

SŁAWOMIR KWIECIEŃ*

ANALIZA NUMERYCZNA WYKALIBROWANEGO UKŁADU WBIJANA KOLUMNA KAMIENNA–SŁABY GRUNT

NUMERICAL ANALYSIS OF CALIBRATED DRIVEN STONE COLUMN–WEAK SOIL SYSTEM

Streszczenie

W artykule zamieszczono wyniki próbnych obciążeń wbijanej kolumny kamiennej, które posłużyły do wykalibrowania zaproponowanego modelu numerycznego. Kalibracja odbyła się na drodze analizy półwstecznej. W dalszej części przeprowadzono analizę wrażliwości modelu na przyjęty kształt kolumny oraz analizę adekwatności stosowania istniejących metod analitycznych szacowania osiadań kolumn.

Słowa kluczowe: próbne obciążenia, wymiana dynamiczna, kolumny kamienne, analiza numeryczna

Abstract

The results of driven stone column load plate test are presented. They were used to the calibration of numerical model. The calibration has proceeded on way of half-reverse analysis. Calibrated model was used for analysis of sensitivity of model on accepted shape of column and analysis of the adequacies of existing settlement analytical methods.

Keywords: trial loads, dynamic replacement, stone column, numerical analysis

* Dr inż. Sławomir Kwiecień, Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska.

1. Wstęp

Projektowanie obiektów budowlanych i inżynierskich na gruntach słabych wymaga posadowienia pośredniego bądź wzmocnienia podłoża. Jedną z metod geoinżynierii jest wymiana dynamiczna, określana w literaturze również jako wbijane kolumny kamienne. Metoda ta polega na formowaniu w podłożu silnie zagęszczonych kolumn z kruszywa, zwykle o frakcji 0/350, udarami o dużej energii. W wyniku tego zwiększamy nośność i sztywność podłoża gruntowego.

Projektowanie podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną wymaga spełnienia warunków stanu granicznego nośności (I SGN) oraz stanu granicznego użyteczności (II SGU). Ze względu na brak uregulowań normowych autorzy wzmocnień korzystają z literatury naukowej dotyczącej nośności [1, 6] i sztywności kolumn [5, 7] oraz stosują analizy numeryczne.

Stosowanie istniejących analitycznych metod obliczeniowych budzi jednak pewne wątpliwości ze względu na przyjęte w nich założenia, np. stały cylindryczny kształt kolumn. Wątpliwości te związane są ze specyfiką wymiany dynamicznej.

W artykule przedstawiono kalibrację zaproponowanego modelu numerycznego podłoża wzmocnionego wbijanymi kolumnami kamiennymi. W dalszej części pozwolił on na określenie wpływu geometrii kolumny na uzyskane wyniki oraz na sprawdzenie adekwatności wybranych metod analitycznych szacowania osiadań kolumn.

2. Próbné obciążenie kolumny kamiennej i kalibracja komórki jednostkowej

Próbné obciążenie [2, 3] kolumny kamiennej przeprowadzono w ramach realizacji wzmocnienia słabego podłoża na trasie S1, popularnie zwanej Zakopianką. Wzmocnienie wykonywane było w namulach o miąższości do 3 m, z przekruszu skalnego o frakcji 0/400. Stanowisko do próbných obciążeń (fot. 1) zaprojektowano na obciążenie siłą równą półtorakrotnej przewidywanej nośności, ustalonej metodą Braunsa [1]. Próbné obciążenie kolumny przeprowadzono metodą stałych stopni obciążenia. Każdy stopień utrzymywany był tak długo, aż prędkość osiadania kolumny wyniosła co najwyżej 0,05 mm/15 minut. Obciążenia realizowano za pomocą trzech siłowników hydraulicznych. Pomiar osiadań umożliwiły trzy elektroniczne czujniki. Obciążenie końcowe wyniosło $q = 1373$ kPa.

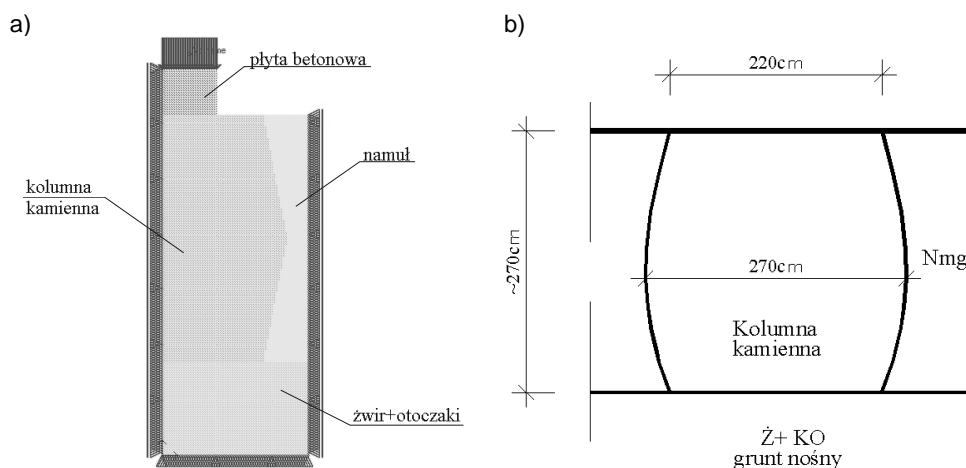
Wyniki próbnego obciążenia były podstawą kalibracji układu kolumna kamienna–słabe otoczenie gruntowe. Za kryterium adekwatności modelu uznano ścisłość dopasowania jego charakterystyki obciążenie–osiadanie do wyników badania nośności – próbnego obciążenia kolumny.

Ponieważ próbné obciążana kolumna kamienna otoczona była grupą kolumn, uformowanych w siatce trójkątów równobocznych o boku 3 m, zdecydowano o sprowadzeniu zagadnienia do koncepcji cylindrycznej komórki jednostkowej, w której rozważa się równowagę pojedynczej kolumny kamiennej otoczonej przypadającym na nią słabym podłożem (rys. 1a). Geometrię kolumny kamiennej ustalono na podstawie przeprowadzonej odkrywki (rys. 1b). Model numeryczny składał się z 9678 czterowęzłowych elementów czworobocznych (rys. 1a).



Fot. 1. Widok stanowiska do próbnych obciążeń kolumny kamiennej

Photo 1. Model station of load plate test of stone column



Rys. 1a) Model geometryczny komórki jednostkowej, b) wyniki inwentaryzacji kolumny kamiennej

Fig. 1a) Geometrical model of cylindrical unit, b) results of investigation of stone column

W przypadku gruntu ziarnistego, charakteryzującego się małą ściśliwością, który formuje kolumnę zastosowano model sprężysto-idealnieplastyczny z powierzchnią Coulomba–Mohra i modyfikacją Menetreya i Willama [4]. Słabe, silnie odkształcalne, otoczenie kolumny odzwierciedlono modelem Modified Cam-Clay, pozwalającym na ujęcie jego zagęszczenia i wzmocnienia podczas obciążania.

Poszukiwanie parametrów przyjętych modeli gruntów przebiegało dwutorowo.

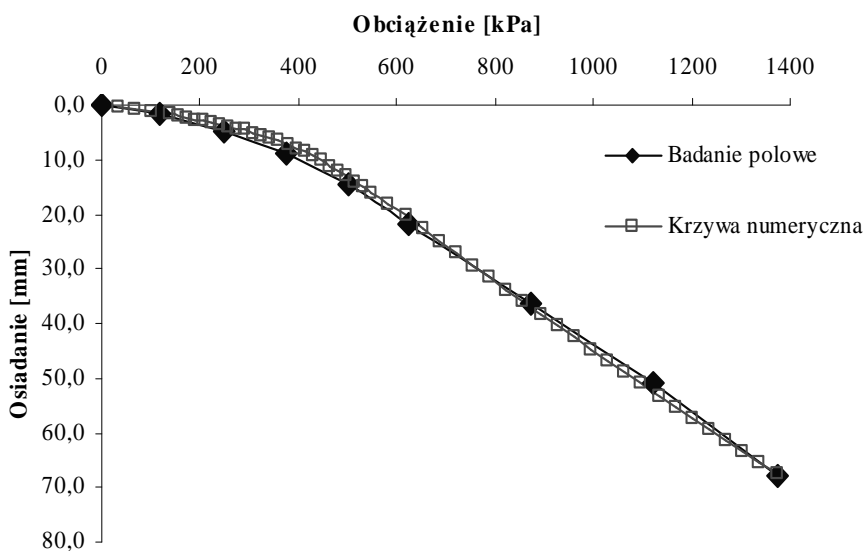
W przypadku namułu parametry odwzorowującego go modelu (MCC) wyznaczono z badań laboratoryjnych na próbkach pobranych (NNS) po wykonaniu próbnego obciążenia. Były to badania w aparacie trójosiowego ściskania oraz badania edometryczne.

Parametry modelu kolumny (ką tarcia wewnętrznego – ϕ i spójność – c) uzyskano na podstawie analizy półwstecznej układu, przyjmując na podstawie próbnych obciążeń moduł sprężystości – E oraz literaturowo współczynnik Poissona – ν .

Dla podścielającego grunt słaby żwiru, o stopniu zagęszczenia $I_D = 0,5$, parametry modelu Coulomba–Mohra (M-W) określono na podstawie normy PN-81/B-03020.

Parametry modelu betonowej płyty (liniowo-sprężysty) przyjęto na podstawie normy PN-B-03264 jak dla betonu B15 (C12/15).

Po przeprowadzeniu kilkudziesięciu pełnych analiz numerycznych heurystycznie ustalono ostatecznie poszukiwane parametry kolumny, dla których krzywa numeryczna najlepiej odzwierciedla krzywą z badań polowych (rys. 2). Zmodyfikowany współczynnik determinacji wyniósł $R^2 = 0,9982$.



Rys. 2. Wyniki analizy MES

Fig. 2. Results of FEM analysis

Zbiorcze zestawienie wszystkich parametrów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zbiorcze zestawienie parametrów modeli konstytutywnych przyjętych i uzyskanych w analizie MES

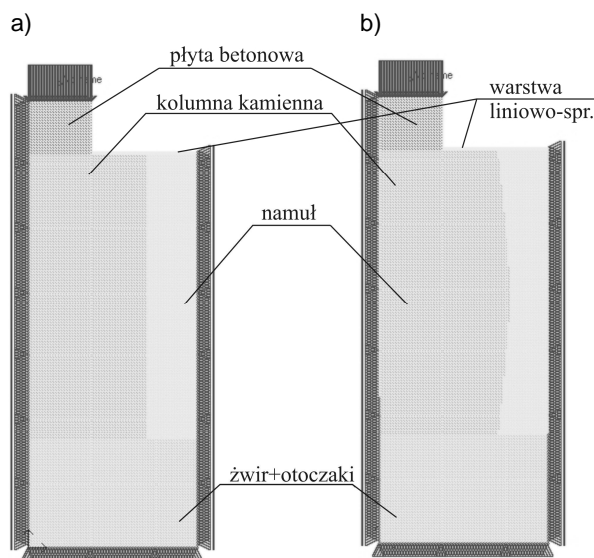
	Model konstytutywny	Parametry i wartości początkowe
Płyta betonowa	Liniowo-sprężysty	$E = 27 \text{ GPa}$, $\nu = 0,2$
Kolumna kamienna	Coulomb–Mohr (M-W)	$E = 76 \text{ MPa}$, $\nu = 0,2$, $\phi = 43,5^\circ$, $c = 5 \text{ kPa}$
Namuł	Modified Cam Clay	$\lambda = 0,087$, $\kappa = 0,0028$, $e_0 = 0,84$, $M = 1,48$, $\text{OCR} = 1$, $\nu = 0,3$
Żwir + otoczaki	Coulomb–Mohr (M-W)	$E = 140 \text{ MPa}$, $\nu = 0,25$, $\phi = 38,5^\circ$, $c = 0 \text{ kPa}$

3. Analiza wrażliwości modelu na kształt kolumny

Dobra zbieżność krzywej numerycznej MES i krzywej z badań polowych (punkt 2, rys. 2), uzyskana została między innymi dzięki odzwierciedleniu w analizie kształtu kolumny kamiennej. Aby jednoznacznie to potwierdzić, konieczne było przeprowadzenie analizy wrażliwości przyjętego modelu numerycznego na kształt kolumny. W analizie tej przyjęto takie same modele konstytutywne gruntu i ich parametry jak w przypadku kalibracji i analizy półwstecznej (punkt 2).

Przeanalizowano dwie sytuacje. Pierwsza odpowiada dotychczasowej praktyce projektowej, w której w obliczeniach nośności i przewidywanych osiadań przyjmuje się stałą średnicę kolumny na jej długości (rys. 3a). Wielkość tę przyjęto jako równą średnicy głowicy kolumny ($D_g = 2,2$ m) możliwej do ustalenia bez szczegółowej inwentaryzacji.

Druga sytuacja to stan pośredni, w którym kolumna ma kształt zmienny na długości, przy czym jej średnica maksymalna jest większa od średnicy głowicy o połowę różnicy między wartościami ekstremalnymi z badań (rys. 3b).



Rys. 3. Geometria kolumn przyjęta w analizie MES

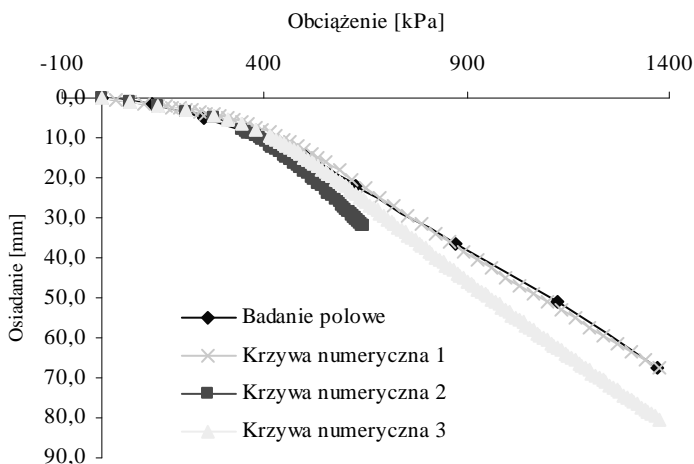
Fig. 3. Geometry of column in MES analysis accepted

Uzyskane krzywe obciążenie–osiadanie dla rzeczywistego i analizowanych kształtów kolumny przedstawiono na rys. 4.

Krzywa nr 1 odpowiada rzeczywistemu kształtowi kolumny. Krzywą nr 2 uzyskano dla kształtu cylindrycznego (rys. 2a), a krzywą nr 3 dla sytuacji przejściowej (rys. 2b).

Wyniki przeprowadzonej analizy MES uprawniają do stwierdzenia, że dobór kształtu kolumny kamiennej ma istotny wpływ na uzyskaną w obliczeniach krzywą obciążenie–osiadanie. Zależy to także od wielkości przyłożonych nacisków. Dla nacisków o wartości 250 kPa (20% przyłożonego obciążenia) uzyskane w obliczeniach osiadania są zbliżone

(brak widocznego wpływu geometrii kolumn). Dla nacisków większych krzywe nr 2 i 3 wykazują już mniejszą zbieżność, przy czym mniej korzystnie wypada krzywa dla kształtu cylindrycznego. Uzyskane dla niej osiadania są większe o 43% w stosunku do osiadań kolumny o kształcie odpowiadającym rzeczywistości (w możliwym do przeprowadzenia analizą MES przedziale od 0 do ok. 650 kPa). W przypadku kształtu pośredniego osiadania końcowe różnią się o 20%.



Rys. 4. Wyniki analizy wrażliwości ze względu na kształt kolumny

Fig. 4. Results of analyses of sensitivities for the sake of shape of column

4. Adekwatność wybranych metod szacowania osiadań

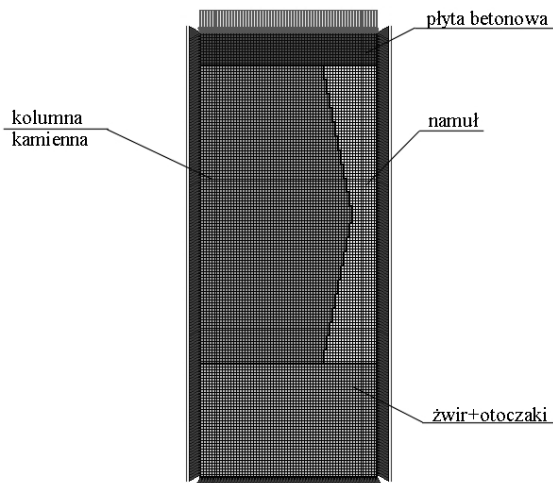
Jak wykazano w punkcie 2. artykułu, przyjęcie dla kolumny i otaczającego ją gruntu modeli CM (M-W) oraz MCC umożliwia dobre opisanie zachowania się układu kolumna kamienna–słabe podłoże pod obciążeniem, z zastosowaniem analizy numerycznej MES. Warunkiem koniecznym jest jednak zdefiniowanie geometrii kolumny oraz przyjęcie właściwych parametrów wybranych modeli gruntowych.

Powstaje pytanie, na ile stosowane w dzisiejszej praktyce metody szacowania osiadań są zbieżne z rozwiązaniem uzyskanym numerycznie dla układu wbijana kolumna kamienna–słabe podłoże gruntowe w niniejszym artykule. Porównanie rozwiązań, bazujących na koncepcji komórki jednostkowej, wymaga przyjęcia założenia o równomiernym osiadaniu jej górnej powierzchni. Założenie to jest dobrym przybliżeniem w przypadku podłoża płyty fundamentowej, ale w odniesieniu do podłoża nasypu lub posadzki wymaga rozścielenia na głowicach kolumny geomateraca.

Do analizy wybrano metody szacowania osiadań wg Priebego [5] oraz Van Impe–Madhava [7]. Rozważania prowadzone były w ramach komórki jednostkowej, określonej dla siatki trójkątów równobocznych o boku 3 m (podobnie jak przy kalibracji modeli).

Przyjęty w analizie numerycznej model geometryczny i numeryczny układu wbijana kolumna kamienna–słabe podłoże gruntowe przedstawiono na rys. 5. Obciążenie przeka-

zywane było przez sztywną płytę betonową o grubości 30 cm. W analizie odwzorowano rzeczywisty kształt kolumny kamiennej.



Rys. 5. Komórka jednostkowa przyjęta w analizie MES

Fig. 5. Unit cell in MES analysis accepted

W przypadku metod stosowanych praktycznie (Pribe oraz Van Impe–Madhav) w obliczeniach przyjmowana jest stała średnica kolumny. Przypomnijmy, że w analizowanym przypadku kolumna charakteryzowała się zmiennym wzdłuż długości kształtem. Średnica minimalna (górną i dolną) wyniosła 2,2 m, a średnica maksymalna 2,7 m (w środku długości kolumny). W związku z tym, obliczenia wymienionymi metodami przeprowadzono dla dwóch różnych średnic kolumny D_k^* : minimalnej 2,2 m oraz uśrednionej 2,45 m.

Przyjęte do obliczeń, dla poszczególnych metod, parametry pokazano w tab. 2. Wartości z indeksem k dotyczą materiału kolumny, natomiast z indeksem n namułu.

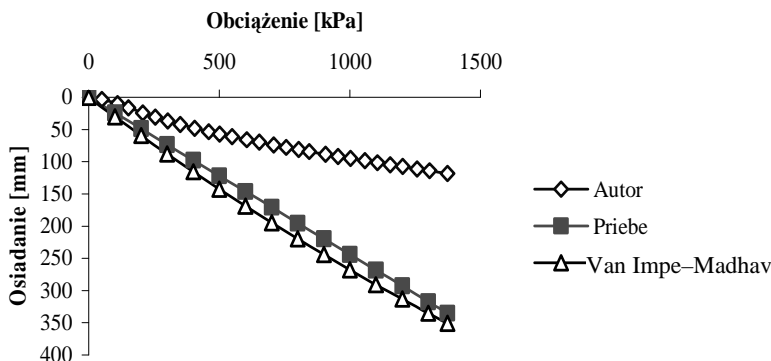
Tabela 2

Zestawienie parametrów geotechnicznych dla wybranych metod obliczeniowych

Metoda wymiarowania	Parametry
Pribe	$\nu_n = 0,3, \phi_k = 43,5^\circ$
Van Impe–Madhava	$M_{on} = 1,69 \text{ MPa}, \nu_n = 0,3, \phi_k = 43,5^\circ$
Podłoże słabe	$M_{on} = 1,69 \text{ MPa}, \nu_n = 0,3$

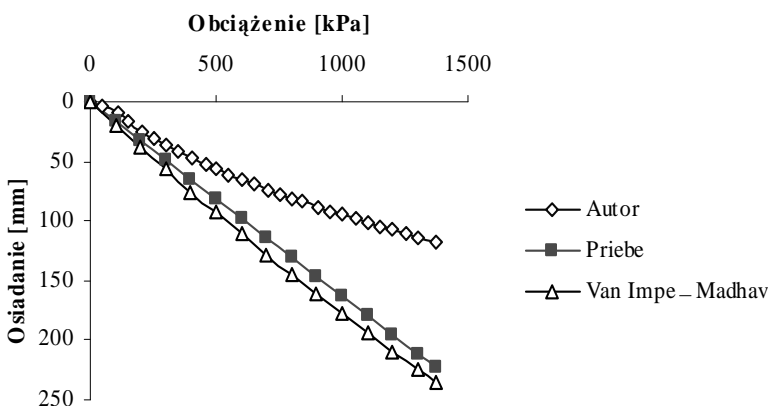
Praktycznie wszystkie z wymienionych w tab. 2 parametrów przyjęto na podstawie wcześniej przeprowadzonej kalibracji. Nieokreślony w niej, edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej namułu M_{on} , przyjęto na podstawie badań edometrycznych. W metodzie wg Van Impe–Mahdava pominięto efekt dylatacji. Osiadanie podłoża przed wzmocnieniem określono przy założeniu jednoosiowego stanu odkształcenia.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono porównanie zależności obciążenie–osiadanie, otrzymanych wybranymi metodami obliczeniowymi (Pribe i Van Impe–Madhav) z wynikami otrzymanymi w analizie MES dla różnych średnic kolumny D_k^* . Obliczenia prowadzone były dla zakresu obciążeń od 0 do 1373 kPa – jak w próbnym obciążeniu.



Rys. 6. Zależność obciążenie–osiadanie dla kolumny o średnicy $D_k^* = 2,2$ m

Fig. 6. Load–settlement curve for column of diameter $D_k^* = 2,2$ m



Rys. 7. Zależność obciążenie–osiadanie dla kolumny o średnicy $D_k^* = 2,45$ m

Fig. 7. Load–settlement curve for column of diameter $D_k^* = 2,45$ m

Analizując otrzymane zależności (rys. 6 i 7) można stwierdzić, że metody Pribego i Van Impe–Madhava dają zbliżone wyniki (osiadania obliczone metodą Van Impe–Madhava były do 23% większe od osiadań obliczonych metodą Pribego).

Analiza adekwatności tych metod opiera się w niniejszym artykule na aksjomacie dobrej zgodności osiadań przewidywanych z zastosowaniem zaproponowanego i zidentyfikowanego parametrycznie numerycznego modelu komórki jednostkowej, z wynikami wirtualnego próbnego obciążenia przykładanego na całej powierzchni komórki jednostkowej. Ze względu na porównywalność z istniejącymi metodami zakłada się, że obciążenie

przekazywane jest przez sztywną płytę. Przywołany aksjomat uzasadniony jest doskonałym dopasowaniem do wyniku rzeczywistego próbnego obciążenia powierzchni głowicy kolumny oraz podobieństwem zachowania się układu w warunkach obciążenia samej kolumny i całej komórki.

Pozwala to traktować charakterystyki „obciążenie–osiadanie” jednostkowej komórki opisanej modelem proponowanym przez autora jako układ odniesienia, a względne (wyrażone w procentach) dystanse charakterystyk, ocenianych metod inżynierskich do tego układu, jako miary ich adekwatności.

Analiza pokazała, że używając metody Van Impe–Madhava, przewiduje się osiadania wzmocnionego podłoża z dużym nadmiarem, rosnącym w dodatku wraz ze wzrostem obciążenia głowicy i ze zmniejszeniem współczynnika wymiany. Aby dać wyobrażenie skali zawyżenia przewidywań, wystarczy zauważyć, że nawet w przypadku nader wysokiego współczynnika wymiany $\alpha = 0,5$ ($D_k = 2,2$ m) przewiduje się osiadania za duże o ok. 160% przy obciążeniu 600 kPa, o ok. 180% przy nacisku 1000 kPa i ok. 200% przy 1373 kPa. Warto nadmienić, że nadmiary w oszacowaniach metodą Priebego są odpowiednio nieco mniejsze.

5. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonego próbnego obciążenia wbijanej kolumny kamiennej stały się podstawą kalibracji zaproponowanego modelu numerycznego. W poszukiwaniach parametrów wybranych modeli zastosowano połączenie kalibracji lokalnej (badania laboratoryjne) i globalnej (analiza wsteczna). Tak przeprowadzona kalibracja oraz przyjęcie rzeczywistego kształtu kolumny pozwoliły na uzyskanie bardzo dobrej zbieżności wspomnianych krzywych. Świadczy o tym bardzo bliska jedności wartość zmodyfikowanego współczynnika determinancji $R^2 = 0,9982$.

Potwierdzenie konieczności ujęcia, w analizie MES, zbliżonego do rzeczywistości profilu kolumny dała analiza wrażliwości modelu numerycznego. Wykazała ona, że dobór kształtu kolumny kamiennej ma istotny wpływ na uzyskaną w obliczeniach krzywą obciążenie–osiadanie. Im kształt kolumny jest bardziej zbliżony do cylindrycznego o średnicy na poziomie głowicy kolumny, tym uzyskane obliczeniowo osiadania bardziej odbiegają od wielkości pomierzonych (z badań polowych).

Wykalibrowany model numeryczny posłużył również do analizy adekwatności wybranych metod w zakresie szacowania osiadania podłoża wzmocnionego kolumnami kamiennymi.

Analiza wykazała, że istniejące metody inżynierskie prowadzą do przewidywania osiadań z nadmiarem, którego wielkość zależy w zasadniczy sposób od współczynnika wymiany oraz smukłości kolumny.

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., *Próbné obciążenie wbijanej kolumny kamiennej. Wyniki badań polowych*, Konferencja Naukowa z okazji Jubileuszu 70-lecia urodzin Profesora Macieja Gryczmańskiego, z. 111, Gliwice 2007, 267-274.
- [3] Kwiecień S., *Analiza teoretyczna i doświadczalna wzmocnienia podłoża metodą wymiany dynamicznej*, praca doktorska, Gliwice 2008.
- [4] Menetrey Ph., Willam K.J., *A triaxial failure criterion for concrete and its generalization*, ACI Journal, 92(3), 1995, 311-318.
- [5] Priebe H., *Abschätzung des Setzungsverhaltes eines durch Stopfverriichtung verbesserten Baugrundes*, Die Bautechnik, Vol. 53, No. 5, 1976.
- [6] Szypcio Z., *Bearing capacity of single column*, Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXII, 3-4, 2000, 41-54.
- [7] Van Impe W.F., Madhav M.R., *Analysis and settlement of dilating stone column reinforced soil*, Osterreichische Ingeniur und Architekten Zeitschrift, 3, 1992, 114-121.