

ŚLAWOMIR KWIECIEŃ\*, ŁUKASZ ZIELONKA\*

ANALIZA OBLICZENIOWA OSIADAŃ PODŁOŻA  
WZMOCNIONEGO METODĄ WYMIANY DYNAMICZNEJ  
POD NASYPEM AUTOSTRADOWYM

ANALYSIS OF SETTLEMENT OF GROUND IMPROVED  
BY DYNAMIC REPLACEMENT METHOD UNDER  
MOTORWAY EMBANKMENT

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki szacowania osiadań podłoża wzmocnionego wbijanymi kolumnami kamiennymi pod nasypem autostradowym, czterema najczęściej stosowanymi podejściami analitycznymi i numerycznymi. Wyniki te porównano z osiadaniem rzeczywistymi podłoża pod nasypem, ustalonymi geodezyjnie.

*Słowa kluczowe: wymiana dynamiczna, kolumny kamienne, analiza numeryczna*

Abstract

The results of numerical and analytical analysis of settlement of ground improved by dynamic replacement method were presented and compared with real settlement measured under motorway embankment.

*Keywords: dynamic replacement, stone column, numerical analysis*

\* Dr inż. Sławomir Kwiecień, mgr inż. Łukasz Zielonka, Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska.

## 1. Wstęp

Rozwój infrastruktury drogowej powoduje wkraczanie inwestycji na grunty o małej nośności i dużej odkształcalności. Dla takich warunków problematyczne jest bezpieczne posadowienie wysokich nasypów drogowych w sposób bezpośredni, bez dodatkowych zabiegów w podłożu. Z pomocą przychodzi wiele metod geoinżynierii [6], wśród nich często stosowana wymiana dynamiczna, w praktyce określana jako wbijane kolumny kamienne.

Ze względu na brak normatywnych podejść projektowych wymiarowanie tak wzmocnionego podłoża może sprawiać pewne trudności. Projektant ma do dyspozycji wiele artykułów naukowych dotyczących szacowania nośności [2, 3, 9] i odkształcalności podłoża [1, 7, 10] wzmocnionego kolumnami kamiennymi. Ze względu na ich założenia są one jednak dedykowane metodzie wibrowymiany. Z drugiej strony, w projektowaniu z powodzeniem wykorzystywane są obliczenia z użyciem metody elementów skończonych [5].

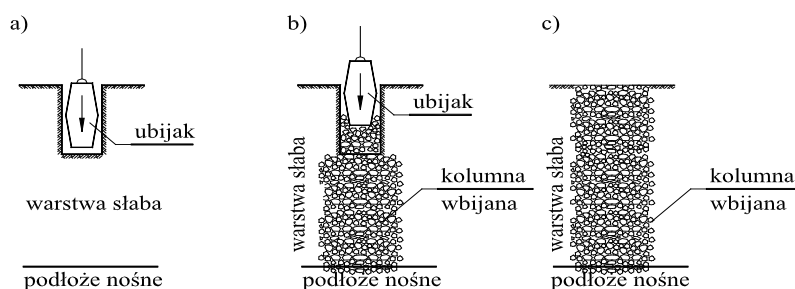
Zastosowanie analitycznych i numerycznych metod szacowania osiadań podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną narzuca pewne pytanie. Na ile wyniki stosowanych metod bliskie są rzeczywistości i jakie różnice występują między poszczególnymi metodami.

W prezentowanym artykule przedstawione zostaną wyniki szacowania osiadań podłoża wzmocnionego wbijanymi kolumnami kamiennymi pod nasypem autostradowym, czterema, najczęściej stosowanymi podejściami analitycznymi i numerycznymi. Wyniki te porównane zostaną z osiadaniami rzeczywistymi podłoża pod nasypem, ustalonymi geodezyjnie. Wspomniana analiza poprzedzona zostanie krótką informacją na temat wymiany dynamicznej.

## 2. Wbijane kolumny kamienne formowane metodą wymiany dynamicznej

W metodzie wymiany dynamicznej proces formowania kolumn kamiennych w gruncie słabym odbywa się z wykorzystywaniem sprzętu umożliwiającego swobodny zrzut ubijaka o dużej masie z określonej wysokości.

Jako pierwszy, przez zrzut ubijaka, wykonywany jest krater (rys. 1a), do którego wysypuje się grubookruchowy materiał. Jest on następnie ubijany (rys. 1b) do chwili, gdy nie zostanie wprowadzony w otaczający grunt. Do ponownie pustego krateru wysypuje się materiał i sytuacja powtarza się (rys. 1b). Kolumnę wykonuje się do momentu wystąpienia wyraźnego



Rys. 1. Proces formowania wbijanej kolumny kamiennej

Fig. 1. Process of a stone column draving

oporu przeciw wbijaniu. Może to oznaczać jej dojście do warstwy o większej sztywności (rys. 1c) lub ograniczenie zagłębiania kolumny ze względu na stosowaną energię uderzenia (kolumna zawieszona).

Obecnie stosowany sprzęt krajowy umożliwia zrzut ubijaka o masie 10–12 t z wysokości od 10 do 25 m.

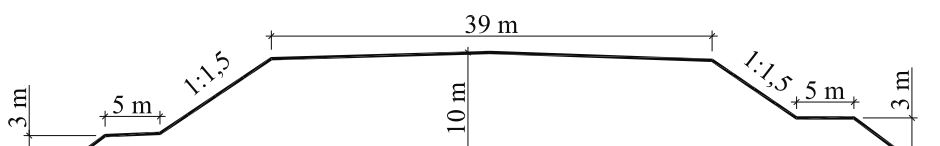
Łączna liczba uderzeń potrzebna do uformowania kolumny waha się w przedziale 15–30. W wyniku wbijania uzyskiwane są kolumny o zróżnicowanych kształtach i średnicach, a ich geometria zależy od podatności gruntu, zastosowanej energii oraz kształtu ubijaka. Po wzmocnieniu parametry fizyczne i mechaniczne gruntu słabego ulegają polepszeniu [4].

### 3. Analiza obliczeniowa osiadań podłoża wzmocnionego pod nasypem drogowym

#### 3.1. Geometria nasypu i warunki gruntowe

Analiza obliczeniowa dotyczyła nasypu budowanego w ramach, realizowanego obecnie, jednego z odcinków autostrady.

Rozważany nasyp (rys. 2), na odcinku o długości 80 m, miał wysokość ok. 10 m, szerokość w koronie i w podstawie odpowiednio 39 m i 74 m. Dla poprawy stateczności projekt przewidywał dwie ławki boczne o szerokości 5 m, wykonane 3 m powyżej podstawy nasypu. Nachylenie skarp wynosiło 1:1,5.



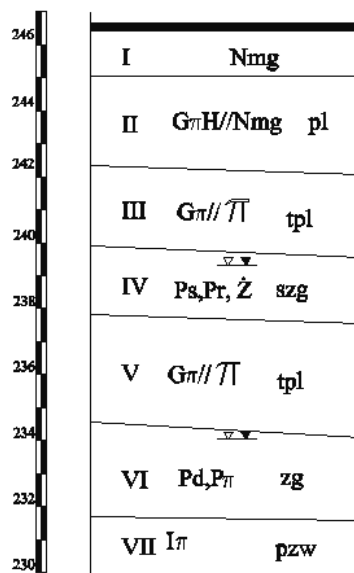
Rys. 2. Geometria rozważanego nasypu

Fig. 2. Geometry of considered embankment

Nasyp na całej wysokości formowany był w technologii gruntu stabilizowanego wapnem.

Warunki geotechniczne pod przewidywanym nasypem szczegółowo określone zostały za pomocą sondowań statycznych CPTU i badań dylatometrycznych DMT, wykonanych do głębokości 16 m p.p.t. (poniżej poziomu terenu). Szkic przekroju geotechnicznego w przekroju poprzecznym nasypu przedstawiono na rys. 3.

Parametry geotechniczne podłoża określone wspomnianymi badaniami przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 3. Przekrój geotechniczny pod nasypem

Fig 3. Geotechnical conditions under the embankment

Tabela 1

## Parametry geotechniczne podłoża gruntowego

Warstwa geotechniczna	Litologia	Stan gruntu	Kąt tarcia wewnętrznego $\phi_u$ [°]	Spójność $c_u$ [kPa]	Moduł odkształcenia [MPa]
I	Nmg	pl	10	8	8
II	Gπ/Nmg	pl	12	15	6
III	Gπ//π	tpl	20	16	16
IV	Ps, Pr, Ż	szg	32	–	50
V	Gπ//π	tpl	18	20	35
VI	Pd, Pπ	szg	28	1	75
VII	Iπ	pzw	15	40	20

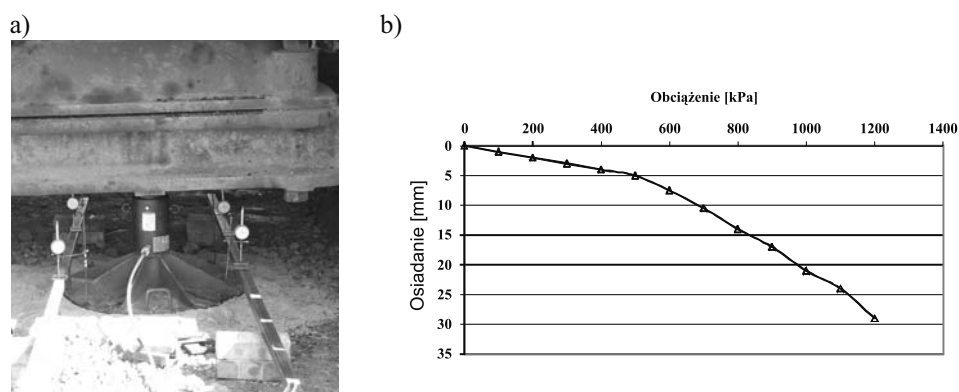
Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypowierzchniowej warstwie podłoża (0–4,5 m) występują grunty organiczne i mineralne o małej nośności i dużej odkształcalności – plastyczne namuły gliniaste (Nmg) oraz plastyczne gliny pyłaste (Gπ). Poniżej wspomnianych warstw podłoże budują grunty nośne, spójne w stanie od półzwarłego do twar doplastycznego i niespoiste średnio zagęszczone.

### 3.2. Wzmocnienie podłoża metodą wymiany dynamicznej

Ze względu na rodzaj, stan oraz miąższość warstw słabych projektant podjął decyzję o wzmocnieniu podłoża metodą wymiany dynamicznej. Projekt przewidywał, że pod głównym korpusem nasypu wykonane zostaną kolumny kamienne o średnicy ok. 1,8 m i długości do 5 m, w siatce trójkąta równobocznego o boku 3 m. Kolumny formowane były z przepalonego łupka przywęglowego o frakcji 30/120.

Przed wykonaniem wzmocnienia na całym odcinku wykonano poletko badawcze, na którym wykonano kilkanaście kolumn, trzy z nich odkopując i inwentaryzując. Z przeprowadzonych odkrywek wynikało, że wykonane kolumny kamienne posiadają stałą średnicę równą ok. 2 m i długości ok. 4,5 m.

W ramach poletka badawczego przeprowadzono również próbne obciążenie jednej z wykonanych kolumn (rys. 4).



Rys. 4. Próbné obciążenie kolumny kamiennej: a) widok stanowiska, b) wyniki badania

Fig. 4. Load plate test of stone column: a) station view, b) results of test

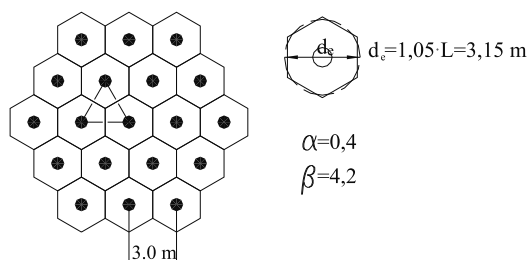
Obciążenia realizowane były za pomocą siłownika hydraulicznego, a pomiar osiadań umożliwiły cztery czujniki zegarowe o dokładności odczytu 0.01 mm (rys. 4a). Wyniki badania przedstawiono na rys. 4b.

Przeprowadzone badania, wykonane w szerokim zakresie nacisków (0-1200 kPa), stanowiły podstawę doboru parametru sztywności kolumny kamiennej w obliczeniach numerycznych.

### 3.3. Założenia obliczeniowe

W obliczeniach przeanalizowano cztery najczęściej stosowane podejścia szacowania osiadań podłoża wzmocnionego metodą wymiany dynamicznej.

Pierwszy wariant obejmował obliczenia analityczne wzmocnienia metodą Priebe'go [7]. Jest to metoda bazująca na koncepcji komórki jednostkowej, w której podłożo pod obiektami rozległymi w planie (rys. 5) i równomiernie obciążonymi sprowadza się do równowagi pojedynczej kolumny otoczonej słabym gruntem (podział na obszary wpływu poszczególnych kolumn).



Rys. 5. Założenia i wyniki metody Priebe'go

Fig. 5. Assumptions and results of Priebe method

Średnicę komórki jednostkowej ustala się na podstawie rozstawu kolumn i przyjętej siatki wzmocnienia. Dla przyjętego w obliczeniach współczynnika wymiany gruntu  $\alpha$  (procentowa zawartość kolumny w komórce jednostkowej) uzyskiwany jest współczynnik efektywności wzmocnienia  $\beta$ , redukujący proporcjonalnie osiadania podłoża niewzmocnionego (obliczone w pracy analitycznie metodą odkształceń jednoosiowych).

Trzy pozostałe warianty obliczeniowe obejmowały szacowanie osiadań podłoża metodą elementów skończonych. W analizach wykorzystano program Z\_Soil w wersji 10.18. W obliczeniach zasymulowano etapy budowy nasypu w płaskim stanie odkształcenia.

Wszystkie materiały zasymulowano przy użyciu modelu sprężysto-idealnie plastycznego z powierzchnią Coulomba-Mohra. Parametry poszczególnych warstw geotechnicznych podłoża przyjęto na podstawie badań CPTU i DMT, zgodnie z tabelą 1. Parametry kolumn kamiennych i formowanego nasypu przedstawiono w tabeli 2.

Parametry nasypu przyjęto na podstawie doświadczeń zdobytych podczas badań nad gruntem spoistym stabilizowanym wapnem [8]. W przypadku kolumn kamiennych moduł sprężystości  $E$  uzyskano na podstawie przeprowadzonych na poletku badawczym próbnych obciążeń kolumn (rys. 4b), natomiast kąt tarcia wewnętrzznego i spójność kolumn przyjęto na podstawie badań przeprowadzonych w pracy [4].

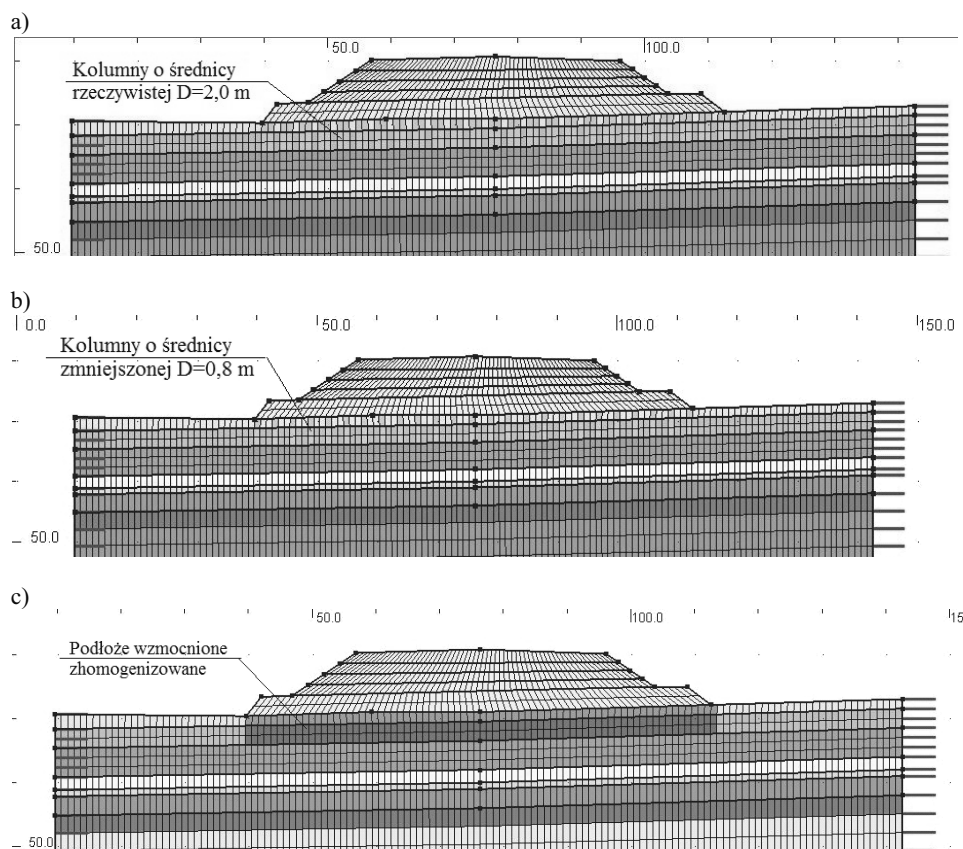
Tabela 2

#### Parametry przyjęte w obliczeniach numerycznych

Warstwa	Kąt tarcia wewnętrznego $\phi_u$ [°]	Spójność $c_u$ [kPa]	Moduł sprężystości, [MPa]	Współczynnik Poissona
Nasyp	35	40	60	0,3
Kolumny kamienne	40	5	80	0,3

W pierwszej kolejności kolumny (na rysunku 6 jako zielone słupki) wzmocniają podłoże zamodelowano jako elementy o średnicy rzeczywistej kolumn równej 2 m (rys. 6a). W podejściu tym jednak nie uwzględnia się, że w kierunku podłużnym nasypu kolumny wykonane są w pewnych rozstawach, a w obliczeniach przyjmowane są one jako nieskończenie długie „mury” z kruszywa. Dlatego też w drugim wariantcie numerycznym zmniejszono średnice kolumn (rys. 6b), aby uwzględnić większą podatność podłoża wzmocnionego

w kierunku podłużnym. Parametrem zmniejszającym proporcjonalnie średnicę kolumn był współczynnik wymiany podłoża  $\alpha = 0,4$  (procentowa zawartość kolumn we wzmocnionym podłożu). W ostatnim podejściu podłoże wzmocnione zamodelowano jako jedną warstwę (rys. 6c), homogenizując parametry kolumn i słabego otoczenia, również proporcjonalnie do współczynnika wymiany  $\alpha = 0,4$ .



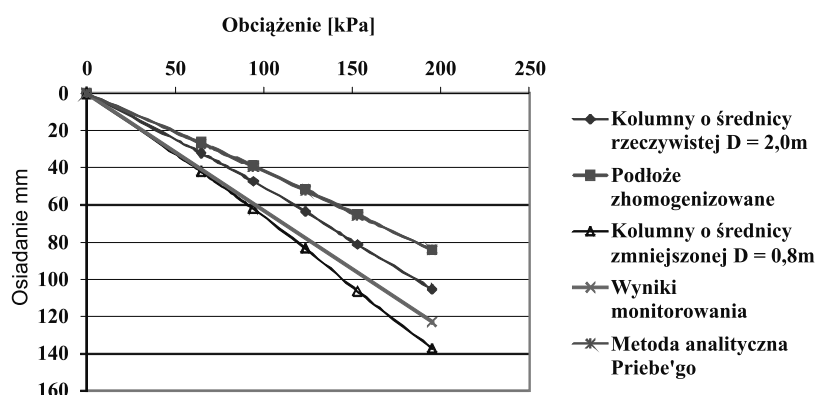
Rys. 6. Modele numeryczne

Fig. 6. Numerical models

Modelowany obszar gruntu podzielono na ponad 2000 elementów czworobocznych, czterowęzłowych. Miąższość podłoża pod nasypem ograniczono do strefy aktywnej, dla której spełniony jest warunek, że naprężenia dodatkowe  $\sigma_{zd}$  są mniejsze od 50% naprężeń pierwotnych  $\sigma_{zp}$  ( $\sigma_{zd} < 0,5 \sigma_{zp}$ ).

### 3.4. Wyniki obliczeń

Na rysunku 7 przedstawiono uzyskane wyniki obliczeń wraz z pomierzonymi geodezyjnie osiadaniami rzeczywistymi podłoża pod nasypem.



Rys. 7. Porównanie wyników uzyskanych osiadań

Fig. 7. Comparison of obtained results

W przypadku obliczeń analitycznych uzyskane osiadania końcowe wyniosły ponad 80 mm. Dla obliczeń numerycznych, przeprowadzonych w płaskim stanie odkształcenia, w zależności od sposobu zamodelowania warstwy wzmocnionej, wyniki osiadań mieściły się w przedziale od 84 mm do 137 mm. Osiadania uzyskane metodą Priebe'go praktycznie pokryły się z osiadaniami podłoża zhomogenizowanego. Największe osiadania uzyskano dla podłoża wzmocnionego zamodelowanego w postaci jednej warstwy zhomogenizowanej, największe natomiast przy przyjęciu kolumn o średnicy zredukowanej. Te ostatnie były również najbliższe osiadaniam rzeczywistym, które nieznacznie przekroczyły 120 mm.

## 5. Wnioski

Przeprowadzone analizy szacowania osiadań podłoża wzmocnionego metodą wymiany dynamicznej, pod nasypem autostradowym, wykazały, że w zależności od przyjętej metodyki obliczeń uzyskiwane są zróżnicowane wyniki – do 63%. Najmniejsze osiadania końcowe ( $s = 84$  mm) podłoża uzyskano, stosując analityczną metodę Priebe'go [7] oraz przyjmując w obliczeniach numerycznych parametry gruntu metodą homogenizacji. Większe osiadania ( $s = 105$  mm) obliczono, modelując wzmocnienie podłoża kolumnami o średnicy rzeczywistej. Największe z kolei osiadania ( $s = 137$  mm) obliczono numerycznie, modelując podłoże wzmocnione kolumnami o zmniejszonej średnicy i wyniki te usytuowały się najbliżej rzeczywistym osiadaniam końcowym podłoża, po wybudowaniu nasypu, które wyniosły 122 mm.

Wykonane analizy numeryczne prowadzone były w układach płaskich oraz przy przyjęciu parametrów wytrzymałościowo-odkształceniowych podłoża słabego, nie uwzględniając ich zmiany na skutek formowania kolumn. Będzie to przedmiotem dalszych badań autorów.



## Literatura

- [1] Balaam N.P., Booker J.R., *Analysis of rigid rafts supported by granular piles*, Research report R339, 1979, The University of Sydney, School of Civil Engineering.
- [2] Brauns J., *Initial bearing capacity of stone column and sand piles*, Proc. Symp. „Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practise”, Sydney 1978.
- [3] Hughes J.M.O., Withers N.J., *Reinforcing of soft cohesive soils with stone column*, Ground Engineering, Vol. 7, No. 3, 1974, 42-49.
- [4] Kwiecień S., *Analiza teoretyczna i doświadczalna wzmocnienia podłoża metodą wymiany dynamicznej*, Praca doktorska, Gliwice 2008.
- [5] Mestat Ph., Magnan J.P., Dhouib A., *Results of the settlement prediction exercise of an embankment founded on soil improved by stone columns*, Numerical Methods in Geotechnical Engineering, London 2006, 471-476.
- [6] Pisarczyk S., *Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [7] Priebe H., *Abschätzung des Setzungsverhaltes eines durch Stopfverriichtung verbesserten Baugrundes*, Die Bautechnik 1976, Vol. 53, No. 5.
- [8] Sękowski J., Kwiecień S., Cierpiół D., *Grunty spoiste stabilizowane wapnem. Zastosowanie do budowy wysokich nasypów autostradowych*, Magazyn Autostrady, 5, 2010, 44-46.
- [9] Szypcio Z., *Bearing capacity of single column*, Studia Geotechnica et Mechanica 2000, Vol. 22, 3-4, 41-54.
- [10] Van Impe W.F., Madhav M.R., *Analysis and settlement of dilating stone column reinforced soil*, Osterreichische Ingenieur und Architekten Zeitschrift 1992, 3, 114-121.