

PIOTR KANTY\*

PRÓBA NUMERYCZNEGO ODZWIERCIEDLENIA  
PROCESU WBIJANIA KOLUMNY KAMIENNEJNUMERICAL TRIAL ON RAMMING PROCESS  
OF STONE COLUMN

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki modelowania numerycznego procesu formowania wbijanej kolumny kamiennej z wykorzystaniem programu ABAQUS (moduł Explicit) i przyjętych przez autora modeli układu kolumna–otaczający grunt. W rozważaniach wykorzystano modele: liniowo-sprężyste, Drucker-Prager oraz Drucker-Prager/cap plasticity. Podstawą tej analizy były laboratoryjne badania modelowe, przeprowadzone przez autora, w których pojedynczą kolumnę kamienną z grys formowano w podłożu słabym odwzorowanym trocinami. Modele MES zostały skalibrowane na zasadzie analizy wstecznej (za czynnik decydujący przyjęto zgodność przemieszczeń w modelu laboratoryjnym i numerycznym).

*Słowa kluczowe: wymiana dynamiczna, badania modelowe, modelowanie numeryczne*

## Abstract

The paper presents the results of numerical modeling of rammer impact in the formation process of driven stone column. The results were obtained with the use of ABAQUS numerical code (Explicit module) and the models of the column–surrounding soil arrangement adopted by the author. In the numerical analysis following constitutive models were considered: linear-elastic, Drucker-Prager and Drucker-Prager/cap plasticity. The starting point of the investigations were the author's laboratory model tests, in which a single stone column made of granite aggregate was formed in sawdust corresponding to weak soil. FEM models were calibrated based on back analysis in order to obtain the agreement between measured and simulated deformations.

*Keywords: dynamic replacement, model tests, numerical modeling*

\* Mgr inż. Piotr Kanty, Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska.

## 1. Wstęp

Ostatnie lata przyniosły dynamiczny rozwój metod geoinżynierskich, zarówno jeżeli chodzi o wiedzę teoretyczną, jak i praktyczne zastosowanie. Ze względu na wzmożoną liczbę inwestycji, zwłaszcza w infrastrukturze drogowej, metody wzmacniania podłoża, a wśród nich metoda wymiany dynamicznej, stały się powszechnie stosowane przez projektantów i wykonawców.

Wymiana dynamiczna, zwana też wbijaniem kolumnami kamiennymi, polega na ukształtowaniu w gruncie (poprzez ubijanie specjalnie skonstruowanym do tego celu ubijakiem) słupów z materiału kamiennego. Masy stosowanych w Polsce ubiaków mieszczą się w przedziale 10–12 t, a standardowe wysokości zrzutu należą do przedziału 10–25 m [10]. Proces formowania kolumny rozpoczyna się od zrzutu ubijaka na słabe podłoże. W ten sposób formuje się krater, który w kolejnym etapie zostaje wypełniony kruszywem kolumny. W dalszych etapach następuje kolejny zrzut ubijaka w wypełniony krater i uzupełnianie materiału według potrzeb. W zależności od zastosowanej energii uderzenia [12] uzyskuje się kolumny o różnych kształtach [14]. Proces kształtowania kolumny uznaje się za zakończony, jeżeli ubiak nie wykazuje wpędu w podłoże.

Metoda wymiany dynamicznej nadaje się przede wszystkim do wzmocnienia słabych gruntów spoistych oraz gruntów organicznych o miąższości do 6 m. Uformowane słupy z materiału kamiennego o kształcie zbliżonym do beczki wzmacniają grunty słabe, co pozwala na posadowienie bezpośrednie budowli. Wzmocnienie gruntu wokół kolumn odbywa się przez wibracje towarzyszące uderzeniom ubijaka w trakcie formowania, jak odprowadzenie wody z gruntu do kolumny, która pełni rolę drenu. Proces konsolidacji zostaje w ten sposób przyspieszony i można posadowić obiekt bezpośrednio na wzmocnionym podłożu. Metoda jest uznawana za szybką i skuteczną, niemniej jednak ze względu na brak adekwatnych metod obliczeniowych sprawia problemy projektowe. Obecnie stosuje się metody opisane w pozycji [13]. Także wiedza teoretyczna o procesach zachodzących w gruncie zarówno podczas ubijania, jak i po ukształtowaniu kolumny nie jest wystarczająco rozbudowana. W celu wypełnienia tej niszy zostały wykonane badania opisane skrótowo w kolejnym punkcie niniejszego artykułu oraz szerzej w pozycjach [11] i [12].

## 2. Badania laboratoryjne

Celem badań laboratoryjnych o charakterze jakościowym było określenie wpływu procesu kształtowania kolumny na jej kształt. Podstawą przyjętej metodyki była intuicja, wiedza na temat kształtowania kolumny w warunkach *in situ*, stosunkowo nieliczne badania innych autorów (np. [15]) oraz własne badania wstępne prowadzone na zasadzie prób i błędów [1].

Badania przeprowadzono w specjalnie skonstruowanym do tego celu stanowisku badawczym, składającym się z komory roboczej (rys. 1) oraz prowadnicy ubijaka. Komora testowa posiadała front wykonany ze szkła akrylowego, co umożliwiało obserwację interakcji kolumna–słaby grunt–ubiak. Komora charakteryzowała się nieznaczną grubością (12 cm) w stosunku do pozostałych wymiarów 66 i 60 cm (dzięki czemu możliwa była obserwacja). Prowadnica ubijaka zapobiegała uderzeniom o ścianki komory i wymuszała to samo miejsce jego spadku.



Rys. 1. Stanowisko testowe

Fig. 1. Test setup

Zastosowany ubijak (rys. 1) odzwierciedlał w skali 1:10 rzeczywisty ubijak używany przez jednego z polskich wykonawców kolumn kamiennych. Charakteryzował się beczkopodobnym kształtem, wysokością 20 cm, średnicą w części środkowej 10,5 cm oraz średnicą na spodzie i górze 9 cm. Jego masa wynosiła 10,1 kg, co stanowi ok. 0,001 masy ubijaka rzeczywistego (11,2 T). W badaniach laboratoryjnych maksymalną zastosowaną wysokością zrzutu ubijaka był 1,2 m, w warunkach terenowych spadek swobodny „osy” następowałby minimum z 10-krotnie większej wysokości. Różnice w warunkach laboratoryjnych i terenowych stanowiły o tym, iż energia uderzenia różniła się 10 000-krotnie. Fakt ten wymusił zastosowanie do badań laboratoryjnych słabszego, niż można spotkać w rzeczywistości, gruntu.

Grunt słaby odwzorowano trocinami, natomiast materiał kolumny kruszywem granitowym (gresem). Wielkości poszczególnych wiórów trocin wahały się w przedziale 0,2–3,0 cm, natomiast wielkości ziaren gresu w granicach 0,5–2,5 cm. Dla obu materiałów sprawdzono gęstość objętościową oraz wykonano badanie w aparatach bezpośredniego ścinania. Do badania trocin użyto aparatu o wymiarach boków skrzynki 6 cm, natomiast dla kruszywa granitowego 12 cm. W celu uzyskania parametrów odkształceniowych wykonano również badanie trocin w edometrze. Ze względu na brak odpowiedniego sprzętu do zbadania modułów odkształcenia gresu wykonano jedynie jego analizę sitową i na podstawie danych literaturowych [16] dla kruszywa łamanego o podobnym uziarnieniu przyjęto odpowiednie parametry. Zbadane i przyjęte parametry gruntów zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

**Wartości parametrów gruntu opisujących  
cechy mechaniczne**

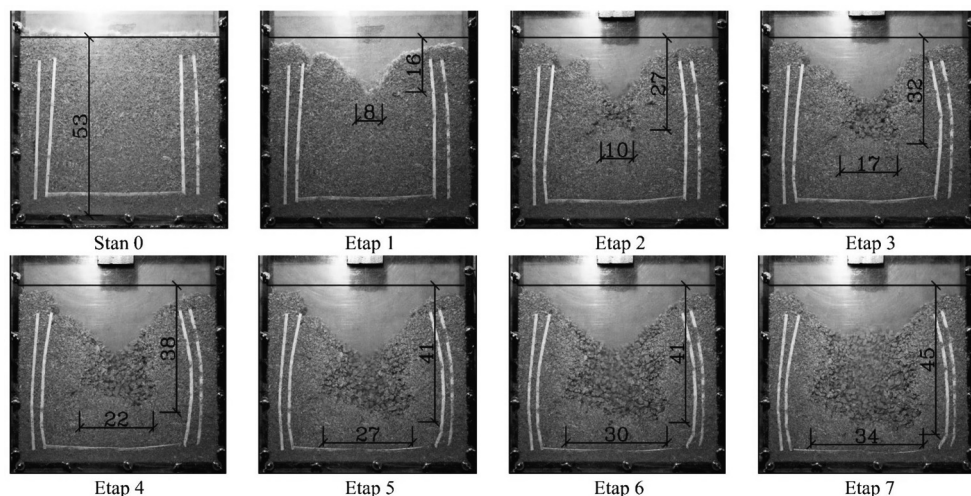
	<b>Trociny</b>	<b>Gres</b>
<b>Bezpośrednie ścinanie</b>		
$\phi$ [...°]	37	47
c [kPa]	0	20
<b>Edometr</b>		
Przedział obciążenia [kPa]	Moduły ścisłości $M_{(p)}$ [MPa]	
12,5–25	0,100	16,930
25–50	0,164	10,121
50–100	0,291	10,991
100–200	0,537	21,722
200–400*	1,115	24,053
400*–200	40,608	408,050
200–100	4,097	448,910
100–50	2,488	136,065
50–25	0,863	172,762
25–50	3,706	187,212
50–100	2,852	74,880
100–200	3,965	132,097
200–400*	3,450	106,850

\* dla gresu 250 kPa

Wartość spójności kruszywa granitowego wynika, zdaniem autora, z efektu klinowania się ziaren (*interlocking*). Podobne wartości spójności można znaleźć w literaturze [16]. Cenne byłoby w tej sytuacji wykonanie badania w wielkowymiarowym aparacie skrzynkowym, które autor planuje w najbliższym czasie.

Badania prowadzono zgodnie z ustalonym na początku cyklem. Obejmował on ukształtowanie każdej kolumny w siedmiu etapach przy narastającej energii uderzenia. Zasypów krateru kruszywem dokonywano po każdym etapie badania. W stanie zero grunt obciążono równomiernie obciążeniem o wartości 400 Pa. Wysokości zrzutu na początku badania wynosiły 10 cm, dalej 30 cm, 50 cm, 100 cm, aż do 120 cm na końcu testu. Cały proces kształtowania kolumny był filmowany i fotografowany. Na rysunku 2 pokazano przykładową kolumnę na każdym etapie jej kształtowania. Do pomiaru odkształceń poziomych gruntu obok kolumny zastosowano papierowe paski (rys. 2). Łącznie wykonano 13 kolumn, z czego trzy w takich samych warunkach. Miało to na celu sprawdzenie powtarzalności wyników.

Kolumny ukształtowane podczas badań charakteryzowały się stosunkiem długości do średnicy mniejszym niż 4 (kolumny krępe). Uzyskano wyniki powtarzalne, na podstawie których przeanalizowano m.in. kształty kolumn, odkształcenia gruntu słabego [11] oraz wpływ doboru energii uderzenia na wyniki [12]. W analizie pominięto wpływ płaskiego stanu odkształcenia (panującego w komorze roboczej) na wyniki, wpływ szerokości komory na przemieszczenia gruntu słabego oraz nie analizowano wzmocnienia trocin podczas i po wykonywaniu kolumny.



Rys. 2. Etapy kształtowania kolumny

Fig. 2. Stages of columns formation

Można podejrzewać, że formowanie kolumny kamiennej w stanowisku odpowiadającemu płaskiemu stanowi odkształcenia nie będzie odpowiadać podobnemu procesowi w układzie trójwymiarowym. Stworzenie płaskiego układu dało jednak możliwość obserwacji procesu kształtowania kolumny. Szansę na rozwiązanie problemu pominięcia w badaniach trzeciego wymiaru autor upatruje w modelowaniu numerycznym.

### 3. Model numeryczny

#### 3.1. Podstawy modelu numerycznego

Ze względu na fakt, iż wykonane badania laboratoryjne nie wyczerpały tematu analizy procesu wbijania kolumny kamiennej, podjęto próbę stworzenia modelu numerycznego, który pozwoliłby odpowiedzieć na więcej pytań. Przykładowo, nie wiadomo, jak zagęścił się grunt podczas wbijania kolumny, jaki wpływ ma płaski stan odkształcenia na kształt kolumny czy wreszcie, jak zmieniają się parametry materiałowe gruntu słabego podczas ubijania. Stworzenie i skalibrowanie modelu numerycznego, odpowiadającego warunkom panującym podczas badań laboratoryjnych, może być podstawą do rozszerzenia analiz procesu kształtowania kolumn kamiennych. Przejście z płaskiego stanu odkształcenia do stanu trójwymiarowego jest bardzo trudne w warunkach laboratoryjnych, ponieważ nie można prowadzić stałej obserwacji kolumny. Model numeryczny może takie przejście umożliwić. Analiza komputerowa jest szybsza i daje duże możliwości, lecz najpierw należy rozwiązać problemy kalibracji modelu numerycznego.

Analiza dostępnej literatury wykazała, iż najczęściej tworzonymi modelami numerycznymi są modele odzwierciedlające pracę kolumn kamiennych pod docelowym obciążeniem (np. nasypu) czy też odzwierciedlające próbne obciążenie jak w pozycji [17].

Jeżeli chodzi o sam proces kształtowania kolumny, to problem jego modelowania został rozwiązany i opisany w pracy [18], z tą różnicą, iż autorzy opisują kolumnę wykonaną z piasku, a nie z materiału kamiennego. Niemniej jednak wspomniana pozycja pokazuje, że zamodelowanie procesu kształtowania kolumny jest możliwe przy zastosowaniu metody elementów skończonych. Do rozwiązania problemu wykorzystano dwa modele materiałowe: modified Cam-Clay dla spoistego gruntu słabego oraz model CAP, będący rozszerzeniem modelu Drucker-Pragera, dla kruszywa kolumn (grunt niespoisty). Do obliczenia zadania posłużono się stworzonym przez autorów programem, jak też równolegle programem komercyjnym. Oba oparte były na jawnej metodzie całkowania (*explicit*). Sformułowano kontakt między elementami modelu, stosując metodę/formułę „penalty”. Spadającemu swobodnie ubijakowi zadano odpowiednią prędkość. Opcja „re-meshing” pozwoliła na adaptację siatki elementów skończonych (odkształconej po zrzucie ubijaka) do kolejnego etapu formowania.

Z problemem dynamiki w geotechnice spotykają się inżynierowie projektujący zapory przeciw spadającym odłamkom skalnym. Zagadnienia spadku swobodnego i uderzenia o grunt masy z dużą energią z powodzeniem są modelowane numerycznie z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W pozycji [3] opisano badanie w skali naturalnej i odzwierciedlający je model numeryczny. Modelowano spadek sześciennego głazu na nasyp z gruntu zbrojonego. Model numeryczny odzwierciedlający badania pozwolił na stworzenie wytycznych do projektowania zabezpieczeń przeciwko spadającym głazom. Analiza dystrybucji energii kinetycznej w czasie uderzenia była możliwa tylko dzięki zastosowaniu modelu numerycznego. Podobnie jak w cytowanym wcześniej artykule, zastosowano również jawną metodę całkowania i kontakt typu „penalty”, natomiast jako model materiałowy wybrano model Drucker-Pragera ze wzmocnieniem. Autorzy uzyskali zadowalającą zgodność wyników testów i analizy numerycznej. We wnioskach podkreślają, iż modelowanie numeryczne jest czasochłonne i trudne, ale stanowi nieocenione narzędzie wspomagające projektanta w niektórych sytuacjach.

Trzeci i ostatni przykład zastosowania numeryki, który stał się podstawą do dalszych analiz, to praca [4]. Przedstawia ona badania w małej skali oraz model numeryczny wpływu kształtu głazu spadającego w grunt na jego zagłębienie. Problem spadku swobodnego ubijaka zamodelowano za pomocą popularnego programu umożliwiającego analizę jawną metodą całkowania. W tym przypadku zastosowano model Drucker-Pragera ze wzmocnieniem i kontakt typu „penalty”. Problem dużych odkształceń siatki rozwiązano, stosując technikę siatkowania ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian adaptive meshing), pozwalającą utrzymać wysoką jakość siatki podczas całej analizy. Zgodność wyników badań z modelem numerycznym uzyskano tylko na początkowym etapie zagłębienia się ubijaka w grunt. Jako wniosek zasugerowano, iż zastosowanie modelu CAP może dać lepszą zgodność.

Powyższe artykuły skierowały autora ku programowi ABAQUS, moduł Explicit, który daje możliwość spełnienia wszystkich wymagań potrzebnych do modelowania procesu kształtowania kolumny kamiennej.



### 3.2. Założone przyjęte w modelu numerycznym

Jako cel autor postawił sobie skalibrowanie modelu numerycznego, który odzwierciedlałyby wybrane etapy kształtowania kolumny podczas badań laboratoryjnych. Były to stan zero, etap 1, 2, 3 oraz etap 7. Na początku wykonano analizę wrażliwości modelu na zmianę parametrów wejściowych. Nie wszystkie dane wejściowe wynikały z badań, a przyjęcie określonej wartości wiązało się z ryzykiem popełnienia błędu. Aby mieć świadomość dokładności przyjmowanych parametrów, stworzono wiele modeli numerycznych, na których testowano wpływ poszczególnych parametrów na końcowe wyniki (podrozdziały 4.1 i 4.2). W modelu docelowym (podrozdział 4.3) przyjęto następujące założenia:

1. Geometria układu wynikająca z badań laboratoryjnych: płaski stan odkształcenia, model dwuwymiarowy ze zdefiniowaną grubością równą grubości stanowiska testowego (12 cm).
2. Elementy czterowęzłowe z redukcją punktów całkowania, średnia wielkość to 1 cm.
3. Warunki podparcia: uniemożliwiono przesuw boczny krawędzi pionowych oraz pionowy dla krawędzi dolnej bryły gruntu słabego.
4. Warunki początkowe: zdefiniowano naprężenia początkowe w gruncie wynikające z jego ciężaru własnego.
5. Obciążenia: grawitacja działająca na grunt (do wyznaczenia naprężeń początkowych) oraz grawitacja działająca na niepodparty ubijak (powodująca jego spadek swobodny).
6. Wysokość spadku: zależna od etapu badania. W niektórych modelach definiowano prędkość początkową obliczoną jako:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

gdzie:

- $h$  – wysokość zrzutu ubijaka [m],
- $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m/s}^2$ ].

Na początku tych analiz ubijak znajdował się 1 cm nad gruntem.

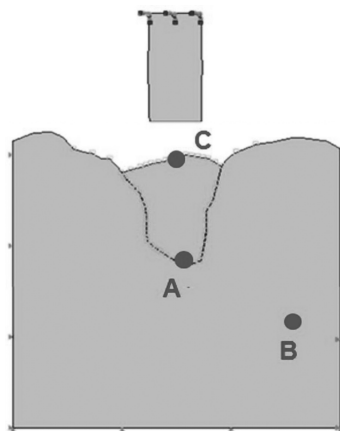
1. Definicja kontaktu: przyjęto typ „penalty”. Tarcie między materiałami zdefiniowano jako:

$$u = 1/3 \tan \phi \quad (2)$$

gdzie:

- $\phi$  – to kąt tarcia wewnętrznego gruntu [°].

2. Wybór punktów charakterystycznych (rys. 3): do pomiaru przemieszczeń pionowych wybrano punkt A oraz C. Punkt C pozwalał na zasadzie analizy wstecznej dobrać parametry gresu, natomiast punkt A parametry trocin. Jeżeli chodzi o punkt B, to posłużył on do pomiaru deformacji poziomych gruntu słabego.



Rys. 3. Punkty charakterystyczne

Fig. 3. Reference points

### 3.3. Analizowane modele materiałowe

Na podstawie wniosków z artykułów opisanych w podrozdziale 3.1 autor zdecydował się zastosować zmodyfikowany model Drucker-Pragera CAP. Ponieważ ten model materiałowy jest wieloparametrowy, postanowiono budować go sukcesywnie – tzn. najpierw wykonano wiele modeli opartych na liniowej teorii sprężystości, następnie w tych samych przypadkach zastosowano model Drucker-Pragera, a dopiero w trzecim etapie model CAP. W ten sposób, wychodząc od modelu z najmniejszą liczbą parametrów, poprzez znany i często używany model, wykonano przejście do modelu najbardziej złożonego, ale i mogącego dać najdokładniejsze wyniki.

We wszystkich wspomnianych modelach materiałowych poszczególne parametry przyjęto za stałe, natomiast „manipulowano” modulem sprężystości (odkształcenia) –  $E$  [Pa], tak aby uzyskać zgodność przemieszczeń pionowych w modelu numerycznym i w warunkach laboratoryjnych. Dla poszczególnych modeli parametry przyjęto na podstawie badań, z danych literaturowych, bądź intuicyjnie na podstawie analizy wrażliwości. Poniższa tabela (tab. 2) przedstawia parametry z podziałem na modele materiałowe wraz ze źródłem ich uzyskania.

O ile parametry modelu liniowo sprężystego nie wymagają omawiania, o tyle parametry dwóch kolejnych modeli definiowane w programie ABAQUS winny być skrótowo opisane. Szczegółowe opisy tych modeli można znaleźć w pozycjach [2] oraz [5].

Możliwy do wyboru w programie model D-P jest powszechnie znany, relatywnie prosty i chętnie stosowany. Program ABAQUS daje możliwość modyfikacji powierzchni plastyczności D-P względem standardowego podejścia. Poprzez wprowadzenie współczynnika  $K$ , odzwierciedlającego proporcję naprężenia uplastyczniającego w trójosiowym rozciąganiu do naprężenia uplastyczniającego w trójosiowym ściskaniu, możliwa jest modyfikacja powierzchni plastyczności, która w osi aksjatorowej będzie różnić się kształtem od okręgu (rys. 4). W efekcie otrzymujemy powierzchnię zbliżoną do powierzchni Coulomba-Mohra, lecz bez ostrych załamań w punktach charakterystycznych przekroju powierzchni plastyczności [6].



Tabela 2

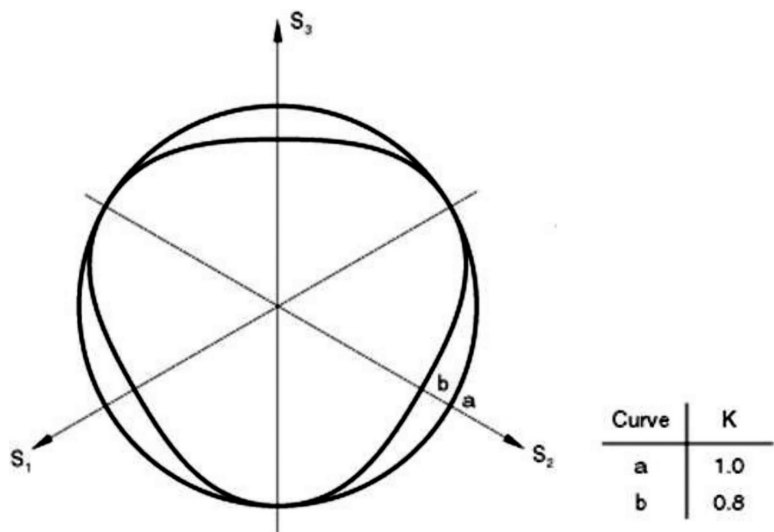
**Źródło parametrów materiałowych**

Parametr	Trociny	Gres
<b>Model liniowo sprężysty</b>		
$\nu$ [-]	0,05 – literatura [9]	0,25 – literatura [7]
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	72–120 – badania	1300–1600 – badania
<b>Model Drucker-Pragera</b>		
$\nu, \rho$	jw.	jw.
$K$ [-]	0,8 – intuicja	0,8 – intuicja
$d$ [kPa]	1* – badania + intuicja	10** – badania + intuicja
$\beta$ [°]	46 – badania	52 – badania
<b>Model CAP</b>		
$\nu, \rho, K, d, \beta$	jw.	jw.
$R$ [-]	0,2 – intuicja	0,2 – intuicja
Initial yield [Pa]	0 – literatura [2]	0 – literatura [2]
$\alpha$ [-]	0,05 – literatura [2]	0,05 – literatura [2]
$P_a$ [Pa]	zmienne – badania	zmienne – badania

\* przyjęto wartość 1 kPa, gdyż program nie akceptuje wartości 0

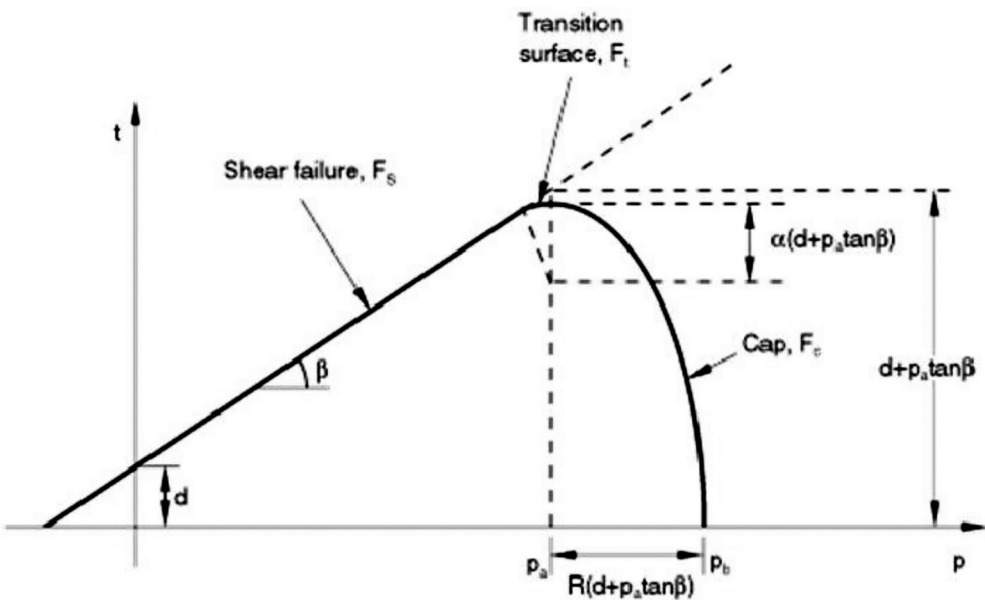
\*\* przyjęto wartość mniejszą niż uzyskana w badaniach, ze względu na wątpliwości opisane w rozdziale 2

Konieczne jest wprowadzenie kryterium zbieżności dla modelu Drucker-Pragera oraz Coulomba-Mohra. Wynika to z faktu, iż dla materiałów o dużym kącie tarcia wewnętrznego wyniki badań wykazywały znaczne rozbieżności w stosunku do modeli numerycznych [8, 18]. Zatem parametry wytrzymałościowe gruntu ( $\phi, c$ ), określone w aparacie skrzynkowym, wymagają przeliczenia na wielkości  $\beta, d$  (rys. 5) według instrukcji zawartych w pozycji [5]. Obowiązuje to dla modelu Drucker-Pragera, jak i jego modyfikacji, czyli modelu CAP. Przekrój przez powierzchnię plastyczności płaszczyzną t-p w modelu CAP składa się z trzech zasadniczych fragmentów: linii prostej odzwierciedlającej wytrzymałość na ścinanie gruntu ( $F_s$ ), odcinka przejściowego ( $F_p$ ) oraz eliptycznej „czapki” ( $F_c$ ), która przecina oś naprężeń średnich pod kątem prostym (rys. 5).



Rys. 4. Kształt przekroju powierzchni plastyczności D-P w osi aksjatorowej [5]

Fig. 4. Yield/flow surface of the D-P model in the deviatoric plane [5]



Rys. 5. Powierzchnia plastyczności w modelu CAP [2]

Fig. 5. Yield surface in the meridional plane for CAP model [2]

Wzmocnienie w tym modelu zdefiniowano, podając parametr  $p_a$ , będący funkcją promienia „czapeczki”  $R$ , kąta  $\beta$ , wartości  $d$  oraz przede wszystkim relacji uplastyczniających naprężeń efektywnych  $p_b$  do plastycznych odkształceń objętościowych  $\epsilon_{vol}^{pl}$ . Podstawą wyznaczenia wspomnianej relacji były wyniki badań edometrycznych.

## 4. Wyniki obliczeń

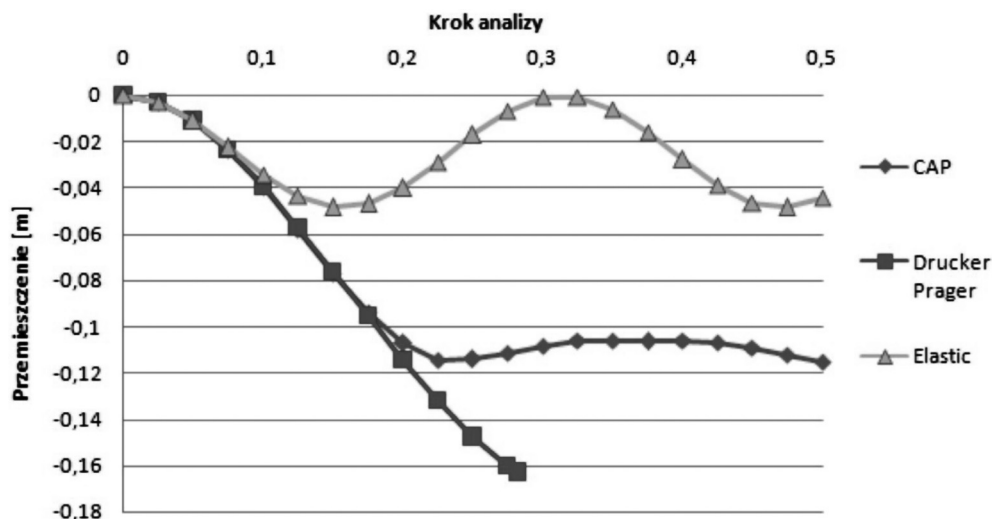
### 4.1. Porównanie wyników dla poszczególnych modeli materiałowych

Pierwszym krokiem podczas analizy wyników było porównanie odkształceń/przemieszczeń na każdym etapie badania w zależności od zastosowanego modelu materiałowego. Na rysunku 6 pokazano przemieszczenia pionowe punktu A w modelu odzwierciedlającym drugi etap badań laboratoryjnych dla trzech wspomnianych wyżej modeli materiałowych.

Zachowanie się modelu liniowo sprężystego jest zgodne z intuicją: po spadku ubijaka (krok obliczeniowy 0,15) nastąpiło pełne odprężenie gruntu (krok 0,3), po czym ponowne odkształcenie pod ciężarem ubijaka (krok 0,45). Model D+P nie wykazał zdolności do stabilizacji układu – przemieszczenia punktu A narastały aż do momentu znacznej deformacji siatki ES. Zachowanie zbliżone do obserwowanego podczas badań laboratoryjnych wykazał model CAP. Po osiągnięciu maksymalnego zagłębienia ubijak pozostał w wytworzonym kraterze. Nastąpiły niewielkie wahania widoczne w krokach 0,25-0,5, jednak według autora, przyjmując uśrednioną wartość przemieszczenia pionowego ze wspomnianych kroków analizy, nie popełnia się znaczącego błędu.

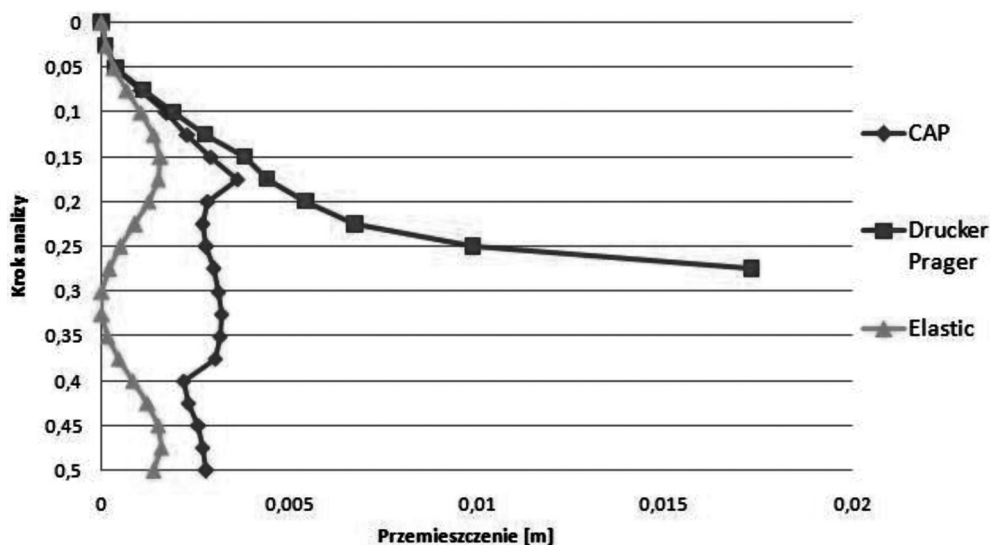
W badaniach modelowych na rozpatrywanym etapie ubijak zagłębił się o 0,11 m (rys. 2).

Na podobnej zasadzie sprawdzono przemieszczenia poziome punktu B, które pokazano na rysunku 7.



Rys. 6. Przemieszczenia pionowe punktu A

Fig. 6. Vertical displacement at point A



Rys. 7. Przemieszczenia poziome punktu B

Fig. 7. Horizontal displacement at point B

Podobnie jak wyżej, najbardziej wiarygodne zachowanie wykazał model CAP. Rząd wielkości przemieszczeń jest zgodny z zaobserwowanym w laboratorium. Dla modelu sprężystego i D+P można wyciągnąć wnioski podobne jak dla przemieszczeń pionowych punktu A. Fakt niepohamowanych przemieszczeń w modelu D-P wynika ze znacznej deformacji siatki i sprawia, że pokazane wartości są nierzeczywiste.

W badaniach modelowych na rozpatrywanym etapie grunt w punkcie B przemieścił się poziomo o 0,005 m [1].

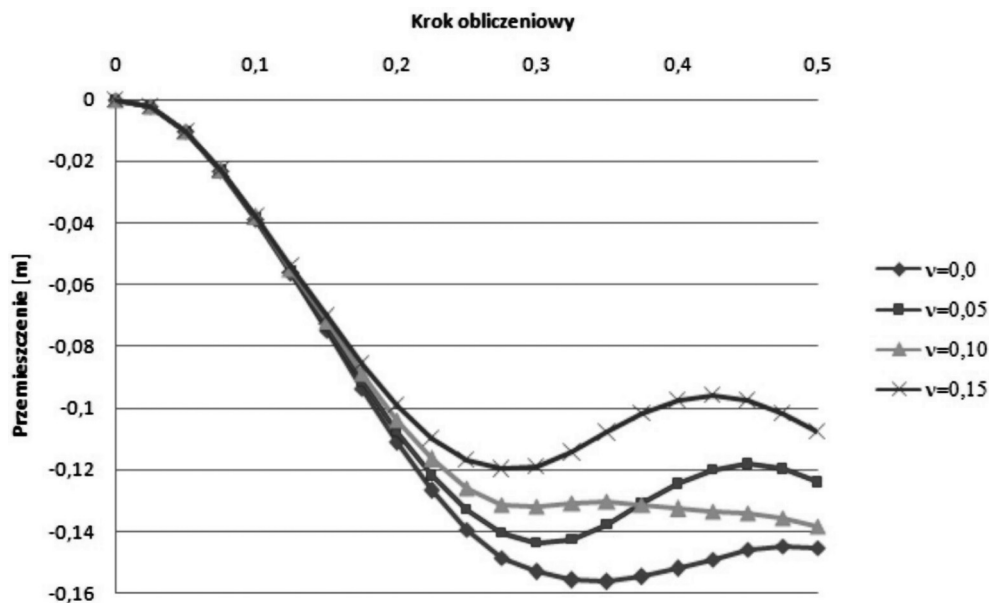
Na podstawie dwóch powyższych wykresów autor uznał za zasadne posługiwanie się modelem CAP do dalszych analiz. Jest to model o największej liczbie parametrów materiałowych, częściowo przyjętych na podstawie analizy dostępnej literatury czy intuicji, dlatego też wykonano tzw. analizę wrażliwości modelu.

#### 4.2. Wpływ parametrów $\nu$ , $R$ , $K$ , $\alpha$ , $u$ na wyniki w modelu CAP

Analizę wrażliwości wykonano dla modelu odzwierciedlającego pierwszy etap badań laboratoryjnych. Na tym etapie w układzie nie występowało kruszywo kolumny, co upraszcza analizę wyników.

Współczynnik Poissona trocin przyjęto na podstawie danych literaturowych [9] jako 0,05. W analizie wrażliwości modelu sprawdzono zmienność przemieszczeń pionowych punktu A również dla współczynników 0,00 oraz 0,15 (wyniki pokazano na rys. 8).

Na podstawie analizy powyżej przedstawionych zależności można wnioskować, iż przyjęcie niezgodnego z rzeczywistym (w granicach błędu 0,05) współczynnika Poissona może skutkować wynikami określonymi z błędem 20%.



Rys. 8. Wpływ współczynnika Poissona na przemieszczenie pionowe punktu A

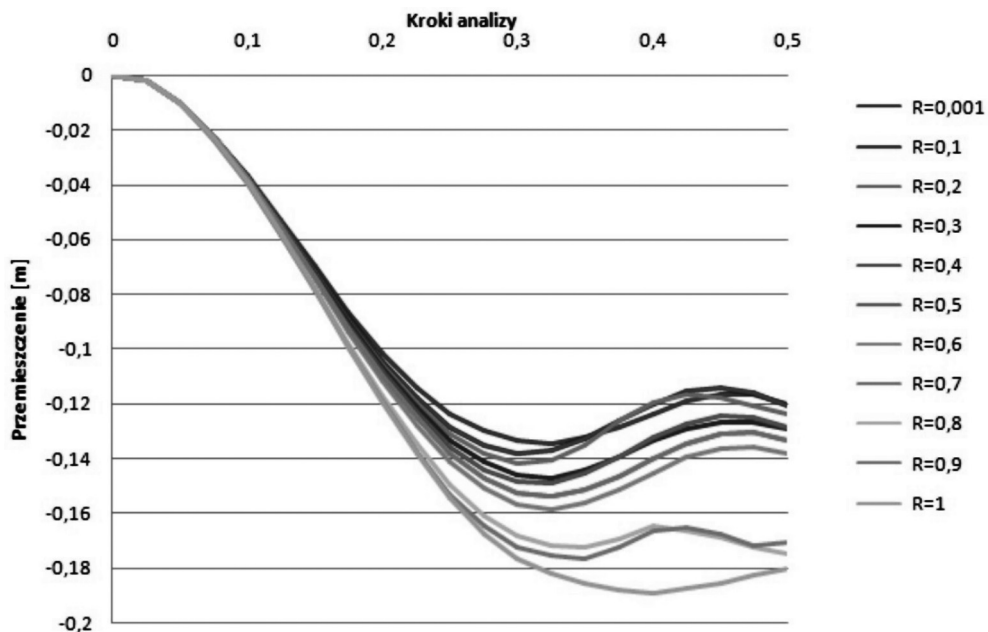
Fig. 8. Influence of Poisson ratio on vertical displacement of point A

Podobnie sprawdzono wpływ promienia ( $R$ ) „czapki”. Wyniki dla części zakresu możliwych do zdefiniowania wartości „ $R$ ” pokazano na rys. 9.

W przypadku promienia  $R$  uzyskane wyniki przemieszczeń pionowych mogą być obciążone błędem do 30% przy nietrafnym przyjęciu/zdefiniowaniu tegoż parametru. Autor zdecydował przyjąć promień  $R = 0,2$ , ponieważ dla takiej wartości uzyskany moduł odkształcenia dla etapu pierwszego pokrył się z modułem z badań edometrycznych.

Według analiz przeprowadzonych przez autora, parametry takie jak: współczynnik  $K$ , wielkość odcinka transmisyjnego  $\alpha$  oraz współczynnik tarcia „ $u$ ” (w zakresie 0,25–0,7), nie mają zasadniczego wpływu na zmienność wyników. Sprawdzone też wpływ wielkości siatki na wyniki przemieszczeń. Obliczenia wykazały, że zmiana wielkości  $ES$  nie wpływa na uzyskane przemieszczenia.

Na podstawie opisanych powyżej aspektów przyjęto wszystkie (oprócz modułu odkształcenia) parametry modelu za stałe. Moduł odkształcenia trocin i gresu dobierano na zasadzie analizy wstecznej, tak aby uzyskać zgodność przemieszczeń pionowych w modelu i laboratorium. Ponieważ model CAP określa się mianem „density dependent model”, czyli modelem zależnym od gęstości, w poniższym punkcie pokazano mapy zmian gęstości na poszczególnych etapach badania.



Rys. 9. Wpływ promienia R na przemieszczenie pionowe punktu A

Fig. 9. Influence of radius R on vertical displacement of point A

#### 4.3. Zmiany modułu odkształcenia i gęstości w modelu CAP

Dla pięciu modeli odzwierciedlających różne etapy badania dobrano moduł odkształcenia trocin i gresu, a wyniki dla trocin zestawiono na rys. 10 (model CAP) i rys. 11 (model liniowosprężysty). Należy podkreślić, iż wysokości zrzutu ubijaka wynosiły:

- dla etapu 1: 1 cm,
- dla etapu 2 i 3: 10 cm,
- dla etapu 7: 120 cm.

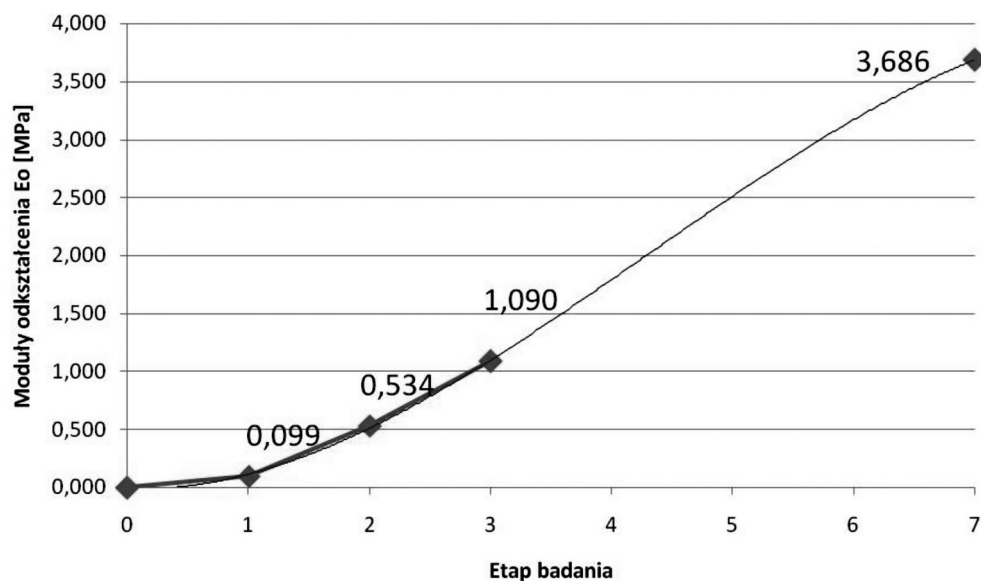
W stanie zero obciążenie było wywołane statycznie.

Odnosząc się do wyników dla modelu CAP, można zauważyć, iż rząd wielkości modułów odkształcenia trocin pokrywa się z wartościami modułów edometrycznych uzyskanych w badaniach (tab. 1).

W modelach CAP następował równomierny wzrost modułu odkształcenia, inna sytuacja miała miejsce w przypadku modelu liniowosprężystego. Tam wzrost modułu był nieznaczny dla początkowych etapów i dopiero na etapie 7 moduł znacząco wzrósł.

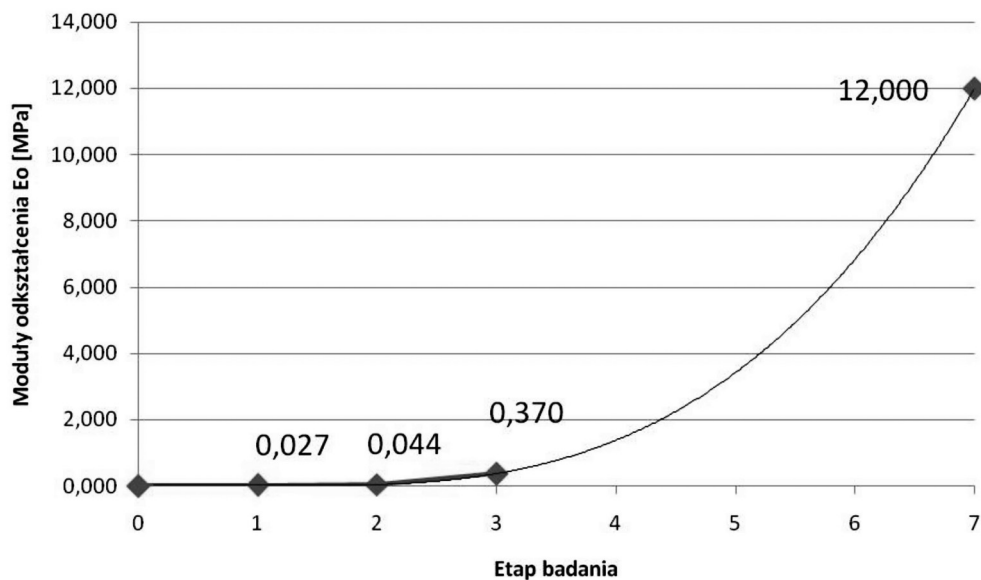
Wartości modułów dla modeli liniowosprężystych były dla wszystkich, oprócz ostatniego etapu, niższe niż w modelach CAP. Charakter zmian (linie trendu widoczne na rysunkach 10 i 11) jest różny. Wartości i charakter zmian wyników dla modelu CAP wydają się być wiarygodne dla wybranych założeń początkowych (parametrów modelu).





Rys. 10. Wzrost modułu odkształcenia trocin. Model CAP

Fig. 10. The change of Young's modulus of sawdust. CAP model



Rys. 11. Wzrost modułu odkształcenia trocin. Model liniowosprężysty

Fig. 11. The change of Young's modulus of sawdust. Elastic model

Wyniki uzyskane w modelu CAP są zbieżne z modułami edometrycznymi, okazuje się jednak, że model jest bardzo wrażliwy na zmianę parametrów (np.  $v$ ,  $R$  czy też wartość spójności) i nawet analogiczne postępowanie w innych przypadkach (np. zwiększenie masy ubijaka) nie gwarantuje wiarygodności wyników.

Kolejnym przeanalizowanym aspektem była zmiana gęstości trocin w wyniku procesu wzmocnienia. Podczas badań laboratoryjnych nie powiodły się próby sondowania statycznego trocin. W modelach numerycznych dla każdego etapu badania przyjęto średnią gęstość objętościową trocin, obliczoną na zasadzie pomiaru zmian objętości gruntu słabego w komorze roboczej. Wartości te zestawiono w tabeli 3.

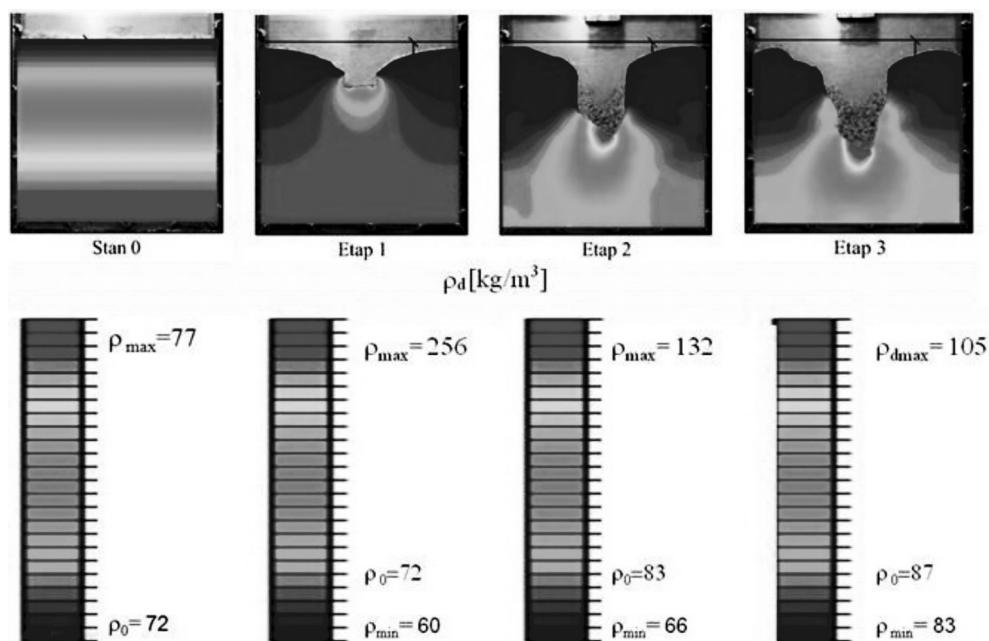
T a b e l a 3

**Gęstości objętościowe trocin  
[kg/m<sup>3</sup>]**

Etap badania	$\rho_{tr}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Stan 0	72,0
Etap 1	72,0
Etap 2	83,0
Etap 3	87,0
Etap 7	121,0

W wyniku procesu ubijania zmienia się gęstość gruntu (rys. 12). Największe zmiany gęstości zaobserwowano tuż pod miejscami spadku ubijaka lub też pod kolumną. Od tych miejsc pod pewnymi kątami w dół rozchodzą się strefy, w których grunt się zagęścił. W górnej części widać rozluźnienie trocin. Miejscowe bardzo duże zmiany zagęszczenia sprawiają, iż grunt słaby stawia większy opór wbijanej kolumnie. Można podejrzewać, iż w momencie osiągnięcia maksymalnego zagęszczenia trocin kolumna zaczyna zwiększać swoją szerokość (średnicę).

Chcąc skalibrować ciągły model procesu ubijania, należy bezwzględnie uwzględnić opisany rozkład zagęszczenia. Obserwacja ta potwierdzać może powstawanie tzw. efektu korka pod kolumną, czyli bardzo zagęszczonego gruntu słabego. Mocne zagęszczenie trocin po uformowaniu kolumny zostało również zaobserwowane podczas badań laboratoryjnych.



Rys. 12. Zmiany gęstości trocin

Fig. 12. Sawdust density changes

## 5. Wnioski

Punktem wyjścia do podjętych przez autora analiz numerycznych były badania modelowe, w których w płaskiej skrzyni formowano kolumny kamienne, rejestrując zmiany jej kształtu i przemieszczenia otaczającego ją słabego podłoża. Rozwinięcie badań, podczas których panował płaski stan odkształcenia do przestrzeni trójwymiarowej, można zrealizować poprzez model numeryczny. Zanim jednak wprowadzi się trzeci wymiar, należy poprawnie skalibrować model numeryczny, tak aby odzwierciedlał badania laboratoryjne. Próbę rozwiązania tego problemu przedstawiono w niniejszej pracy. W przyszłości autor planuje podjęcie próby stworzenia trójwymiarowego modelu numerycznego w celu odwzorowania procesu wbijania kolumny kamiennej.

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że to model CAP daje najbardziej wiarygodne wyniki, przy czym wykazuje on dużą wrażliwość na zmianę opisujących go parametrów (np. współczynnika Poissona, promienia „czapki”, spójności). Nieprecyzyjne przyjęcie wyżej wymienionych parametrów może skutkować określeniem przemieszczeń z ponad 50% błędem. Określenie na podstawie badań wartości współczynnika Poissona czy promienia „czapki” jest możliwe, niemniej jednak wybiega poza zakres podstawowych badań laboratoryjnych.

Zbieżność przemieszczeń pionowych dla modelu numerycznego i badań modelowych uzyskano we wszystkich analizowanych przypadkach. Nie udało się uzyskać dokładnej

ności przemieszczeń poziomych – przykładową rozbieżność wyników przedstawiono w podrozdziale 4.1. Zgodność przemieszczeń pionowych udało się osiągnąć poprzez dobieranie modułów odkształcenia trocin na każdym etapie badania, a uzyskane wyniki dla modelu CAP (rys. 10) odpowiadają modułom ściśliwości otrzymanym z badań edometrycznych (tab. 1).

Odnosząc się do procesu wbijania kolumny, analiza otrzymanych rezultatów pokazała duże zmiany gęstości gruntu słabego tuż pod kolumną. Wyniki w modelu numerycznym i obserwacje poczynione podczas badań modelowych pozwoliły określić obszary, w których następuje dogęszczenie, jak i te, w których grunt wręcz się rozluźnia. Na podstawie modelu numerycznego oszacowano wartości zmian gęstości. Bardzo duże zagęszczenie trocin pod kolumną, widoczne podczas badań laboratoryjnych, jak i w modelu numerycznym, może wskazywać na tzw. zjawisko korka, obserwowane również podczas wykonywania kolumn w skali naturalnej.

Wykonane analizy numeryczne to dla autora pierwsza próba podejścia do tego tematu. Obok szansy na stworzenie modelu procesu wbijania kolumny kamiennej, analiza ukazała trudności, które mogą wystąpić podczas modelowania. Dokładna analiza procesu formowania kolumny w połączeniu z ciągłością modelowania tego procesu wiąże się z koniecznością wyeliminowania dużych odkształceń siatki elementów skończonych. Analizując dostępną literaturę, autor zauważa dwie możliwe drogi dalszego postępowania:

- zastosowanie „remeshingu”, czyli opcji dbającej o jakość siatki na każdym kroku analizy,
- zastosowanie jednej z metod bezsiatkowych, np. MPM (ang. *material point method*), które pozwalają obejść ten problem.

*Obliczenia numeryczne wykonano w ACK CYFRONET Kraków w ramach grantu MNiSW/SGI3700/PŚląska/048/2011.*

## Literatura

- [1] Kanty P., *Analiza doświadczalna procesu formowania wbijanych kolumn kamiennych w warunkach laboratoryjnych*, praca magisterska, Gliwice 2010.
- [2] Helwany S., *Applied Soil Mechanics with Abaqus Application*, Hoboken, New Jersey 2007.
- [3] Ronco C., Oggeri C., Peila D., *Design of reinforced ground embankments used for rockfall protection*, Natural Hazard and Earth System Sciences, 2009.
- [4] Degago S.A., Ebeltoft R., Nordal S., *Effect of rock fall geometries impacting soil cushion: a numerical procedure*, The 12th International Conference of International Association for computer methods and advances in geomechanics (IACMAG), Goa, 1–6.10.2008.
- [5] Dokumentacja program ABAQUS 6.6 i 6.9.
- [6] Clausen J., Andersen L., Damkilde L., *On the differences between the Drucker-Prager criterion and exact implementation of the Mohr-Coulomb criterion in FEM calculations*, Numerical Methods in Geotechnical Engineering, London 2010.
- [7] Wiłun Z., *Zarys geotechniki*, Warszawa 1976, 2007.
- [8] Cudny M., Binder K., *Kryteria wytrzymałości gruntu na ścinanie w zagadnieniach geotechniki*, materiały dostępne online (01.2011): <http://www.pg.gda.pl/~mcud/publications/>.

- [9] Rowe R.K., Soderman K.L., *Reinforced Embankments on Very Poor Foundations*, Geotextiles and Geomembranes, 4/1986, 65-81.
- [10] Kwiecień S., Sękowski J., *Wymiana dynamiczna – praktyczne aspekty zastosowania metody w budownictwie drogowym*, Magazyn Autostrady, 10, 2010, 124-128.
- [11] Kanty P., Sękowski J., *Model tests of phenomena occurring during stone columns formation*, ACEE, Vol. 4, No. 1/2011, 45-54.
- [12] Kanty P., Kwiecień S., *Wpływ energii formowania na kształt kolumn wykonywanych metodą wymiany dynamicznej*, Górnictwo i Geoinżynieria, Rok 35, zeszyt 2/2011, 325-331.
- [13] Gryczmański M., *Metody analizy nośności i osiadania podłoża wzmocnionego kolumnami kamiennymi*, Inżynieria Morska i Geotechnika, 5, 1993, 224-231.
- [14] Kwiecień S., Sękowski J., *Research on the shape of stone columns formed in the ground with the use of dynamic replacement method*, ACEE, No. 2/2008, 65-72.
- [15] Kwiecień S., *Analiza teoretyczna i doświadczalna wzmocnienia podłoża metodą wymiany dynamicznej*, praca doktorska, Gliwice 2008.
- [16] Pisarczyk S., *Grunty nasypowe. Właściwości geotechniczne i metody ich badania*, Warszawa 2004.
- [17] Kwiecień S., *Calibration and verification of numerical model of ground improved by dynamic replacement*, Numerical Methods in Geotechnical Engineering – Benz & Nordal (eds.), Taylor & Francis Group, London 2010.
- [18] Thilakasiri H.S., i in., *Implementation aid for dynamic replacement of organic soils with sand*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 01.2001.