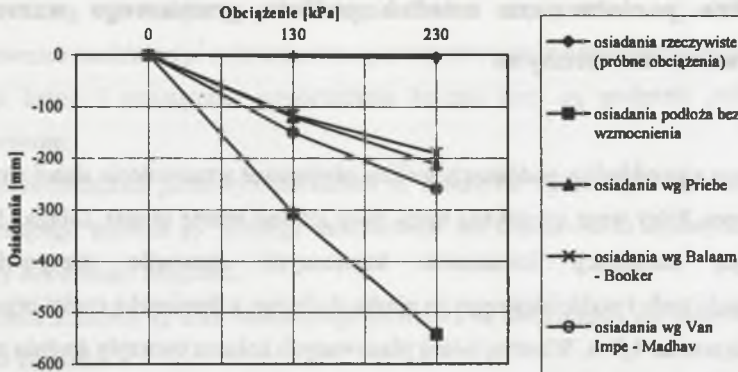
Spodziewana wartość obciążenia podłoża nasypem wynosiła ok. 140 kPa.



Rys. 2. Parametry wyjściowe do obliczeń dla kolumny nr 70

Fig. 2. Output parameters to calculations for column No 70

Łącznie wykonano 79 kolumn kamiennych z przepalonego łupka przywęglowego o średnicy zastępczej ziarn od 30 do 200 mm. Kolumny o długościach od 4 do 5,5 m utworzyły siatkę trójkątów równobocznych o boku 2,7 m (rys. 2). W celu wyrównania rozkładu odporu podłoża wykonany został na powierzchni głowic kolumn sztywny materac z geowłókniny i dwóch warstw geosiatki, pomiędzy którymi zastosowano wspomniany wcześniej przepalony łupek przywęglowy.



Rys.3. Wykres osiadań – kolumna nr 70
 Fig. 3. Diagram of settlement – column No 70

Z próbných obciążení jednej z kolumn (nr 70) [5], realizowanych przy użyciu stosu płyt stalowych o średnicy podstawy 1,2 m, uzyskano osiadania nie przekraczające 6 mm. Pomiarów osiadań dokonano dla dwóch poziomów obciążení (130 kPa i 230 kPa). Należy zaznaczyć, że obciążenie przyłożone było centralnie na kolumnie. Dla porównania na rys. 3 przedstawiono wyniki próbných obciążení wspomnianej kolumny i wyniki obliczeń jej osiadań wybranymi przez autora metodami.

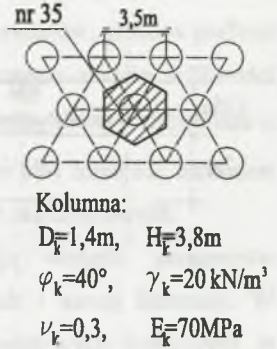
Kolejnymi przykładami zastosowania wbijanych kolumn kamienných są wzmocnienia podłoża pod zbiornikami paliw (nr 8/13 oraz 8/14) w Radzionkowie [6]. Są to konstrukcje w postaci stalowych cylindrów, każda o pojemności 9400 m³, zamkniętych od góry kopulastymi dachami, a od dołu podwójnymi płytami dennymi z blach, przedzielonymi siatkami stalowymi. Ściany zbiorników (część nośna + płaszcz ochronny) posadowione zostały na dwóch fundamentach pierścieniowych.

Parametry poszczególných warstw geotechnicznych dla zbiornika 8/13 pokazano na rys.4.

Wykonano łącznie 94 kolumny kamienne z przepalonego łupka przywęglowego. Kolumny o długościach ok. 4 m utworzyły siatkę trójkątów równobocznych o boku 3,5 m. Na podstawie próbných obciążení [12] realizowanych w czterech stopniach (34,51; 71,52; 113,03 i 213,03 kPa) uzyskano osiadania nie przekraczające 8 mm (rys. 5). Podobnie jak w przypadku poprzedniego przykładu na rys. 5 przedstawiono osiadania tej kolumny, określone metodami wykorzystującymi koncepcję komórek jednostkowych.

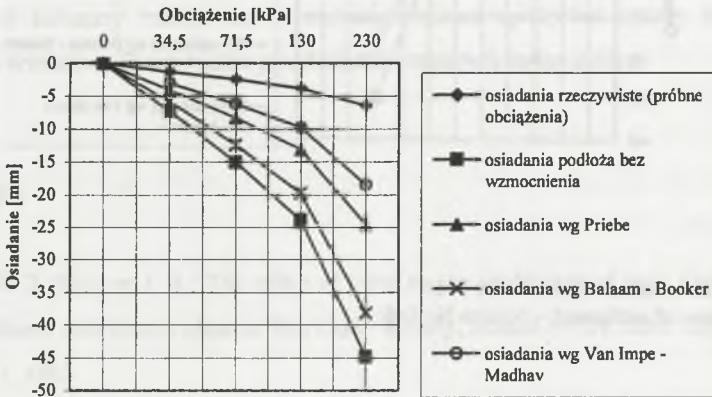
Profil podłoża gruntowego dla drugiego ze zbiorników (8/14) przedstawiono na rys. 6.

1,3m	NN (żużel+kamienie+gruz ceglany)		$M_0=10\text{MPa}$
1,1m	Ps (H)	$I_D=0,44$	$M_0=56\text{MPa}$
0,6m	$G\pi$	$I_L=0,16$	$M_0=28\text{MPa}$
0,3m	Ps	$I_D=0,40$	$M_0=35\text{MPa}$
0,5m	$G\pi$	$I_L=0,38$	$M_0=16\text{MPa}$
	$I\pi$	$I_L=0,07$	$M_0=30\text{MPa}$

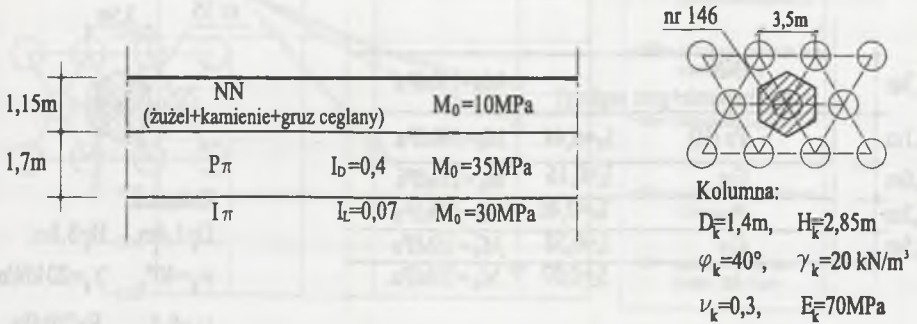


Rys. 4. Parametry wyjściowe do obliczeń dla kolumny nr 35
 Fig. 4. Output parameters to calculations for column No 35

Liczba kolumn, materiał, z którego zostały one wykonane, oraz sposób realizacji obciążeń próbnych kolumny numer 146 [13] były identyczne jak dla zbiornika 8/13. Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń porównawczych w tym przypadku przedstawiono na rys. 7.

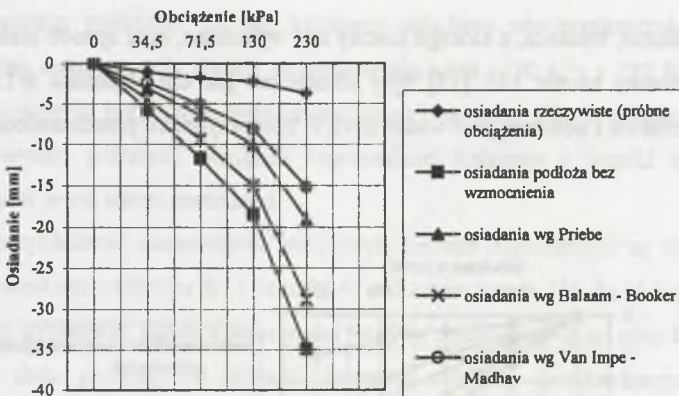


Rys. 5. Wykres osiadań – kolumna nr 35
 Fig. 5. Diagram of settlement – column No 35



Rys. 6. Parametry wyjściowe do obliczeń dla kolumny nr 146

Fig. 6. Output parameters to calculations for column No 146



Rys. 7. Wykres osiadań – kolumna nr 146

Fig. 7. Diagram of settlement – column No 146

4. Uwagi końcowe

W prezentowanym referacie podjęto próbę porównania osiadań kolumn kamiennych, wzmocniających słabe podłoże gruntowe, otrzymanych z badań z wielkościami wyznaczonymi wybranymi metodami obliczeniowymi.

Osiadania obliczane metodami bazującymi na założeniach komórki jednostkowej różnią się od osiadań uzyskanych z próbnych obciążeń. Największa różnica pomiędzy wartościami obliczonymi a wartością pomierzoną wystąpiła w pierwszym z przykładów, gdzie w podłożu gruntowym dominował torf o miąższości $h=4,2$ m i edometrycznym module ścisłości $M_o = 1,8$ MPa. W pozostałych przykładach, gdzie podłoże budowały utwory słabonośne o nieco wyższych niż torf, lecz przybliżonych parametrach, różnice te były mniejsze, natomiast większa rozbieżność miała miejsce w odniesieniu do samych metod obliczeniowych.

Podstawowe znaczenie dla prowadzonych obliczeń mają wartości parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych zarówno podłoża, jak i samej kolumny. W przypadku podłoża do wyznaczania wartości parametrów materiałowych budujących je gruntów (zwłaszcza gruntów słabonośnych) ze wszech miar uzasadnione jest szersze zastosowanie badań niestandardowych (dylatometr, ścinarka obrotowa, sondy statyczne, próbne obciążenie).

Równie istotnym problemem pozostaje, zdaniem autora, adekwatność stosowanych w analizie obliczeniowej metod określania osiadań podłoża wzmocnionego kolumnami w stosunku do kolumn realizowanych metodą wbijania. Nadmienimy, że metody obliczeniowe opracowano dla kolumn wykonywanych metodą wibroflotacji, w której kolumna ma kształt cylindryczny. Kolumny realizowane poprzez wbijanie mają kształt najprawdopodobniej inny. Tak więc w różnych założeniach poszczególnych metod obliczeniowych, a także odmienności geometrycznej kolumny realizowanych metodą wbijania upatrywać należy rozbieżności otrzymanych wyników. To też będzie przedmiotem kolejnych badań autora.

LITERATURA

1. Balaam N. P., Booker J. R.: The effect of yield on the settlement of rigid foundations on clay stabilized with stone columns. The Univ. Sydney, School of Civ. Min. Eng. Res. Rep. No R. 461, 1983.
2. Gryczmański M.: Współczesne kierunki rozwoju geotechniki w Polsce. Inżynieria i Budownictwo, 8, 1994, 339-347.
3. Gryczmański M.: Wzmacnianie podłoża wbijanymi kolumnami kamiennymi. Przegląd doświadczeń śląskich. Inżynieria i Budownictwo, 3, 2003, 123-126.

4. Gryczmański M.: Metody analizy nośności i osiadania podłoża wzmocnionego kolumnami kamiennymi. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 5, 1993, 224-231.
5. Gryczmański M.: Wzmocnienie podłoża nasypu drogowego w rejonie podpory nr 8 kolumnami kamiennymi wykonanymi metodą wymiany dynamicznej. Dokumentacja powykonawcza, Gliwice 2002.
6. Gryczmański M.: Fundamenty pierścieniowe i wzmocnienie podłoża gruntowego kolumnami kamiennymi wykonanymi metodą wymiany dynamicznej. Projekt wykonawczy, Gliwice 2002.
7. Kania M., Florkiewicz A., Janiński S.: Numeryczna symulacja zachowania się modelu kolumny kamiennej. XIII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Gliwice – Szczyrk 2003, s. Budownictwo, z. 97, 83-90.
8. Pisarczyk S.: Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2004.
9. Priebe H.: Abschätzung des Setzungsverhaltes eines durch Stopfverrichtung verbesserten Baugrundes. *Die Bautechnik*, Vol. 53, 5, 1976.
10. Skarżyńska M.: Odpady powęglowe i ich zastosowanie w inżynierii lądowej i wodnej. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Kraków 1997.
11. Steckiewicz R., Szybcio Z.: Nośność graniczna kolumn kamiennych. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3, 1996, 241-243.
12. Sternik K.: Wyniki statycznego próbnego obciążenia kolumny kamiennej nr 35 oraz prób dynamicznych kolumn nr 40, 65, 71 pod zbiornikiem 8/13. Materiały niepublikowane, Gliwice 2002.
13. Sternik K.: Wyniki statycznego próbnego obciążenia kolumny kamiennej nr 146 oraz prób dynamicznych kolumn nr 101, 133, 159 pod zbiornikiem 8/14. Materiały niepublikowane, Gliwice 2002.
14. Van Impe W. F., Madhav M. R.: Analysis and settlement of dilating stone column reinforced soil. *Osterreichische Ingenieur und Architekten Zeitschrift*, 3, 1992, 114-121.

Recenzent: Dr hab. inż. Zenon Szypcio