

**KAROL BRZEZIŃSKI**¹⁾

ORCID: 0000-0002-1634-3919

MACIEJ MAŚLAKOWSKI²⁾

ORCID: 0000-0002-2946-1594

KAZIMIERZ JÓZEFIAK³⁾

ORCID: 0000-0002-9123-953X

INFLUENCE OF PARTICLE BREAKAGE ON BULK DENSITY OF DYNAMICALLY COMPACTED COARSE AGGREGATES

WPŁYW PĘKANIA ZIAREN NA GĘSTOŚĆ OBJĘTOŚCIOWĄ DYNAMICZNIE ZAGĘSZCZANYCH KRUSZYW GRUBYCH

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono pierwszą przeprowadzoną metodą elementów dyskretnych (DEM) symulację dynamicznego zagęszczania w badaniu Proctora. Celem wykonanych symulacji było znalezienie odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób, w jaki sposób pękanie ziaren wpływa na gęstość intensywnie zagęszczanej próbki materiału ziarnistego. Porównano wyniki symulacji i badań laboratoryjnych. Symulacje z ziarnami niełamliwymi pozwoliły na wyodrębnienie wpływu zmiany rozkładu wielkości ziaren i wzajemnego ich przemieszczania. Obydwa czynniki odgrywają zasadniczą rolę w zwiększaniu gęstości objętościowej próbki w przypadku badanego kruszywa o nieciągłym uziarnieniu. Symulacje z ziarnami łamliwymi lepiej odtwarzają badanie laboratoryjne pod względem jakościowym i ilościowym. Wnioski pozwalają na lepsze zrozumienie procesu zagęszczania kruszywa, co ma kluczowe znaczenie dla opracowania nowatorskich strategii zagęszczania i minimalizacji wpływu procesów budowlanych na środowisko.

SŁOWA KLUCZOWE: badanie Proctora, Metoda Elementów Dyskretnych; pękanie ziaren, zagęszczenie kruszywa.

ABSTRACT. The work presents the first discrete element method (DEM) simulations of dynamic compaction in the Proctor test. The aim of the simulations was to analyze the influence of particle breakage on the density of intensely compacted granular assembly. Results from simulations and laboratory tests were compared. Simulations with non-breakable aggregates enabled separation of the influence of change in particle size distribution and particle rearrangement. Both factors play an essential role in increasing the bulk density of the sample in the case of the tested (gap-graded) aggregate. Simulations with breakable particles reproduce the laboratory tests results better, both qualitatively and quantitatively. The conclusions provide a better understanding of the aggregate compaction process, which is crucial for developing novel compaction strategies and minimizing the environmental impact of the construction process.

KEYWORDS: aggregate compaction, DEM, Discrete Element Modeling, particle breakage, Proctor test.

DOI: 10.7409/rabdim.024.009

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; karol.brzezinski@pw.edu.pl

²⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; maciej.maslakowski@pw.edu.pl

³⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; kazimierz.jozefiak@pw.edu.pl (✉)

1. WPROWADZENIE

Zagęszczenie materii ziarnistej modyfikuje właściwości objętościowe materiału poprzez zmianę jego struktury [1]. Po zagęszczeniu materiał jest sztywniejszy i mocniejszy, co wynika głównie z większej liczby kontaktów pomiędzy cząstkami [2] oraz wywołanej anizotropii stanu naprężenia [3]. Ta transformacja zachodzi nawet wtedy, gdy cząstki składowe pozostają nienaruszone. Jednak bardzo często zmieniają się także poszczególne cząstki. Jednym z oczywistych przykładów jest kruszenie ziaren, które wpływa na uziarnienie (PSD ang. *particle size distribution*). Kruszenie może również wpływać na proces zagęszczania, przerywając łańcuchy sił i umożliwiając ciaśniejsze upakowanie ziaren [4]. Proces zagęszczania jest często badany przy użyciu metody elementów dyskretnych (DEM, ang. *discrete element method*), zaproponowanej po raz pierwszy przez Cundalla i Stracka [5], ponieważ metoda ta może odwzorować efekty mikro-mechaniczne interakcji poszczególnych cząstek. Jednakże DEM ma również pewne ograniczenia (np. stosunkowo wysoki koszt obliczeniowy). Stąd w literaturze dominują dwa rodzaje symulacji zagęszczania. Pierwszym z nich jest zagęszczanie statyczne (kompresja), które także może obejmować proces pęknięcia (np. [4, 6–8]). Drugim jest dynamiczne zagęszczanie bez rozbijania cząstek (poprzez uderzenia [9–11], wibracje [12–14], czy prasę żyratorową [15–17]).

Istnieje kilka powodów, dla których nie uwzględnia się pęknięcia cząstek w symulacjach zagęszczania dynamicznego. Po pierwsze, zagęszczanie dynamiczne zajmuje więcej czasu, dlatego korzystne jest minimalizowanie złożoności symulacji, aby zachować akceptowalny czas obliczeń. Co więcej, metody symulacji pęknięcia ziaren, które są wydajne obliczeniowo (oparte na podmianie cząstek), zwykle powodują utratę masy [18] lub wprowadzają nadmierną energię ze względu na znaczne nakładanie się cząstek [7]. W niniejszej pracy został wykorzystany niedawno opracowany algorytm kruszenia cząstek [19], który pozwala na rozbijanie cząstek bez utraty masy lub wprowadzania dodatkowej energii wynikającej z ich nakładania. Algorytm jest zaimplementowany w otwartym oprogramowaniu Yade [20]. Dzięki temu możliwe było zbadanie znaczenia modelowania kruszenia cząstek w symulacjach badania Proctora [21].

Podczas badania Proctora grunt jest zagęszczany przy użyciu energii standardowej. Najlepszy efekt zagęszczenia uzyskuje się przy optymalnej wilgotności gruntu/kruszywa

1. INTRODUCTION

Granular matter compaction modifies the bulk properties of material by changing its structure (fabric) [1]. After compaction, the material is stiffer and stronger, which is mainly attributed to the greater number of contacts between particles [2] and induced stress anisotropy [3]. This transformation occurs even if the constituent particles remain intact. However, very often individual particles change as well. One of the obvious examples is grain crushing, which influences particle size distribution (PSD). It may also affect the compaction process by breaking strong force chains and allowing further rearrangement [4]. The compaction process is often studied using the discrete element method (DEM), first introduced by Cundall and Strack [5], because it can capture micro-mechanical effects from individual particle interactions. However, this method also has some limitations (e.g. relatively high computational cost). Hence, two kinds of compaction simulations dominate in literature. The first type is static compaction (compression), which can also include the breakage process (e.g. [4, 6-8]). The second is dynamic compaction without particle breakage (by impact [9-11], vibration [12-14] or gyratory press [15-17]).

There are several reasons for not including particle breakage in simulations of dynamic compaction. Firstly, dynamic compaction takes more time. Thus, it is favorable to minimize the complexity of the simulation to maintain reasonable simulation time. Furthermore, grain breakage simulation methods that are computationally efficient (based on particle replacement) usually cause loss of mass [18] or introduce excessive energy due to the significant particle overlapping [7]. The authors of this work utilize a recently developed particle breakage algorithm [19] that allows for particle breakage without loss of mass or introduction of additional energy from particle overlapping. The algorithm is implemented in open access Yade software [20]. Hence, the authors were able to investigate the importance of modeling particle crushing in simulations of the Proctor [21] compaction test.

During the Proctor compaction test, the soil is compacted with standard energy. The best compaction effect is obtained for soil with optimal moisture, and this effect is denoted as maximum dry density. However, it should be noted that this maximum is related to specific compaction energy. Some standards require higher density even at the construction site [22]. Higher density can be obtained by

(maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego). Należy jednak zauważyć, że maksimum to jest związane z normową energią zagęszczania. Niektóre standardy wymagają większej gęstości nawet na budowie [22]. Większą gęstość można uzyskać, stosując wyższą energię [23]. Niemniej jednak może wiązać się to z „efektem ubocznym” polegającym na kruszeniu cząstek. Czy jest to tylko efekt uboczny, czy też istotny czynnik przyczyniający się do osiągnięcia satysfakcjonującego zagęszczenia kruszywa? Na tak postawione pytanie pragną odpowiedzieć autorzy niniejszej pracy. Efekt kruszenia cząstek imitowano w badaniu na dwa sposoby. Pierwszy polegał na symulowaniu zagęszczania materiału o różnym uziarnieniu, drugi – na bezpośredniej symulacji kruszenia ziaren. Warto podkreślić, że w niniejszym badaniu przedstawiono pierwszą symulację DEM dynamicznego (udarowego) zagęszczania w aparacie Proctora. Co więcej, jawnie symulowano pękanie cząstek przy użyciu niedawno opracowanego algorytmu [19]. Wyniki te stanowią motywację do dalszego rozwijania empirycznych i numerycznych modeli zagęszczania. Modele takie będą stosowane w przyszłości w celu minimalizacji energochłonności procesu budowy, a co za tym idzie – minimalizacji oddziaływania na środowisko.

2. MATERIAŁY I METODYKA

2.1. UWAGI OGÓLNE

Eksperyment składał się z dwóch głównych faz: testów laboratoryjnych i symulacji numerycznej. Główna idea planu badawczego opierała się na założeniu, że niezależnie od energii zagęszczania, w procesie zagęszczania następuje pewne kruszenie. Trudno jest rozróżnić, czy postęp zagęszczania jest związany z ciągłym przemieszczaniem ziaren czy też z ich pękaniem. W symulacji tę samą próbkę można zbadać dwukrotnie, z możliwością pękania i bez. Takie podejście powinno zatem umożliwić oddzielenie wpływu pękania ziaren od wpływu samego ich wzajemnego przemieszczania.

2.2. BADANIA LABORATORYJNE

2.2.1. Materiał

Badanym materiałem było grubo łamane kruszywo granitowe (zakres uziarnienia od 4 mm do 25 mm). W pierwszej kolejności zmierzono jego podstawowe właściwości, gęstość, uziarnienie i kształty cząstek. Wyznaczona gęstość właściwa kruszywa granitowego wyniosła $2,504 \text{ g/cm}^3$.

applying higher energy [23]. Nonetheless, it may come with a “side effect” consisting in particle crushing. Is particle crushing only a side effect, or is it required to obtain satisfactory soil compaction? This is the knowledge gap that the authors intend to bridge by this work. The effect of particle crushing was imitated in two ways. The first method consisted in simulating the compaction of material with different starting size distributions. The second consisted in explicit simulation of grain crushing. It is worth noting that the presented study comprises the first DEM simulation of the dynamic (impact) compaction in the Proctor test. Moreover, particle breakage was explicitly simulated using a recently developed algorithm [19]. The presented results give the motivation for further development of empirical and numerical compaction models. Such models will be used in the future to minimize energy consumption in the construction process and, consequently, minimize environmental impact.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. GENERAL REMARKS

The experiment consisted of two major phases: laboratory testing and numerical simulation. The principal idea behind this research plan was based on the assumption that regardless of the compaction energy, some crushing occurs in the compaction process. It is difficult to distinguish whether progress in compaction is related to the continuous rearrangement of the particles or particle breakage. In the simulation, the same set of modeled particles can be tested twice with and without breakage allowed. Thus, it should facilitate separation of the effects of pure rearrangement from the influence of particle breakage.

2.2. LABORATORY TESTING

2.2.1. Material

The tested material was coarse crushed granite aggregate (particle size range between 4 mm and 25 mm). Its basic properties, density, PSD, and shapes of the particles were measured first. The determined particle density of the granite aggregates equals 2.504 g/cm^3 . It is slightly less than the typical value for minerals of which the rock is composed (2.650 g/cm^3) and this difference should be attributed to the internal porosity of aggregates. The mean PSD of all the samples before the compaction test is presented in Fig. 1, accompanied by a photograph of typical gains. The shape of the particles can be measured by

Jest to nieco mniej niż typowa wartość dla minerałów wchodzących w skład skały ($2,650 \text{ g/cm}^3$). Różnicę tę należy przypisać porowatości wewnętrznej kruszywa. Średnią krzywą uziarnienia wszystkich próbek przed testem zagęszczania przedstawiono na Rys. 1 wraz ze zdjęciem typowych ziaren. Kształt cząstek można mierzyć różnymi metodami, w tym skanowaniem 3D [24], uproszczoną fotogrametryczną rekonstrukcją powierzchni [25, 26] lub pełną rekonstrukcją całych ziaren [27, 28]. Przygotowano pełny model trzech reprezentatywnych ziaren metodą fotogrametryczną opisaną w [27].

2.2.2. Procedura zagęszczania

Niedawno zaproponowano badanie Proctora jako łatwą alternatywę do badania właściwości kruszywa pod względem odporności na pękanie [29]. W niniejszej pracy jednocześnie badano kruszenie cząstek i jego wpływ na zagęszczenie materiału. Cztery próbki zbiorcze zagęszczono aparatem Proctora [30]. Średnica i wysokość formy wynoszą odpowiednio 116 mm i 120 mm. Każdą próbkę zagęszczano poprzez uderzanie ubijakiem o średnicy 50 mm i masie 2,50 kg, spadającym z wysokości 305 mm. Próbkę zagęszcza się warstwami zgodnie ze standardową procedurą, a ubijak jest zrzucany 25 razy na każdą warstwę. W przypadku trzech próbek zmodyfikowano energię zagęszczania, zwiększając liczbę uderzeń ubijaka. Zatem, w zależności od liczby próbek, zastosowano 25, 50, 75 lub 125 uderzeń na warstwę. Należy zaznaczyć, że dla tak grubego kruszywa zalecana jest większa wersja aparatu. Niemniej jednak autorzy zminimalizowali objętość próbki, aby zmniejszyć koszt obliczeniowy późniejszych symulacji DEM. Ponadto z analizy wyłączono wpływ wilgoci, gdyż ma ona niewielkie znaczenie w przypadku zagęszczania kruszywa grubego. Zmierzono uziarnienie każdej próbki przed i po badaniu Proctora, aby ocenić wpływ energii zagęszczania na rozdrabnianie kruszywa.

2.3. SYMULACJE DEM

2.3.1. Uwagi ogólne

Aby zbadać wpływ pękania cząstek na proces dynamicznego zagęszczania kruszywa, przeprowadzono dwa rodzaje symulacji DEM przy użyciu oprogramowania Yade [20]. W pierwszym z nich pośrednio uwzględniono efekt kruszenia, symulując zagęszczanie materiału o różnym uziarnieniu. W drugim modelu bezpośrednio zamodelowano kruszenie cząstek. Geometria i ogólny przebieg symulacji odzwierciedlają procedurę laboratoryjną badania Proctora.

various methods, including 3D scanning [24], simplified photogrammetric surface reconstruction [25, 26] or full reconstruction of the whole grains [27, 28]. The authors prepared full models of three representative grains, using the photogrammetric method described in [27].

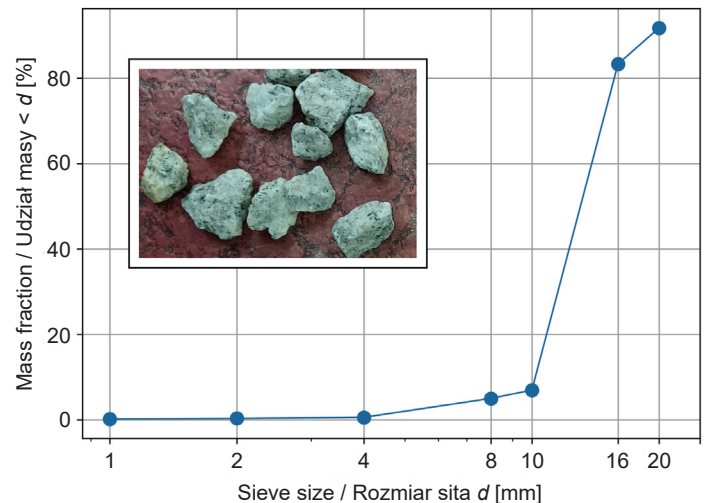


Fig. 1. Initial particle size distribution of crushed granite aggregates (horizontal axis in logarithmic scale)

Rys. 1. Początkowy rozkład wielkości cząstek łamanego kruszywa granitowego (oś pozioma w skali logarytmicznej)

2.2.2. Compaction procedure

The Proctor test has been recently proposed as an easy alternative for investigation of performance of crushed stone and gravel in terms of fracture resistance [29]. In this work, particle crushing and its influence on material compaction was studied simultaneously. Four aggregate samples were compacted in a Proctor apparatus [30]. The diameter and height of the mold are 116 mm and 120 mm, respectively. Every sample was compacted by dropping a hammer with diameter of 50 mm and weight of 2.50 kg from the height of 305 mm. In the standard procedure, the sample is compacted in layers and each layer is subjected to 25 blows of the hammer. In the case of three samples, compaction energy was modified by increasing the number of hammer impacts. Thus, depending on the sample number, 25, 50, 75, or 125 hammer blows were applied per layer. It should be noted that for the coarse aggregate used, a bigger version of the apparatus is recommended. Nevertheless, the authors intended to minimize the sample volume to reduce the computational cost of later DEM simulations. Furthermore, the influence of moisture was excluded from the analysis, since it has minor importance

2.3.2. Kalibracja parametrów materiałowych

Model DEM skalibrowano tak, aby odzwierciedlał materiał wykorzystany do badań laboratoryjnych Proctora (grube kruszywo łamane granitowe). Do budowy modeli 3D wybrano reprezentatywne grubsze ziarna. Ziarna modelowano jako sztywne skupienia przenikających się ze sobą sfer (dalej nazywane bryłkami, z ang. *clump*), przybliżając nieregularne kształty ziaren. Wybrane do kalibracji ziarna zostały następnie zbadane w laboratorium w celu oszacowania ich wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz sztywności kontaktu (zależności przemieszczenie–siła). Na koniec zmierzono kąt stoku naturalnego w laboratorium i porównano z symulacją DEM. Procedurę kalibracji modelu można podsumować w następujących krokach:

1. Trójwymiarowe modele numeryczne losowo wybranych reprezentatywnych ziaren otrzymano za pomocą pomiarów fotogrametrycznych [27]. Procedura ta pozwala na uzyskanie trójwymiarowej rekonstrukcji kształtu z wielu zdjęć obiektu (zielona siatka na Rys. 2. przedstawia zrekonstruowaną powierzchnię ziaren).
2. Do analizy DEM kształty ziaren aproksymowano za pomocą bryłek złożonych z nakładających się na siebie sfer, korzystając z programu CLUMP [31]. Następnie bryłki powiększono, tak aby ich objętość odpowiadała zmierzonej objętości modelowanych ziaren. Wynik aproksymacji pokazano na Rys. 2.

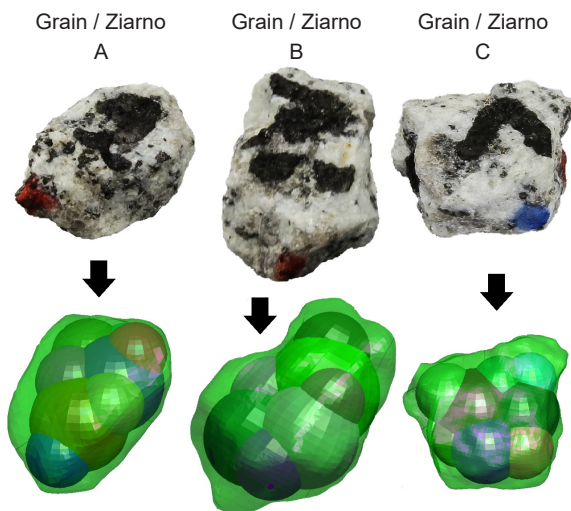


Fig. 2. 3D models (lower row) of 3 particles (upper row) approximated by clumps, which were later used in DEM simulations (grains were painted to improve SfM and postprocessing performance)

Rys. 2. Modele 3D (dolny rząd) trzech części (górny rząd) aproksymowane przez bryłki wykorzystane później w symulacjach DEM (ziarna pomalowano w celu usprawnienia procedury fotogrametrycznej)

in the case of compaction of coarse aggregates. Particle size distributions of each sample were measured before and after the Proctor test to evaluate the influence of compaction energy on aggregate comminution.

2.3 DEM SIMULATION

2.3.1. General remarks

In order to study the influence of particle breakage on the process of dynamic compaction of aggregate, two kinds of DEM simulations were conducted using the Yade software [20]. In the first one, the crushing effect was taken into account implicitly by simulating the compaction of material with different size distributions. In the second one, particle crushing was modeled explicitly. The geometry and general workflow reflect the laboratory procedure of the Proctor test.

2.3.2. Material calibration

The developed DEM model was calibrated to the material used in Proctor laboratory tests (coarse crushed granite aggregate). Representative coarser grains were chosen in order to build 3D models. Larger grains were represented by “clumps”, created by best filling of the models with overlapping spheres. The granite aggregate grains chosen for calibration were later crushed in laboratory in order to estimate their uniaxial compression strength and displacement–force relationship. Finally, angle of repose was measured in laboratory and compared with DEM simulation. Model calibration procedure can be summarized in the following steps:

1. Three-dimensional numerical models of randomly chosen representative grains were obtained via structure from motion (SfM) procedure [27]. This procedure allows one to obtain 3D shape reconstruction from multiple images of an object (green mesh in Fig. 2 represents the reconstructed grain surface).
2. Grain shapes for DEM analysis were approximated using clumps composed of overlapping spheres using CLUMP software [31]. Next, the clump grains were scaled up to match the volume of the real grains. Models of three grains approximated by spheres are shown in Fig. 2.

3. Kalibrację w skali ziaren przeprowadzono poprzez porównanie laboratoryjnego i symulacyjnego testu jednoosiowego ściskania. Uzyskane parametry obejmowały wytrzymałość na ściskanie i sztywność bryłek. Badanie laboratoryjne polegało na ściskaniu ziarna pomiędzy dwiema sztywnymi płytami stalowymi. Obciążenie przykładano stopniowo. Po każdym przyroście obciążenia rejestrowano przemieszczenie i obciążenie całkowite. Następnie przeprowadzono symulację testu dla poszczególnych bryłek. Porównanie wyników badań laboratoryjnych i symulacyjnych dla ziaren A, B i C przedstawiono na Rys. 3. W chwili pęknięcia ziarna następuje gwałtowny spadek siły obciążającej w symulacji i duży przyrost odkształcenia w doświadczeniu. Tego ostatniego nie pokazano na rysunku. Wystąpienie uszkodzenia jest oznaczone czerwoną gwiazdką na końcu wykresu.

3. Grain-scale calibration was performed by comparison of laboratory and simulation uniaxial compression test. The obtained parameters included compression strength and stiffness of clumps. The laboratory test involved compressing a grain between two steel rigid plates. The load was applied incrementally. Displacement and total load were recorded after every loading increment. Subsequently, the test was simulated for individual clumps. Comparisons between laboratory and simulation test results for grains A, B and C are presented in Fig. 3. The moment of grain breakage results in a sudden drop in the loading force in the simulation and a large strain increment in the laboratory test. The latter is not shown in the figure. Occurrence of breakage is denoted with a red star at the end of the graph.

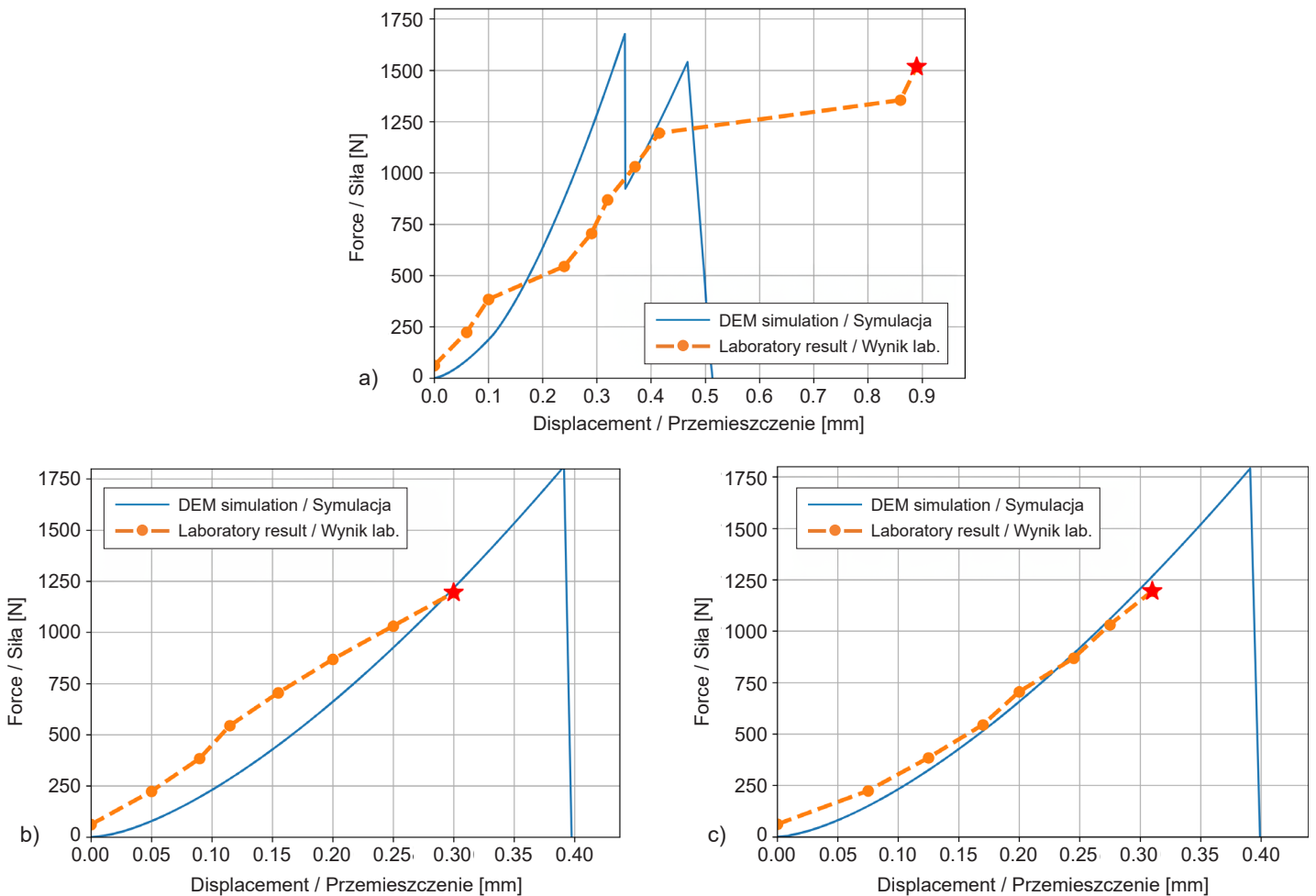


Fig. 3. Comparison of laboratory and simulation results for: a) grain A, b) grain B, c) grain C
Rys. 3. Porównanie wyników laboratoryjnych i symulacyjnych: a) ziarno A, b) ziarno B, c) ziarno C

4. Kalibrację w skali makro przeprowadzono poprzez porównanie kąta stoku naturalnego. W laboratorium utworzono stożkowy stos kruszywa poprzez powolne podnoszenie cylindra wypełnionego materiałem. Wysokość stosu zmierzona w teście wyniosła 12,5 cm. Podobną symulację badania początkowego rozkładu wielkości cząstek przeprowadzono stosując DEM, zakładając różne współczynniki tarcia. Wyniki przedstawiono na Rys. 4. Do symulacji DEM przyjęto współczynnik tarcia $\mu = 0,2$.

4. Macro-scale calibration was performed by comparison of the angle of repose. In laboratory, a cone-shaped pile of aggregate was created by slowly raising a funnel filled with the material. The height of the pile measured in the test was 12.5 cm. Similar test simulation for the initial particle size distribution was conducted using DEM, assuming different friction coefficients. Results are shown in Fig. 4. Friction coefficient $\mu = 0.2$ was chosen for DEM simulations.

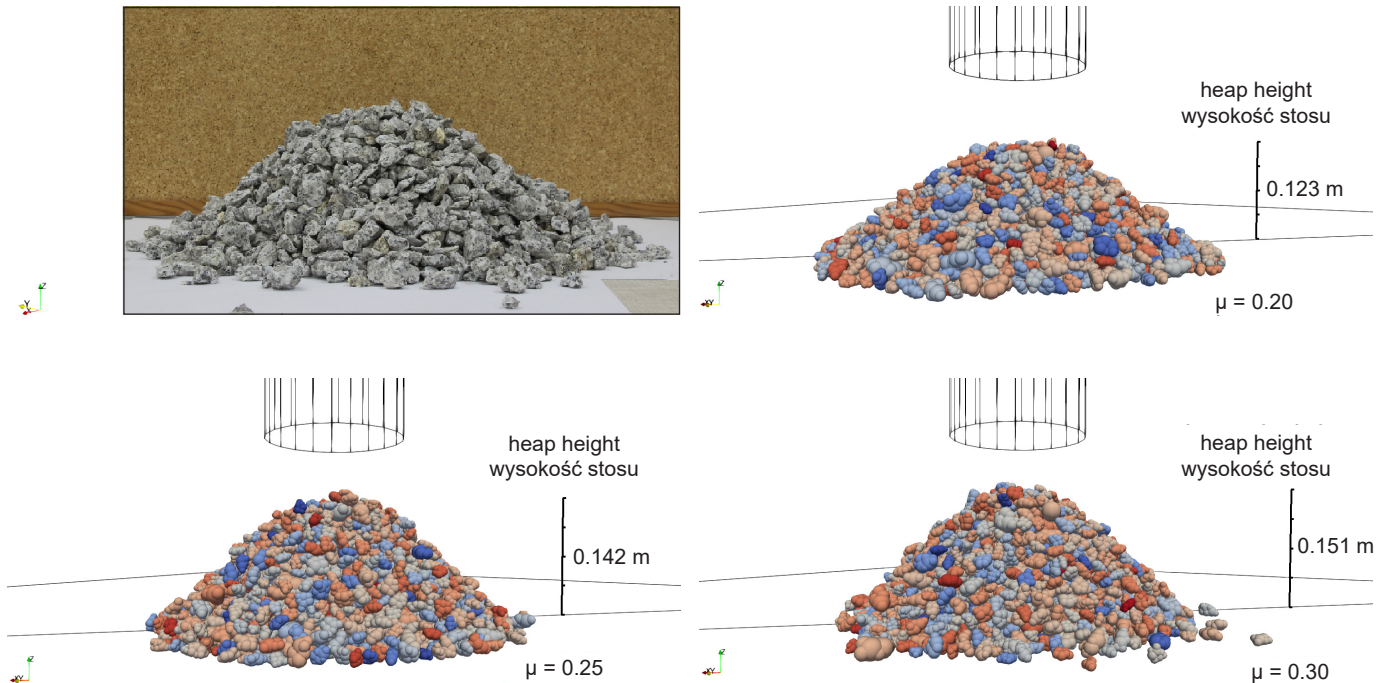


Fig. 4. Friction coefficient calibration μ
Rys. 4. Kalibracja współczynnika tarcia μ

2.3.3. Geometria modelu

Trzy główne elementy opracowanego modelu DEM to forma, ubijak i kruszywo. Forma jest graniastosłupem o podstawie dwudziestokąta foremego, co ma przybliżać kształt cylindryczny. Szerokość formy wynosi 116 mm. Jednakże wysokość wynosi 3,0 m, ponieważ w początkowej fazie symulacji, gdy generowane jest losowe upakowanie ziaren, wymagana jest duża objętość. Graniastosłup zbudowany jest z trójkątnych ścianek (fasetek). Ubijak modelowany jest graniastosłupem o podstawie w kształcie dziesięciokąta. Szerokość ubijaka wynosi 50 mm, a wysokość 100 mm. Jego fasetki połączone są w jedną sztywną bryłę o łącznej masie 2,5 kg. Ubijak

2.3.3. Model geometry

The developed DEM model consisted of the three major components: the mold, the hammer, and the aggregate. The mold is a right prism with twenty joining edges, to approximate the cylinder. The width of the mold is 116 mm. However, the height is 3.0 m, because a large volume is required in the initial phase of simulation when random packing of grains is generated. The prism was composed of fixed in-space triangular facets. The hammer is a right prism with ten joining edges. The width of the hammer is 50 mm, and the height is 100 mm. Its facets are clumped into a single body with a prescribed mass of 2.5 kg. The hammer is a dynamic rigid body with a single degree of

podczas spadania posiada tylko jeden stopień swobody (tylko ruch pionowy jest podatny na działanie grawitacji i sił zewnętrznych).

Ziarna kruszywa modelowano za pomocą stosunkowo prostych bryłek, składających się z dwóch do ośmiu kul (Rys. 5). Jak wykazali Suhr i Six, zachowanie materiału ziarnistego można dobrze odtworzyć nawet w przypadku bardzo uproszczonych grudek, jeśli zastosuje się dostatecznie złożone prawo kontaktu [32]. Ziarna oznaczone A, B i C na Rys. 5 zaprojektowano podczas procedury kalibracji (rozdział 2.2.1). Skala kolorów na Rys. 5 odzwierciedla proporcje wielkości między sferami, z których składają się bryłki. Bryłki są dodawane do symulacji, a następnie poszczególne ziarna są skalowane aż do osiągnięcia wymaganego uziarnienia. Rozmiar cząstki definiuje się jako średnicę zastępczą (średnicę kuli o tej samej masie i gęstości co ziarno). Bardziej złożone bryłki (dolny rząd na Rys. 5) wykorzystano do modelowania ziaren większych niż 10 mm. Mniejsze ziarna reprezentowane są jedynie przez najprostsze bryłki (górny rząd na Rys. 5). W ten sposób uniknięto dodawania do symulacji bardzo małych sfer, co drastycznie zwiększyłoby czas obliczeń. Z tego samego powodu nie symulowano ziaren mniejszych niż 4 mm. W związku z tym uziarnienie w symulacji nie odpowiada dokładnie wynikom uzyskanym w laboratorium.

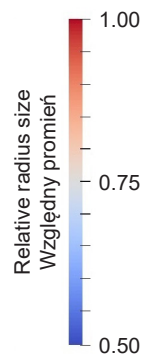
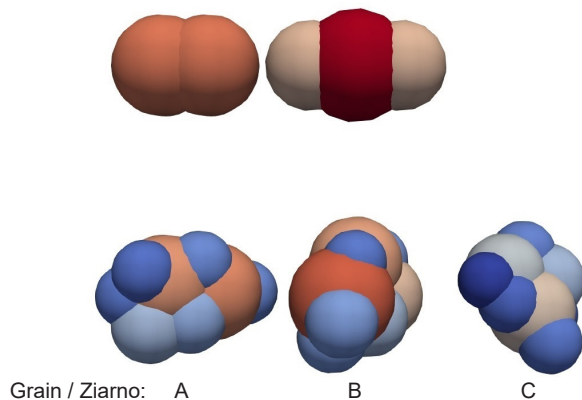


Fig. 5. Shapes of clumps representing aggregate grains in simulation and the relative proportion between the radii of clump members
Rys. 5. Kształty bryłek reprezentujących ziarna kruszywa w symulacji oraz względna wielkość składowych sfer

freedom. Thus, only its vertical movement is subjected to gravity and external forces.

Aggregate grains are modeled with relatively simple clump shapes composed of two to eight spheres (Fig. 5). Nevertheless, Suhr and Six showed that the behavior of granular material could be well reproduced even with very simplified clumps if sophisticated contact law is utilized [32]. Grains annotated A, B and C in Fig. 5 were created based on calibration (section 2.2.1). The color scale in Fig. 5 shows the relative proportion between radii of clump members. Clumps are added to the simulation, and then individual grains are scaled until the prescribed PSD is reached. The size of the particle is defined as an equivalent diameter (diameter of a sphere with the same mass and density as the grain). The more complex clump shapes (lower row in Fig. 5) were used to model grains larger than 10 mm. Smaller grains are represented only by the simplest clumps (top row in Fig. 5). Such assumptions enabled the authors to avoid adding very small spheres to the simulation, which would drastically increase computational cost. For the same reason, grains smaller than 4 mm were not simulated. Hence, the prescribed PSD in simulation did not exactly match the results obtained in laboratory.

2.3.4. Właściwości symulowanego materiału

W symulacji wykorzystano prawo kontaktowe Hertza-Mindlina [33]. Sztywność kontaktowa zależy od parametrów sprężystych materiału (modułu Younga E i współczynnika Poissona ν). Przyjęte prawo uwzględnia nieliniową sprężystość w kierunku normalnym, zgodnie z rozwiązaniem Hertza dla dwóch ciał nieprzylegających [20]. W kierunku stycznym zależność pomiędzy siłą ścinającą

2.3.4. Material properties for simulation

The Hertz-Mindlin contact law was used in the simulation [33]. Contact stiffness depends on the elastic parameters of the material (Young's modulus E and Poissons ratio ν). The adopted law includes nonlinear elasticity in the normal direction, following the Hertz solution for two non-conforming bodies [20]. In the shear direction, the relationship between the shear force and tangential

a przemieszczeniem stycznym jest liniowo sprężysta. Prawo Coulomba reguluje opór poślizgu, a współczynnik tarcia wynosi $\tan(f_a)$, gdzie f_a oznacza kąt tarcia wyrażony w radianach. Ponadto uwzględniono opór toczenia. Technika ta imituje kanciastość i szorstkość ziaren [34], wprowadzając dodatkowe momenty działające na stykające się cząstki. Przyłożony moment przeciwdziała względnemu obrotowi cząstek proporcjonalnie do jego wielkości (zależność liniowa kontrolowana przez sztywność obrotową k_{rot}). Maksymalny moment jest ograniczony przez bezwymiarowy współczynnik η wg poniższego wzoru:

$$M_{pl} = \eta R_m F_n, \quad (1)$$

gdzie:

M_{pl} – maksymalny moment,

η – współczynnik bezwymiarowy,

R_m – średni promień oddziałujących cząstek,

F_n – siła normalna pomiędzy cząstkami.

Aby realistycznie symulować wpadanie ziaren do formy, należy zastosować tłumienie. W symulacjach numerycznych możliwe są różne rodzaje tłumienia, takie jak niefizyczne tłumienie „lepkie” stosowane do wszystkich poruszających się ciał, tłumienie obejmujące specjalne warunki brzegowe [35], czy na styku ziaren [20]. Zastosowano tłumienie na styku ziaren, definiowane za pomocą współczynnika restytucji. Przyjęty normalny współczynnik restytucji e_n wynosi 0,50 w przypadku kontaktów między ziarnami, co odpowiada wartościom znanym z [14]. W przypadku styku ziarna ze ścianką (fasetką) współczynnik wynosi $e_n = 0,25$, co ma odzwierciedlać fakt, że w eksperymencie energia uderzenia jest nie tylko rozpraszana, ale także przenoszona na zewnątrz aparatu w postaci fali sprężystej (drgań). Przyjęte parametry podsumowano w Tabl. 1.

displacement is linear elastic. The Coulomb law controls slip resistance, and the friction coefficient is $\tan(f_a)$, where f_a is friction angle in radians. Furthermore, rolling resistance is included in contact properties. This technique imitates grain angularity and roughness [34] by providing additional moments acting on the contacting particles. The applied moment opposes the relative rotation of the particles proportionally to its magnitude (linear relationship controlled by rotational stiffness k_{rot}). The maximum moment is limited by a dimensionless coefficient η , with the following relationship:

$$M_{pl} = \eta R_m F_n, \quad (1)$$

where:

M_{pl} – maximum bending moment,

η – coefficient controlling maximum bending moment,

R_m – mean radius of contacting particles,

F_n – normal force acting between particles.

In order to realistically simulate the grains falling into the mold, damping should be applied. In numerical simulations, various types of damping are possible, such as non-physical “viscous” damping applied to all moving bodies, damping incorporating special boundary conditions [35], or damping at contact [20]. The authors applied damping at contact between grains, defined in terms of the coefficient of restitution. The adopted normal coefficient of restitution e_n equals 0.50 for grain-grain contact and corresponds to the values reported in the literature [14]. However, for the grain-facet contacts, $e_n = 0.25$ was applied to reflect the fact that in the experiment the impact energy is not only dissipated, but also transferred outside the apparatus as elastic wave (vibration). The adopted parameters are summarized in Table 1.

Table 1. Material and contact parameters adopted for simulation

Tablica. 1. Parametry materiałowe i kontaktowe przyjęte do symulacji

Body type Rodzaj elementu	Density / Gęstość [kg/m ³]	E [GPa]	ν [-]	f_a [rad]	k_{rot} [Nm/rad]	η [-]
Grains (granite) Ziarna (granit)	2504	5.0	0.3	0.1974	200.0	0.4
Mold and hammer (steel) Forma i ubijak (stal)	–	210.0	0.3			

2.3.5. Pękanie ziaren

Pękanie cząstek jest zwykle modelowane metodą pękających więzów między sferami lub podstawiania mniejszych fragmentów [4]. W pierwszym podejściu ziarna składają się z kulek połączonych wiązaniami o ograniczonej wytrzymałości (np. wiązaniem równoległym dostępnym w programie PFC3D [36] czy modelu spójnych cząstek [37] zaimplementowanym w Yade [20]). Cząstka może pęknąć, gdy oddziaływania między kulami przekraczają siłę ich wiązań. Wiązanie może z czasem ulegać stopniowej degradacji, uwzględniając historię obciążenia i zmęczenie [38]. Główną wadą tej metody jest wysoki koszt obliczeniowy symulacji. W drugim podejściu cząstki są zastępowane mniejszymi fragmentami po osiągnięciu założonego kryterium wytrzymałości. Metodę tę stosuje się do ziaren o różnych kształtach, np. sfer [4, 7, 9], bryłek [19, 40], oraz wielościanów [41-43]. Koszt obliczeniowy może być stosunkowo niski w przypadku cząstek kulistych lub bryłek. Niemniej jednak większość algorytmów dla takich cząstek powoduje utratę masy podczas symulacji lub wprowadza nadmierną energię potencjalną w wyniku nakładania się nowych fragmentów cząstek. Szerszy opis różnych technik modelowania pęknięć można znaleźć w artykułach przeglądowych [44-46].

W symulacji dynamicznego zagęszczenia kruszywa należy unikać obu powyższych problemów. Dlatego wykorzystano niedawno opracowany algorytm rozbijania bryłek, który zachowuje masę w symulacji bez wprowadzania nadmiernej energii potencjalnej [19]. W tym podejściu część bryły zostaje zastąpiona mniejszymi kulkami po osiągnięciu kryterium wytrzymałości. Jako wskaźnik wyężenia cząstki przyjęto tensor naprężenia Love'a-Webera:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{c=1}^{n_c} l_i^c \cdot f_j^c, \quad (2)$$

gdzie:

n_c – liczba aktywnych kontaktów c ,

V – objętość cząstki,

f^c – siła działająca w danym kontakcie,

l^c – wektor kontaktu (od środka masy cząstki do punktu kontaktu).

Wzór (2) obowiązuje dla samodzielnych cząstek (np. sferycznych). W przypadku bryłek obliczana jest korekta naprężeń uwzględniająca brak oddziaływań między sztywnymi elementami składowymi bryłki. Uzyskane naprężenie

2.3.5. Particle breakage

Particle breakage is usually modeled by the bonded sphere method and fragment replacement method [4]. In the first approach, grains are composed of spheres connected by bonds of limited strength (e.g. parallel bond in PFC3D software [36] or Cohesive Particle Model [37] implemented in Yade [20]). A particle can break when interactions between spheres exceed the strength of their bonds. The bond may gradually degrade over time, incorporating load history and fatigue [38]. The major disadvantage of this method is the high computational cost of the simulation. In the second approach, particles are replaced by smaller fragments after the assumed strength criterion is reached. This method is used for grains of different shapes, such as spheres [4, 7, 39], clumps [19, 40], or polyhedral [41-43]. Computational cost can be relatively low in the case of spherical particles or clumps of spheres. Nevertheless, most of the algorithms for such particles display loss of mass during the simulation or introduce excessive potential energy due to overlapping of new particle fragments. Further descriptions of different techniques of breakage modeling can be found in review papers [44-46].

In the dynamic soil compaction simulation, both the above-mentioned issues must be avoided. Hence, the recently developed clump breakage algorithm that conserves mass in the simulation without introducing excessive potential energy was utilized [19]. In this approach, a portion of the clump is replaced by smaller spheres when the strength criterion is reached. The Love-Weber stress tensor is adopted as the indicator of particle stress:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{c=1}^{n_c} l_i^c \cdot f_j^c, \quad (2)$$

where:

n_c – number of all active contacts c ,

V – particle volume,

f^c – contact force acting on the particle in contact point,

l^c – contact position vector (from particle's mass center to contact point).

Formula (2) is valid for standalone particles (such as spheres). In the case of clump members, a stress correction is computed that accounts for the lack of internal forces between rigid clump members. The obtained

porównuje się z wytrzymałością cząstki, stosując kryterium Mohra-Coulomba-Weibulla, które uwzględnia wpływ wielkości ziaren. Jeżeli kryterium jest spełnione, najbardziej wyętyżony element bryłki (tj. taki, dla którego stosunek równoważnego naprężenia Mohra-Coulomba-Weibulla do wytrzymałości na ściskanie jest największy) zastępowany jest mniejszymi fragmentami (cząstkami kulistymi o jednakowych rozmiarach).

Nowo wygenerowane kawałki znajdują się w sąsiednich pustkach, a nakładanie się cząstek zaraz po pęknięciu można kontrolować. W prezentowanej symulacji nie dopuszczono żadnego nakładania się cząstek. Algorytm jest kompleksowo przedstawiony w [19]. Poniżej w skrócie zestawiono parametry przyjęte do symulacji.

Parametry wytrzymałościowe:

- $\sigma_{CD} = 1,5 \text{ MPa}$ – wytrzymałość na ściskanie. Należy pamiętać, że parametr ten należy interpretować jako wytrzymałość na zgniatanie. Podczas kruszenia cząstek (np. pomiędzy płytami) tensor naprężenia Love'a-Webera (przyjęty w algorytmie pęknięcia) wskazuje, że cząstka jest ściskana. Natomiast o wytrzymałości na zgniatanie decyduje wytrzymałość na rozciąganie,
- $m = 3,0$ – moduł Weibulla. Parametr opisujący podatność cząstki na efekty skali (wzrost wytrzymałości cząstki wraz ze zmniejszaniem się jej rozmiaru),
- $P = 0,63$ – prawdopodobieństwo zniszczenia wg rozkładu Weibulla,
- $V_0 = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$ – reprezentatywna objętość referencyjna. Wielkość referencyjna, przy której wytrzymałość cząstki jest równa przyjętej.

Parametry kontrolujące ułożenie cząstek po pęknięciu:

- $g_r = 1,0$ oraz $a = 0$ – odpowiednio współczynnik promienia wzrostu i względna szczelina między cząstkami. Parametry te kontrolują nakładanie się cząstek po wymianie. Przyjęte w niniejszej pracy wartości nie pozwalają na nakładanie się cząstek,
- $r_r = 1,25$ – względny promień generowanych cząstek. Przyjęta wartość oznacza, że gdy fragment bryłki (sfera) zostanie rozbity, jest on zastępowany przez około 1,25 razy mniejsze cząstki. Przy takiej wartości tego parametru kula zostałaby zastąpiona przez dwie cząstki. Niemniej jednak ostateczny rozmiar cząstek dostosowuje się tak, aby zrównoważyć masę zastąpionej części pierwotnej cząstki. Znaczenie tego parametru wyjaśniono na Rys. 6,

stress is compared with strength of the particle, utilizing the Mohr-Coulomb-Weibull criterion, which takes into account size effects. If the criterion is satisfied, the most strained clump member (i.e. the member for which the ratio of equivalent Mohr-Coulomb-Weibull stress to compression strength is the highest) is replaced with smaller fragments (monosized spherical particles).

The newly generated pieces are located in the adjacent voids, and particle overlapping directly after breakage can be controlled. In the presented simulation no overlapping was allowed. The algorithm is comprehensively presented in [19]. Below, the parameters adopted for simulation are summarized briefly.

Parameters affecting strength:

- $\sigma_{CD} = 1.5 \text{ MPa}$ – compressive strength. One should note that this parameter should be interpreted as crushing strength. During particle crushing (e.g. between plates), the Love-Weber stress tensor (adopted in the breakage algorithm) indicates that the particle is compressed. On the other hand, it is the tensile strength that governs crushing resistance,
- $m = 3.0$ – Weibull modulus. Parameter that describes susceptibility of a particle to scale effects (how fast strength of a particle increases with decreasing size),
- $P = 0.63$ – Weibull probability,
- $V_0 = 1.0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$ – representative reference volume. Reference size at which the strength of the particle is equal to the assumed one.

Parameters controlling the arrangement of particles after breakage:

- $g_r = 1.0$ and $a = 0$ – grow radius factor and relative particle gap, respectively. These parameters control particle overlapping after replacement. Adopted values do not allow any overlap of particle,
- $r_r = 1.25$ – relative radius of the produced sub-particles. It means that once a clump member (sphere) is broken, it is replaced by approximately 1.25 times smaller particles. For such a value of this parameter, a sphere would be replaced by two monosized particles. Nevertheless, the final size of the particles is adjusted to balance the mass of the replaced portion of the original particle. The meaning of this parameter is explained in Fig. 6.

- $s_{max} = 10$ – maksymalna skala upakowania generowanych cząstek. Jeśli nie jest dozwolone nakładanie się, powstałe fragmenty należy umieścić poza obrysem oryginalnej cząstki. Podczas rozbijania algorytm próbuje upakować nową cząstkę w sąsiednich pustych przestrzeniach. Z literatury wiadomo, że po wystąpieniu pęknięcia ziarna, w odległości równej dwóm promieniom rozbitej cząstki można odnaleźć 20-30% okruchów [7]. Uzasadnia to wielkość parametru $s_{max} > 2$. Przyjęto nawet wyższą wartość ($s_{max} = 10$), aby nie ograniczać odległości wyszukiwania podczas symulacji. Oczywiście wymagany jest dodatkowy warunek, aby wszystkie cząstki pozostały wewnątrz formy Proctora i nie nakładały się na ubijak.

Ponadto, aby uniknąć wprowadzenia do symulacji bardzo małych fragmentów, dopuszczono pękanie tylko cząstek, które są nie mniejsze niż 4,0 mm.

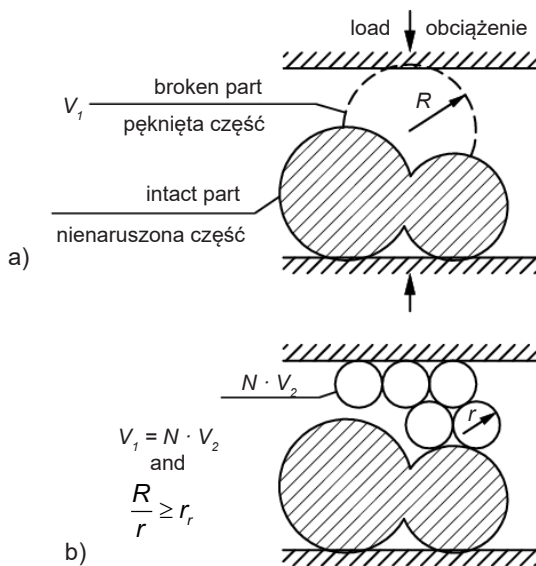


Fig. 6. Relationship between relative radius r_r and the size of produced sub-particles: a) a clump member (sphere) with radius R before breakage, b) the sphere after breakage replaced by N smaller independent particles with radii r , where $R/r \geq r_r$, and volumes V_2

Rys. 6. Zależność promienia względnego r_r od wielkości generowanych cząstek: a) sfera o promieniu R wchodząca w skład bryłki przed pęknięciem, b) sfera po pęknięciu zastąpiona przez N mniejszych niezależnych ziaren o promieniach r , gdzie $R/r \geq r_r$, i objętościach V_2

2.3.6 Symulacje DEM

Przebieg symulacji DEM jest zaplanowany w taki sposób, aby jak najdokładniej odzwierciedlał procedurę badania Proctora. W pierwszej kolejności generowane są w cylindrze

- $s_{max} = 10$ – the maximum scale of sub-particles packing. If no overlapping is allowed, the produced fragments need to be placed beyond the outline of the original particle. During the particle breakage, the algorithm tries to pack the new sub-particle in adjacent voids. As indicated in the literature, after a single occurrence of grain breakage, 20-30% of the created fragments can be found within the distance equal to two radii of the broken particle [7]. That supports the values of $s_{max} > 2$. However, the authors adopted a high value ($s_{max} = 10$) to avoid limiting the searching distance during the simulation. Of course, an additional condition was required to ensure that all the particles remained in the Proctor mold and did not overlap with the hammer.

Furthermore, to avoid introducing very small particles in the simulation, breakage was allowed only for particles that were not smaller than 4.0 mm.

2.3.6. DEM simulation workflow

The workflow of the DEM simulation aims to reproduce the procedure of the Proctor test accurately. First, the initial packing of each layer of the given PSD is prepared. The grains are randomly generated in the mold and fall to the bottom of the container. The energy dissipates due to the numerical damping (factor of 0.2) applied during the motion integration. Information about grain positions is stored in a separate file for later use. This way, in the course of the main procedure, the time required for gravity deposition of each layer is minimized. The second simulation imitates the Proctor test in the following steps:

- The first layer is loaded. Aggregate positions can adjust until the unbalanced force falls below the given threshold ($1 \cdot 10^{-4}$). The unbalanced force is an indicator of simulation equilibrium and tends to zero for a perfectly static state. It is defined as the “ratio of mean (...) summary force on bodies and mean force magnitude on interactions” [20].
- The layer is compacted with a prescribed number of hammer blows (25, 50, 75, or 125 blows per layer). Every set of consecutive 25 blows follows the pattern of the Proctor procedure (24 blows around the circular path and 25th in the middle). To save computing time, the hammer is placed right above the aggregate layer with the imposed velocity of 2.446 m/s, which corresponds to the speed of the body falling from a height of 0.305 m. After the sample is hit with the hammer,

Proctora początkowe ułożenia cząstek poszczególnych warstw kruszywa o zadanej krzywej uziarnienia (tj. rozkładzie wielkości cząstek). Ziarna danej warstwy są generowane losowo w formie Proctora, a następnie opadają grawitacyjnie na dno cylindra. Podczas tej fazy dochodzi do dyssypacji energii układu dzięki zastosowaniu tzw. tłumienia numerycznego (o współczynniku 0,2) podczas całkowania równań ruchu. Ostateczne pozycje cząstek są zachowywane w osobnym pliku w celu późniejszego wykorzystania. Dzięki temu podczas głównej symulacji badania możliwe jest ograniczenie czasu potrzebnego na grawitacyjne rozłożenie cząstek każdej warstwy. Dalej ma miejsce właściwa symulacja badania Proctora, która przebiega w następujących krokach:

- Wczytywana jest pierwsza warstwa gruntu wewnątrz formy Proctora. Pozycje cząstek mogą zmieniać się aż do momentu, gdy udział sił niezerównoważonych spadnie poniżej zadanej granicy ($1 \cdot 10^{-4}$). Wielkość ta wskazuje, czy analizowany układ cząstek jest w równowadze; dąży do zera dla idealnie statycznego przypadku. Zdefiniowana jest jako stosunek uśrednionej sumy sił niezerównoważonych działających na ziarna do średniej wartości sił interakcji pomiędzy cząstkami [20].
- Warstwa jest zagęszczana za pomocą zadanej liczby uderzeń ubijaka (25, 50, 75 lub 125 uderzeń na warstwę). Każde kolejne 25 uderzeń wykonywane jest zgodnie z założeniami badania Proctora (24 uderzenia po obwodzie formy i 25. uderzenie w środku). W celu ograniczenia czasu obliczeń, ubijak umieszczany jest bezpośrednio nad powierzchnią warstwy kruszywa z początkową prędkością 2,446 m/s, która odpowiada swobodnemu spadkowi ubijaka o założonej masie z wysokości 0,305 m. Po każdym uderzeniu warstwy kruszywa za pomocą ubijaka pozycje cząstek zmieniają się, a gęstość objętościowa materiału wzrasta. Jest to również moment, w którym może dojść do pęknięcia cząstek (w przypadku wariantu symulacji z możliwością pęknięcia ziaren, Rys. 7). Algorytm pęknięcia cząstek znacząco zwiększa koszt obliczeniowy całej symulacji. W związku z tym jest on aktywowany tylko przez pierwsze 0,03 s po każdym uderzeniu ubijaka, w czasie, w którym występują największe siły. Wytrzymałość cząstek jest sprawdzana co każde $2,5 \cdot 10^{-5}$ s. Ubijak przemieszcza się do następnej pozycji, gdy całkowita niezerównoważona siła spada poniżej zadanej granicy.

grain positions adjust, and the bulk density of the material increases. It is also the moment when aggregate breakage may occur, in the case of simulations with breakable grains (Fig. 7). The grain breakage algorithm introduces high computational cost to the simulation. Hence, it is active only during the first 0.03 s after the hammer blow, when the strongest force chains appear. The strength of the grains is evaluated once every $2.5 \cdot 10^{-5}$ s. The hammer moves to the next position after the unbalanced force reaches the threshold.

- When the compaction of the layer is finished, the hammer moves outside the mold, and the next layer (grain packing) is loaded right above the previous layer. The compaction procedure is repeated. The simulation finishes after three layers have been subjected to the preset number of blows. An example of grain packing after the procedure is presented in Fig. 7c, where particles created in the process of crushing are colored red, and particles that did not break are colored lucent green.

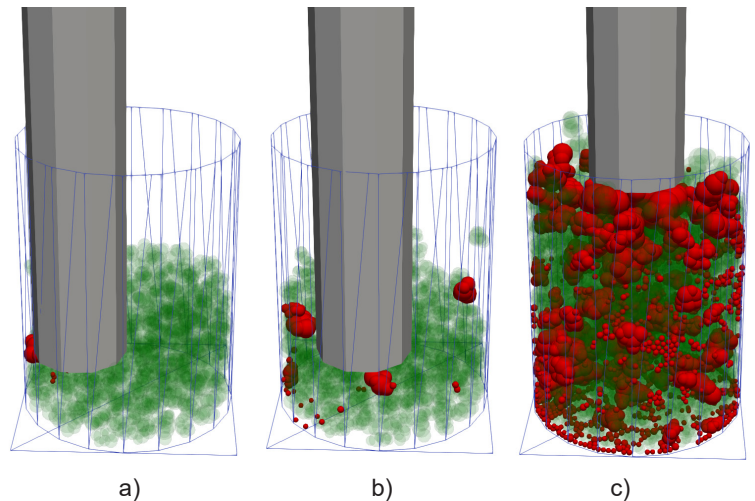


Fig. 7. Model overview: a) directly after the first breakage event, b) downward migration of small particles during compaction, c) after the end of the simulation (red-colored particles were created from broken particles, green-colored particles did not break)

Rys. 7. Widok modelu DEM: a) po pierwszym zdarzeniu pęknięcia ziarna, b) migracja mniejszych ziaren w dół podczas zagęszczania, c) po zakończeniu symulacji (ziarna oznaczone kolorem czerwonym zostały utworzone w wyniku pęknięcia większych ziaren, ziarna kolorowane na zielono nie pękły)

- Gdy zagęszczanie danej warstwy jest zakończone, ubijak jest przemieszczany poza formę i następna warstwa (układ ziaren) jest wczytywana bezpośrednio ponad poprzednią. Procedura zagęszczania jest następnie powtarzana. Symulacja kończy się po zagęszczeniu trzech warstw. Przykładowe ułożenie ziaren po zakończeniu procedury przedstawiono na Rys. 7c, gdzie ziarna powstałe w wyniku pęknięcia pokolorowane zostały na czerwono, a ziarna, które nie pękły, pokolorowano na zielono.

2.3.7. Procedura analizy gęstości

W laboratoryjnym badaniu Proctora forma składa się z cylindra pomiarowego oraz przedłużki. Po zakończeniu zagęszczania gruntu przedłużka jest demontowana i usuwany jest nadmiar gruntu powyżej górnej powierzchni cylindra pomiarowego. Następnie cylinder wraz z zagęszczonym materiałem jest ważony. Znając objętość wewnętrzną cylindra oraz jego masę, można obliczyć gęstość objętościową gruntu w formie.

W przypadku próbki kruszywa modelowanej numerycznie, otrzymuje się gęstość objętościową poprzez zbadanie objętości próbki. Wewnątrz cylindra od dna do wysokości 120 mm generowana jest siatka punktów. Punkty rozmieszczone są z rozdzielczością 0,1 mm. Jeśli punkt znajduje się wewnątrz ziarna, oznaczany jest jako „wypełniony” a w przeciwnym wypadku jako „pusty”. Stosunek liczby punktów „pustych” do wszystkich punktów definiuje porowatość materiału n (%). Gęstość objętościowa materiału obliczana jest na podstawie porowatości według wzoru $\frac{(100\% - n)}{100\%} \cdot 2504$ [kg/m³].

3. WYNIKI

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych uzyskano dwa rodzaje wyników: zmianę krzywej uziarnienia (PSD) oraz zmianę gęstości objętościowej w trakcie zagęszczania. Porównanie krzywych uziarnienia (PSD) przedstawiono na Rys. 8. Widoczne jest, że intensywność kruszenia ziaren zmieniała się podczas badania. Największa liczba ziaren ulega skruszeniu po pierwszych 25 uderzeniach ubijaka. Statystycznie rzecz biorąc, najłabsze ziarna kruszą się na początku. Następnie kruszywo staje się mniej podatne na rozłupywanie ziaren i zmiany w krzywej uziarnienia po 50 lub 75 uderzeniach są znikome.

Jednak dalsze dodatkowe 100 uderzeń (125 razem) skutkuje ponownym nasileniem pęknięcia ziaren. Może być

2.3.7. Density analysis procedure

In the laboratory procedure, the mold is composed of the cylinder and the collar. After compaction the collar and the excessive amount of aggregate must be removed. The cylinder with the sample is weighted. Since the weight and volume of the empty cylinder is known, the bulk density of the material may be computed.

In the case of the numerical sample, density is obtained by probing the volume of the sample. A grid of points inside the container is generated to the height of 120 mm. The points are spaced with a resolution of 0.1 mm. If a point lies inside any grain, it is counted as filled; otherwise it is treated as empty. The ratio of points counted as empty to all the points indicates the sample porosity n (%). Hence, the bulk density can be computed as $\frac{(100\% - n)}{100\%} \cdot 2504$ [kg/m³].

3. RESULTS

The laboratory tests provided two kinds of results: change in the PSD and bulk density. Information about the PSD is presented in Fig. 8. One can note that the rate of particle crushing varied during the test. The first 25 blows of the hammer cause a significant particle breakage. Statistically, the weakest grains break at the beginning. Then, the aggregate mixture becomes less susceptible to grain crushing, and PSD changes after 50 or 75 blows are minimal.

Nevertheless, additional 100 blows (125 in total) result in significant crushing again. It can be explained by the fact that the heavily compacted sample is stiffer and more grains are interlocked. Hence, hammer blows introduce greater contact forces, causing a higher rate of aggregate breakage.

PSD results are also used as input in the DEM simulations. In the case of simulations with breakable aggregates, the adopted PSD corresponds to the initial PSD of the material (denoted as PSD 0 in Fig. 8). The grading changes slightly as the particle crushing occurs. In the case of simulations with non-breakable aggregates, different initial particle size distributions were adopted from the very beginning (corresponding to the laboratory PSD after 0, 25, and 125 hammer blows). However, one should note that the size of the particles in simulations does not exactly match the laboratory results (there are no particles smaller than 4 mm in the simulation).

All the results of bulk density (obtained from laboratory and both kinds of simulations) are presented in Fig. 9.

to spowodowane faktem, że mocno zagęszczona próbka jest sztywniejsza i więcej ziaren zazębia się ze sobą. To prowadzi do wystąpienia większych sił kontaktowych po uderzeniu ubijaka i częstszego pęknięcia ziaren.

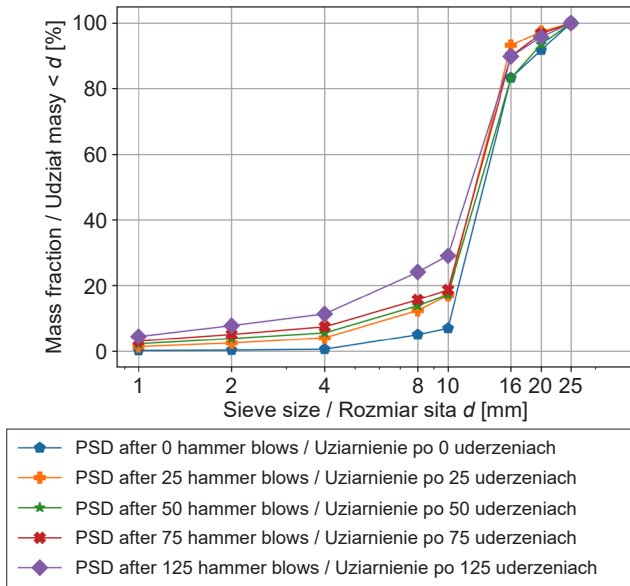


Fig. 8. Change of the PSD obtained during the compaction in laboratory

Rys. 8. Zmiana krzywej uziarnienia kruszywa na podstawie badań laboratoryjnych

Wyniki badań laboratoryjnych krzywej uziarnienia kruszywa posłużyły również jako dane wejściowe do symulacji DEM. W przypadku symulacji z możliwością pęknięcia ziaren, generowano kruszywo o początkowej krzywej uziarnienia otrzymanej z badań (oznaczonej jako PSD 0 na Rys. 8). W trakcie obliczeń DEM krzywa uziarnienia zmienia się nieznacznie w wyniku pęknięcia ziaren. W przypadku symulacji bez możliwości pęknięcia ziaren, na początku generowano kruszywo o różnych krzywych uziarnienia (odpowiadających wynikom badań gruntu w laboratorium po 0, 25, i 125 uderzeniach ubijaka). Należy jednak mieć na uwadze, że rozmiar cząstek kruszywa w symulacji DEM nie odpowiada dokładnie wynikom badań laboratoryjnych (w obliczeniach DEM nie modelowano cząstek mniejszych niż 4 mm).

Wszystkie wyniki oznaczenia gęstości objętościowej (zarówno z badań laboratoryjnych jak i dwóch wariantów symulacji DEM) przedstawiono na Rys. 9. Każdy punkt reprezentuje osobną symulację lub badanie laboratoryjne. Niebieska linia ciągła z okrągłymi punktami opisuje wynik badania w laboratorium. Zastosowanie dużej energii

Each point represents a separate simulation or laboratory test. The blue solid line with circular points shows the results of the laboratory procedure. Excessive compaction energy caused a significant change in density. Additional 100 blows of the hammer caused an increase in density by 215 kg/m^3 . Computer simulations do not fully reproduce this effect, and possible reasons will be discussed below.

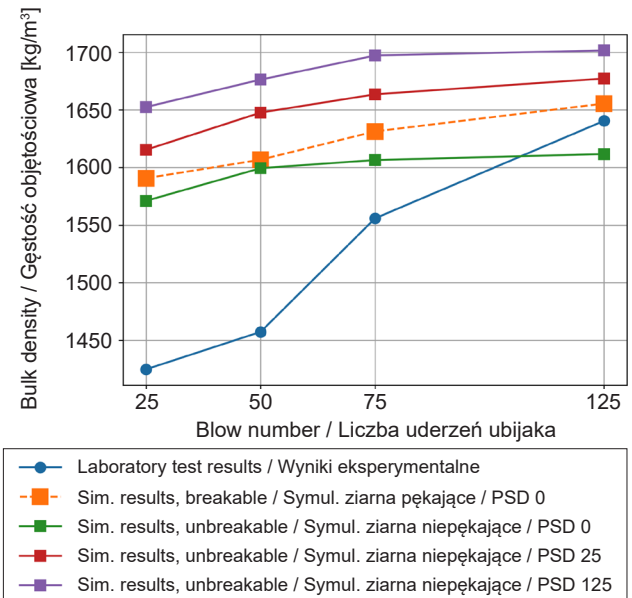


Fig. 9. Comparison of bulk density obtained in laboratory tests and computer simulations

Rys. 9. Porównanie gęstości objętościowej otrzymanej na podstawie badań laboratoryjnych i symulacji DEM

The remaining solid lines present the results of simulations with non-breakable aggregates. Those were conducted to separate the effects of PSD change and particle rearrangement. By observing the slope of the lines, one can assess how excessive compaction energy affects the density. Additional 100 hammer blows cause an increase in density by approximately 50 kg/m^3 ($41\text{-}62 \text{ kg/m}^3$). The vertical shift between the lines shows how the change in PSD influences the results. The difference in density obtained for coarse aggregates (PSD 0) and moderately crushed (PSD 25) is approximately 54 kg/m^3 . The difference between the numerical samples PSD 25 and PSD 125 equals 31 kg/m^3 . Thus, the total influence of PSD change is around 85 kg/m^3 . It shows that the density increase during intensive compaction can be attributed to changes in PSD as well as particle rearrangement. Nevertheless, it should be noted that the material used had many particles of uniform size.

zagęszczenia na jednostkę objętości spowodowało znaczący wzrost gęstości objętościowej. Dodatkowe 100 uderzeń ubijaka przełożyło się na wzrost gęstości objętościowej o 215 kg/m^3 . Symulacje komputerowe nie oddają w pełni tego efektu. Możliwe przyczyny zostaną omówione w dalszej części artykułu.

Pozostałe linie ciągłe na Rys. 9 prezentują wyniki symulacji z ziarnami niepekającymi. Obliczenia te zostały wykonane, aby wyodrębnić wpływ zmian krzywej uziarnienia na dopasowywanie się ziaren kruszywa do siebie w trakcie zagęszczania. Analizując nachylenie tych linii, można ocenić, jak nadmiarowa energia zagęszczenia wpływa na gęstość objętościową. Dodatkowe 100 uderzeń ubijaka powoduje wzrost gęstości objętościowej o około 50 kg/m^3 ($41\text{-}62 \text{ kg/m}^3$). Przesunięcie pionowe pomiędzy liniami wskazuje, jak zmiana krzywej uziarnienia wpływa na wyniki. Różnica gęstości otrzymanej dla gruboziarnistego kruszywa (PSD 0) oraz kruszywa częściowo pokruszonego (PSD 25) to około 54 kg/m^3 . Różnica pomiędzy numerycznymi próbkami PSD 25 i PSD 125 wynosi 31 kg/m^3 . Zatem całkowity wpływ zmiany krzywej uziarnienia na wyniki to około 85 kg/m^3 . Wskazuje to, że podczas intensywnego zagęszczania wzrost gęstości materiału jest spowodowany zarówno zmianami w krzywej uziarnienia, jak i przemieszczaniem oraz dopasowywaniem się ziaren do siebie. Należy jednak mieć na uwadze, że analizowany tutaj materiał posiada wiele ziaren o jednorodnym rozmiarze. W związku z tym jest on szczególnie podatny na pęknięcie, a małe fragmenty ziaren powstałe w wyniku kruszenia mogą łatwo wypełniać przestrzeń pomiędzy większymi. Wpływ zmian krzywej uziarnienia może być mniej znaczący w przypadku dobrze uziarnionych mieszanek mineralnych.

Linia przerywana na Rys. 9 przedstawia wyniki symulacji z pękającymi ziarnami. Tempo zmian gęstości objętościowej jest większe na początku, po czym ulega stabilizacji. Ostatecznie gęstość materiału wzrasta o 65 kg/m^3 po dodatkowych 100 uderzeniach ubijaka. Jest to wzrost większy niż w przypadku wszystkich innych symulacji DEM prezentowanych w niniejszej pracy. Wskazuje to, że bezpośrednia symulacja kruszenia ziaren prowadzi do bardziej realistycznej reprezentacji zachowania materiału. Niemniej jednak wciąż odbiega ona od wyników badań laboratoryjnych. Jednym z powodów może być różnica pomiędzy krzywą uziarnienia rzeczywistego materiału i kruszywa w symulacji DEM. Wynika ona z ograniczeń

Thus, it was prone to breakage, and broken fragments could easily fit the voids between particles. The effect of PSD change may be less significant for well-graded aggregate mixtures.

The dashed line shows the results of the simulation with breakable particles. In the beginning, the rate of density change is higher and later stabilizes. Finally, density increases by 65 kg/m^3 after the additional 100 hammer blows. This increase is greater than in any other type of simulation in this study. It shows that explicit simulation of particle breakage leads to a more realistic representation of the material behavior. However, it still differs from the results obtained in the laboratory. One of the probable reasons is the difference between the PSD in laboratory and simulation. It is caused by the limitation of the breakage model, in which only the non-overlapping volume of the one clump sub-particle (sphere) is released in a single breakage event. Due to the adopted particle shapes (highly overlapping spheres), the material shows corner breakage rather than splitting. In such a case, particle breakage allows the interlocking caused by geometric (kinematic) constraints to be overcome. At the same time, the PSD evolution observed in the laboratory is not reflected in the numerical model. Evolution of the particle size distribution during the simulation with breakable particles is visualized in Fig. 10.

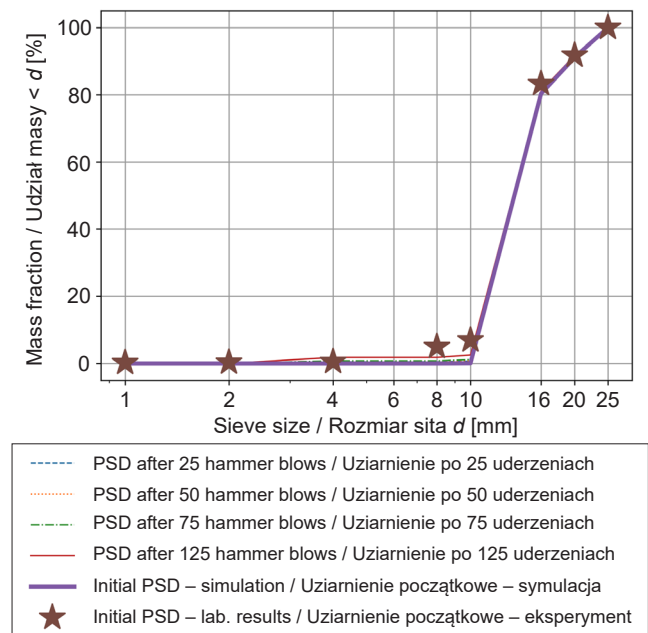


Fig. 10. Change of the PSD obtained during compaction simulations
Rys. 10. Zmiana krzywej uziarnienia na podstawie symulacji DEM

algorytmu pęknięcia cząstek, w którym tylko nieprzenikająca się część objętości pojedynczej sfery wchodzącej w skład bryłki jest uwalniana podczas zdarzenia pęknięcia. W związku z przyjętymi kształtami bryłek (mocno przenikające się sfery), materiał wykazuje zachowanie bardziej związane z kruszeniem krawędzi niż z pękaniem. W takim wypadku pęknięcie ziaren ułatwia wzajemne przemieszczenie zazębionych cząstek, co wcześniej było ograniczone geometrycznie (kinematyczne). Jednocześnie widoczne jest, że model numeryczny nie oddaje zmian krzywej uziarnienia gruntu otrzymanych w laboratorium. Ewolucja krzywej uziarnienia podczas symulacji z pękającymi ziarnami jest przedstawiona na Rys. 10.

Należy podkreślić, że głównym celem autorów nie było odtworzenie w sposób najdokładniejszy zmian w krzywej uziarnienia podczas zagęszczania, gdyż w symulacjach DEM analizowano oddzielnie wpływ krzywej uziarnienia i pęknięcia ziaren. W związku z tym nieuzasadnione byłoby oczekiwanie, że rezultaty poszczególnych symulacji DEM oddadzą w sposób dokładny zmiany obserwowane w eksperymencie.

4. DYSKUSJA

W tym rozdziale zostaną poddane dyskusji dwie kwestie. Po pierwsze omówione będą możliwe przyczyny rozbieżności pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych i symulacji komputerowych. Po drugie przedstawiony zostanie komentarz dotyczący różnic jakościowych pomiędzy zagęszczeniem ziaren otrzymanym w wyniku różnych symulacji DEM.

Zarówno badania laboratoryjne, jak i symulacje DEM wykazały wzrost gęstości objętościowej materiału sypkiego po zastosowaniu większej energii zagęszczenia. Jednakże wzrost gęstości otrzymany w symulacjach jest mniejszy niż w badaniu laboratoryjnym. Przyczyną jest uproszony kształt ziaren zastosowany w obliczeniach numerycznych. Wykorzystano bryłki składające się z przenikających się wzajemnie sfer, które mogą w sposób przybliżony naśladować nieregularny kształt rzeczywistych ziaren. W celu zamodelowania kanciastości ziaren, w przyjętym prawie kontaktu pomiędzy cząstkami uwzględniono dodatkowo tarcie toczone (opór toczenia). Powyższe metody mogą zostać skutecznie wykorzystane, aby odtwarzać mechaniczne właściwości materiału sypkiego. Kształt ziaren wpływa jednak na gęstość materiału również z innych względów. Determinuje on dodatkowe ograniczenia (więzy) kinematyczne oraz

The authors would like to emphasize that accurate simulation of changes in PSD was not the main objective of the study; the influence of PSD and particle breakage was separated in the DEM analyses. Therefore, it was not anticipated that any of the individual DEM simulations will exactly reflect the changes observed in the laboratory experiment.

4. DISCUSSION

Two issues will be discussed in this section. Firstly, the possible reasons for discrepancies between laboratory and simulation will be discussed. Secondly, the qualitative differences between particle packing obtained from different types of simulations will be commented on.

Both laboratory tests and numerical simulations resulted in an increased density of granular assembly after compaction with additional energy. Nevertheless, the effect reproduced by simulations is less pronounced than in the laboratory. The first reason for this is a simplified grain shape representation. Clumps of spheres were used that can approximately imitate the shape of irregular grains. Additionally, the applied contact law included rolling resistance in order to account for grain angularity. On the one hand, those techniques can be successfully implemented to reproduce the mechanical behavior of granular assembly. On the other hand, the shape of the particles affects the density of granular assembly in other aspects as well. It introduces kinematic constraints and determines the possible shapes of voids. This cannot be imitated by introducing rolling resistance that is supposed to only represent particle interlocking. More realistic clump shapes could have been obtained by using refined clump templates (with smaller spheres fitting the corners). Lai and coworkers showed that for rounder particles the initial density of the sample is higher [47]. Nevertheless, a very realistic shape representation requires relatively high numbers of spheres per particle. Thus, 8-sphere shapes were adopted in this study as a trade-off between computational cost and realistic reconstruction. This number was previously reported in the literature as adequate for various types of simulations [48]. Particle crushing is beneficial for increasing density if grain fragments can fill the existing voids. Additionally, it was assumed in the presented simulations that grain fragments must be placed in the voids without overlapping with other particles. However, allowing for small overlapping could have facilitated successful void filling, consequently leading to higher density.

kształt porów. Te aspekty nie mogą być zamodelowane za pomocą wprowadzenia tarcia tocznego pomiędzy ziarnami, które z założenia ma jedynie imitować zjawisko zazębienia się cząstek. Uzyskanie bardziej realistycznych kształtów bryłek możliwe byłoby przy wykorzystaniu ulepszonych modeli bryłek (z mniejszymi sferami umiejscowionymi w narożach ziarna). Lai wraz z zespołem wykazał, że dla bardziej zaokrąglonych ziaren początkowa gęstość próbki jest większa [47]. Niemniej jednak bardzo realistyczna reprezentacja kształtu cząstek wymaga relatywnie dużej liczby sfer wchodzących w skład każdego ziarna. W niniejszej pracy zastosowano kształty składające się z 8 sfer, dzięki czemu możliwe było uzyskanie kompromisu pomiędzy kosztem obliczeniowym a realistyczną rekonstrukcją. Liczba 8 sfer była wcześniej zarekomendowana w literaturze jako wystarczająca do wielu rodzajów symulacji [48].

Pękanie ziaren jest procesem korzystnym pod kątem zwiększania gęstości materiału sypkiego, jeśli fragmenty ziaren powstałe w wyniku kruszenia mogą wypełniać istniejące pory. W przedstawionych symulacjach przyjęto, że fragmenty ziaren mogą wypełniać pory bez możliwości przenikania z innymi ziarnami. Dopuszczenie możliwości niewielkiego przenikania mogłoby poprawić skuteczność wypełniania porów i w konsekwencji podwyższyć uzyskaną gęstość materiału.

Ponadto ograniczenia związane z wielkościami cząstek wpłynęły na krzywą uziarnienia materiału w symulacjach. Na Rys. 8 widoczne jest, że każda krzywa uziarnienia gruntu po zagęszczeniu zawiera cząstki mniejsze niż 4 mm, które zostały pominięte w symulacjach komputerowych z uwagi na problemy z wydajnością obliczeń. Zagęszczony materiał ziarnisty wykazuje zdolność pękania do momentu, gdy osiągnie fraktalny rozkład wielkości [7, 49]. W związku z tym rezultatem może być samopodobna struktura, w której mniejsze cząstki wypełniają pory pomiędzy większymi ziarnami i zasada ta jest powtarzana na wszystkich skalach. Zatem założenia ograniczające uziarnienie materiału wpływają na jego finalną porowatość i gęstość [50].

Wizualna analiza materiału sypkiego po zagęszczeniu umożliwia zaobserwowanie jakościowych różnic pomiędzy symulacjami z ziarnami niepękającymi (Rys. 11) i pękającymi (Rys. 12).

Symulacje zagęszczenia niepękających ziaren zostały przeprowadzone na numerycznych próbkach kruszywa

Furthermore, limitations regarding particle size influenced the PSD. In Fig. 8 one can see that every sample after compaction shows a considerable content of particles smaller than 4 mm; these particles were omitted in simulation due to efficiency issues. Compacted granular assembly tends to break until it reaches fractal PSD [7, 49]. Hence, it can result in a self-similar structure, where smaller particles fill the pores between bigger ones, and this principle is repeated across the scales. Thus, assumptions regarding material grading influence the porosity and density [50].

Visual inspection of granular assemblies after compaction makes it possible to notice qualitative differences between simulations with non-breakable (Fig. 11) and breakable (Fig. 12) particles.

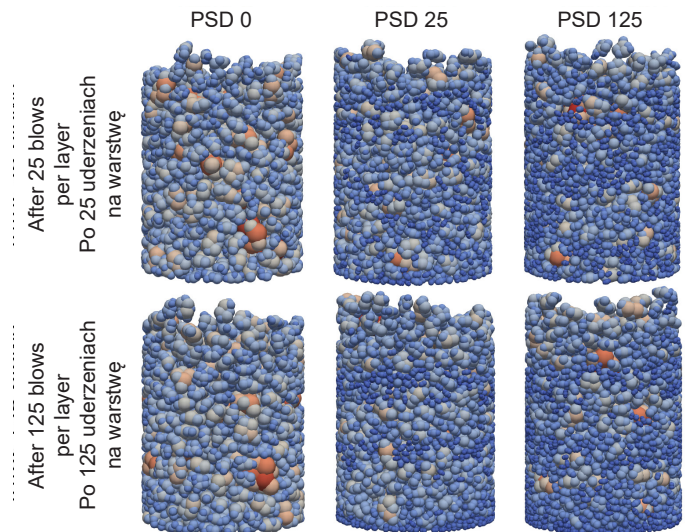


Fig. 11. Visualization of the granular assembly after simulation with non-breakable particles
Rys. 11. Wizualizacja ułożenia ziaren po zakończeniu symulacji bez możliwości pękania

Compaction simulations of non-breakable particles were conducted on numerical samples with different particle size distributions (PSD 0, PSD 25 and PSD 125). Samples of given PSD were compacted with standard energy (25 blows per layer) or increased energy (50, 75 or 125 blows per layer). Analyzing the results presented in Fig. 11, one can note that the downward migration of small particles was minimal. It is most evident in the case of the PSD 25 sample compacted with high energy. During compaction of the first layer, small particles can fall to the bottom. Nevertheless, the compacted layer becomes

o różnych krzywych uziarnienia (PSD 0, PSD 25 i PSD 125). Próbkę o zadanej krzywej uziarnienia były zagęszczane ze standardową energią zagęszczania (25 uderzeń na warstwę) oraz zwiększoną energią (50, 75 lub 125 uderzeń na warstwę). Analizując wyniki przedstawione na Rys. 11, można zaobserwować, że migracja mniejszych cząstek w kierunku dna zaszła w minimalnym stopniu. Jest to najbardziej widoczne w przypadku próbki o krzywej uziarnienia PSD 25 zagęszczanej zwiększoną energią. Podczas zagęszczania pierwszej warstwy w cylindrze małe cząstki mogą opadać na dno. Jednakże warstwa ta po zagęszczeniu staje się całkowicie nieprzenikalna. W związku z tym, gdy kolejna warstwa jest poddawana zagęszczaniu, cząstki migrują w dół jedynie w obrębie grubości nowej warstwy i nie opadają na dno formy. Jednocześnie większe ziarna mogą przemieszczać się ku górze, ostatecznie osiągając wierzch próbki. Ogólny mechanizm migracji większych ziaren w górę podczas wstrząsania próbki został wyjaśniony przez Rossato i in. [51]. W momencie, gdy pojawia się pusta przestrzeń poniżej większego ziarna, jest statystycznie bardziej prawdopodobne, że zostanie ona wypełniona przez mniejsze ziarno niż większe. W przypadku przedstawionych symulacji DEM migracja większych ziaren nie jest ograniczona przez zagęszczoną warstwę kruszywa. Po zagęszczeniu pierwszej warstwy większe ziarna już przemieściły się i znajdują się w pobliżu wierzchu tej warstwy. Gdy nowa warstwa jest dodana, jest ona jeszcze w stanie luźnym i ziarna mogą dalej migrować przez nią ku górze.

Wyniki przedstawione na Rys. 12 pochodzą z czterech różnych symulacji z pękającymi ziarnami. Początkowa krzywa uziarnienia materiału była taka sama w przypadku wszystkich tych symulacji (PSD 0). Można zaobserwować, że wraz ze wzrostem energii zagęszczenia (liczby uderzeń ubijaka na warstwę) rośnie intensywność pękania ziaren oraz gęstość materiału (bardziej zagęszczona próbka jest również wyraźnie niższa). Co więcej, najdrobniejsze cząstki znajdują się w większości na dnie formy. Jest to zgodne z obserwacjami poczynionymi w laboratorium i dowodzi, że bezpośrednia symulacja pękania ziaren prowadzi do bardziej realistycznych wyników.

Pęknięcie zagęszczanego materiału ziarnistego jest częstym zjawiskiem występującym w budownictwie drogowym i kolejowym. Może ono dodatkowo zyskać na znaczeniu, biorąc pod uwagę, że w budownictwie liniowym coraz częściej wykorzystywane są surowce wtórne, takie jak

impenetrable. Hence, when a new layer is added, the particles migrate only within the thickness of the new layer and do not fall to the bottom. On the other hand, bigger particles can migrate upwards and eventually reach the top of the sample. The general mechanism of upward migration of bigger particles during sample shaking was explained by Rossato et al. [51]. When a void opens below a large grain, it is statistically more likely that it will be filled by a small grain than a bigger one. In the presented case, the migration of bigger grains is not constrained by the compacted layer. After the first layer is compacted, the large grains are already on top. When a new layer is added, it is still loose, and grains can migrate through it.

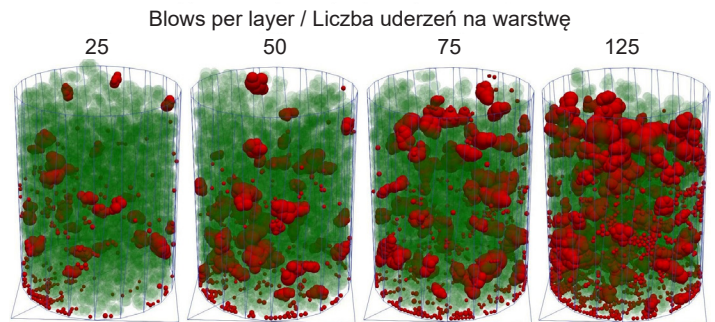


Fig. 12. Visualization of the granular assembly after simulation with breakable particles (red-colored particles were created from broken particles, green-colored particles did not break)
Rys. 12. Wizualizacja ułożenia ziaren po zakończeniu symulacji z możliwością pękania ziaren (ziarna kolorowane na czerwono zostały utworzone w wyniku pękania, ziarna kolorowane na zielono nie pękły podczas symulacji)

The results presented in Fig. 12 come from four separate simulations with breakable particles. Initial PSD was the same in the case of all those simulations (PSD 0). One can see that increasing the compaction energy (number of hammer blows per layer) increases breakage rate and density (denser sample is also visibly lower). Moreover, the finest particles are mostly at the bottom of the container. It is in line with observations from the laboratory and shows that explicit simulation of grain breakage results in a more realistic outcome.

Crushing of the compacted granular material is a common phenomenon in road and railroad infrastructure. It may become more important in the future, as recycled materials (such as concrete aggregates [52, 53] or reclaimed asphalt pavement [54]) are used more and more widely and are usually weaker than natural ones. Moreover,

kruszywa betonowe [52, 53] lub nawierzchnie asfaltowe z odzysku [54], które często mają gorsze parametry mechaniczne od kruszyw naturalnych. Ponadto jednorodnie uziarnione materiały gruboziarniste, stosowane przykładowo na podsypki kolejowe, są poddawane zagęszczaniu i kruszeniu w trakcie całego czasu eksploatacji konstrukcji. Problem ten jest poruszany w wielu nowych publikacjach [55-59].

5. WNIOSKI

Praca prezentuje pierwsze symulacje DEM dynamicznego zagęszczania kruszywa w badaniu Proctora. Porównano wyniki symulacji i badań laboratoryjnych. Gruboziarniste kruszywo granitowe zostało zagęszczone z różną energią (25, 50, 75 oraz 125 uderzeń ubijaka na warstwę). Symulacje miały na celu uwidocznienie, jak pękanie ziaren wpływa na gęstość intensywnie zagęszczanego materiału ziarnistego. Można sformułować następujące wnioski na podstawie przeprowadzonych analiz:

1. Symulacje DEM z niepękającymi kruszywami pozwoliły na odseparowanie efektów wpływu zmian krzywej uziarnienia oraz dopasowywania się do siebie ziaren podczas zagęszczania. Oba czynniki odgrywają istotną rolę w zwiększaniu gęstości objętościowej próbki w przypadku analizowanego kruszywa (o jednorodnym uziarnieniu).
2. Symulacje z pękającymi ziarnami lepiej modelują badanie laboratoryjne – uzyskiwany jest większy wzrost gęstości objętościowej próbki w wyniku intensywnego (ponadnormatywnego) zagęszczania.
3. Rozbieżności pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych i obliczeń numerycznych są związane z przyjętymi w symulacjach uproszczeniami dotyczącymi kształtu ziaren (bryłki zbudowane z przenikających się sfer) oraz krzywej uziarnienia (nie modelowano cząstek mniejszych niż 4 mm).
4. Techniki modelowania, takie jak tarcie toczone, wpływają na mechaniczne właściwości materiału ziarnistego i pozwalają na symulowanie kanciastości w kontekście efektu zazębienia się ziaren o siebie. Jednakże niewystarczająco dokładna reprezentacja kształtu ziaren może powodować rozbieżności w otrzymywanej porowatości materiału i w konsekwencji – różnice w gęstości.

uniformly-graded coarse materials, such as rail ballast, undergo compaction and crushing continuously during exploitation. Hence, this issue occupies an important position in recent research [55-59].

5. CONCLUSIONS

This work presents the first DEM simulation of dynamic compaction in the Proctor test. Results from simulations and laboratory testing were compared. A coarse granite aggregate was compacted with different energy (25, 50, 75 and 125 hammer blows per layer). The aim of the simulations was to analyze the influence of particle breakage on the density of intensely compacted granular assembly. The following conclusions can be drawn based on the conducted study:

1. The simulations with non-breakable aggregates enabled separation of the influence of change in PSD and particle rearrangement. Both factors play an essential role in increasing the bulk density of the sample in the case of tested (gap-graded) aggregate.
2. The simulations with breakable particles better reproduce the laboratory test – higher change in the density due to excessive compaction.
3. Discrepancies between the laboratory and numerical results should be attributed to the simplified particle shapes (clumps of spheres) and PSD (no particle smaller than 4 mm allowed in the simulation).
4. Modeling techniques such as rolling friction affect mechanical behavior of granular assembly and can imitate particle angularity in terms of interlocking effect. Nevertheless, insufficient representation of particle geometry may result in discrepancies in the obtained porosity and, consequently, in the observed bulk density.
5. Modeling of grain breakage in the simulation of dynamic compaction was possible owing to the recently developed algorithm [19], which conserves mass in the simulation without introducing excessive potential energy from particle overlapping.

ACKNOWLEDGMENTS

Research was funded by the Warsaw University of Technology within the Excellence Initiative: Research University (IDUB) program.

5. Modelowanie pękania ziaren w trakcie symulacji dynamicznego zagęszczania możliwe było dzięki zastosowaniu niedawno opracowanego algorytmu [19], który pozwala na zachowanie masy w symulacji bez wprowadzania nadwyżki energii potencjalnej pochodzącej z przenikania się cząstek.

INFORMACJE DODATKOWE

Badania były finansowane ze środków Politechniki Warszawskiej w ramach Programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza (IDUB).

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Chang C.S., Liu Y.*: Stress and fabric in granular material. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, **3**, 2, 2013, ID article 021002, DOI: 10.1063/2.1302102
- [2] *Wang S., Miao Y., Wang L.*: Investigation of the force evolution in aggregate blend compaction process and the effect of elongated and flat particles using DEM. *Construction and Building Materials*, **258**, 2020, ID article: 119674, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119674
- [3] *Zhou W., Yang L., Ma G., Chang X., Cheng Y., Li D.*: Macro–micro responses of crushable granular materials in simulated true triaxial tests. *Granular Matter*, **17**, 4, 2015, 497-509, DOI: 10.1007/s10035-015-0571-3
- [4] *Gou D., Li Y., An X., Yang R.*: DEM modelling of particle fragmentation during compaction of particles. *Powder Technology*, **398**, 2022, ID article: 117073, DOI:10.1016/j.powtec.2021.117073
- [5] *Cundall P.A., Strack O.D.L.*: A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, **29**, 1, 1979, 47-65, DOI: 10.1680/geot.1979.29.1.47
- [6] *Cil M.B., Buscarnera G.*: DEM assessment of scaling laws capturing the grain size dependence of yielding in granular soils. *Granular Matter*, **18**, 3, 2016, ID article: 36, DOI: 10.1007/s10035-016-0638-9
- [7] *McDowell G.R., de Bono J.P.*: On the micro mechanics of one-dimensional normal compression. *Geotechnique*, **63**, 11, 2013, 895-908, DOI: 10.1680/geot.12.P.041
- [8] *Zhang C., Zhao Y., Bai Q.*: 3D DEM method for compaction and breakage characteristics simulation of broken rock mass in goaf. *Acta Geotechnica*, **7**, 2021, 2765-2781, DOI: 10.1007/s11440-021-01379-3
- [9] *Jia M., Liu B., Xue J., Ma G.*: Coupled three-dimensional discrete element–finite difference simulation of dynamic compaction. *Acta Geotech*, **16**, 3, 2021, 731-747, DOI: 10.1007/s11440-020-01055-y
- [10] *Zhu X., Qian G., Yu H., Yao D., Shi C., Zhang C.*: Evaluation of coarse aggregate movement and contact unbalanced force during asphalt mixture compaction process based on discrete element method. *Construction and Building Materials*, **328**, 2022, ID article: 127004, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127004
- [11] *Ma Z., Liao H., Ning C., Liu L.*: Numerical study of the dynamic compaction via DEM. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, **1**, 3, 2015, 17–22, DOI: 10.3208/jgsssp.CPN-17
- [12] *Wang C., Moharekpour M., Liu Q., Zhang Z., Liu P., Oeser M.*: Investigation on asphalt-screed interaction during pre-compaction: Improving paving effect via numerical simulation. *Construction and Building Materials*, **289**, 2021, ID article: 123164, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123164
- [13] *Przybyłowicz M., Sysyn M., Gerber U., Kovalchuk V., Fischer S.*: Comparison of the effects and efficiency of vertical and side tamping methods for ballasted railway tracks. *Construction and Building Materials*, **314**, 2022, ID article: 125708, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125708
- [14] *Qi Q., Chen Y., Nie Z., Liu Y.*: Investigation of the compaction behaviour of sand-gravel mixtures via DEM: Effect of the sand particle shape under vibration loading. *Computers and Geotechnics*, **154**, 2023, ID article: 105153, DOI: 10.1016/j.compgeo.2022.105153
- [15] *Pouranian M.R., Shishehbor M., Haddock J.E.*: Impact of the coarse aggregate shape parameters on compaction characteristics of asphalt mixtures. *Powder Technology*, **363**, 2020, 369-386, DOI: 10.1016/j.powtec.2020.01.014
- [16] *Komaragiri S., Gigliotti A., Bhasin A.*: Feasibility of using a physics engine to virtually compact asphalt mixtures in a gyratory compactor. *Construction and Building Materials*, **308**, 2021, ID article: 124977, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124977
- [17] *Chen J., Huang B., Shu X., Hu C.*: DEM simulation of laboratory compaction of asphalt mixtures using an open source code. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **27**, 3, 2015, ID article: 04014130, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001069

- [18] *Ciantia M.O., Arroyo M., Calvetti F., Gens A.*: An approach to enhance efficiency of DEM modelling of soils with crushable grains. *Geotechnique*, **65**, 2, 2015, 91-110, DOI: 10.1680/geot.13.P.218
- [19] *Brzeziński K., Gladky A.*: Clump breakage algorithm for DEM simulation of crushable aggregates. *Tribology International*, **173**, 2022, ID article: 107661, DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107661
- [20] *Šmilauer V., Angelidakis V., Catalano E., Caulk R., Chareyre B., Chèvremont W., et al.*: *Yade Documentation 3rd ed.*, 2021, DOI: 10.5281/ZENODO.5705394
- [21] Standardization E.C. for: HRN EN 13286-2: 2010 Unbound and Hydraulically Bound Mixtures – Part 2: Test Method for Laboratory Dry Density and Water Content – Proctor Compaction
- [22] PN-S-02205:1998: Polish standard: Roads – Earthwork – Specifications and tests, 1998
- [23] *Hu W., Polaczyk P., Gong H., Ma Y., Huang B.*: Visualization and quantification of soil laboratory impact compaction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **14**, 2, 2022, 616-624, DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.07.001
- [24] *Xiao J., Zhang X., Zhang D., Xue L., Sun S., Stránský J., et al.*: Morphological reconstruction method of irregular shaped ballast particles and application in numerical simulation of ballasted track. *Transportation Geotechnics*, **24**, 2020, ID article: 100374, DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100374
- [25] *An P., Tang H., Li C., Fang K., Lu S., Zhang J.*: A fast and practical method for determining particle size and shape by using smartphone photogrammetry. *Measurement*, **193**, 2022, ID article: 110943, DOI: 10.1016/j.measurement.2022.110943
- [26] *Li R., Hu X., Chen F., Wang X., Xiong H., Wu H.*: A systematic framework for DEM study of realistic gravel-sand mixture from particle recognition to macro- and micro-mechanical analysis. *Transportation Geotechnics*, **34**, 2022, ID article: 100693, DOI: 10.1016/j.trgeo.2021.100693
- [27] *Brzeziński K., Duda A., Styk A., Kowaluk T.*: Photogrammetry-based volume measurement framework for the particle density estimation of LECA. *Materials*, **15**, 15, 2022, ID article: 5388, DOI: 10.3390/ma15155388
- [28] *Paixão A., Resende R., Fortunato E.*: Photogrammetry for digital reconstruction of railway ballast particles – A cost-efficient method. *Construction and Building Materials*, **191**, 2018, 963-976, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.048
- [29] *Huscsek-Juhász E., Németh A., Sysyn M., Baranyai G., Liu J., Fischer S.*: Testing the fragmentation of railway ballast material by laboratory methods using Proctor compactor. *Scientific Bulletin of the National Mining University of Ukraine in Dnipropetrovsk*, **1**, 2024, 58-68, DOI: 10.33271/nvngu/2024-1/058
- [30] European standard: HRN EN 13286-2:2010 Unbound and Hydraulically Bound Mixtures – Part 2: Test Method for Laboratory Dry Density and Water Content – Proctor Compaction
- [31] *Angelidakis V., Nadimi S., Otsubo M., Utili S.*: CLUMP: a code library to generate universal multi-sphere particles. *SoftwareX*, **15**, 2021, ID article: 100735, DOI: 10.1016/j.softx.2021.100735
- [32] *Suhr B., Six K.*: Parametrisation of a DEM model for railway ballast under different load cases. *Granular Matter*, **19**, 4, 2017, 1-16, DOI: 10.1007/s10035-017-0740-7
- [33] *Johnson K.L.*: *Contact mechanics*. Cambridge University Press; 1987
- [34] *Kozicki J., Tejchman J., Mróz Z.*: Effect of grain roughness on strength, volume changes, elastic and dissipated energies during quasi-static homogeneous triaxial compression using DEM. *Granular Matter*, **14**, 4, 2012, 457-468, DOI: 10.1007/s10035-012-0352-1
- [35] *Brzeziński K., Zbiciak A., Gladky A.*: Implementation of a viscoelastic boundary condition to Yade – open source DEM software. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, **2023**, 355-364, DOI: 10.15632/jtam-pl/163053
- [36] Itasca's Particle Flow Code Documentation 7.0, software, 2021
- [37] *Šmilauer V.*: Cohesive particle model using discrete element method on the Yade platform. PhD Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum, 2010
- [38] *Park D., Michalowski R.L.*: Time-dependent model for sand grain deflection including contact maturing under sustained load. *Granular Matter*, **22**, 2, 2020, ID article: 40, DOI: 10.1007/s10035-020-1008-1

- [39] *Tavares L.M., Rodriguez V.A., Sousani M., Padros C.B., Ooi J.Y.*: An effective sphere-based model for breakage simulation in DEM. *Powder Technology*, **392**, 2021, 473-488, DOI: 10.1016/j.powtec.2021.07.031
- [40] *Liu J., Sysyn M., Liu Z., Kou L., Wang P.*: Studying the Strengthening Effect of Railway Ballast in the Direct Shear Test due to Insertion of Middle-size Ballast Particles. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, **8**, 4, 2022, 1387-1397, DOI: 10.22055/jacm.2022.40206.3537
- [41] *Eliáš J.*: Simulation of railway ballast using crushable polyhedral particles. *Powder Technology*, **264**, 2014, 458-465, DOI: 10.1016/j.powtec.2014.05.052
- [42] *Gladkyy A., Kuna M.*: DEM simulation of polyhedral particle cracking using a combined Mohr – Coulomb – Weibull failure criterion. *Granular Matter*, **19**, 3, 2017, ID article: 41, DOI: 10.1007/s10035-017-0731-8
- [43] *De Arruda Tino A.A., Tavares L.M.*: Simulating breakage tests using the discrete element method with polyhedral particles. *Computational Particle Mechanics*, **9**, 4, 2022, 811-823, DOI: 10.1007/s40571-021-00448-4
- [44] *Lisjak A., Grasselli G.*: A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **6**, 4, 2014, 301-314, DOI: 10.1016/j.jrmge.2013.12.007
- [45] *Yu F.*: Particle breakage in granular soils: a review. *Particulate Science and Technology*, **39**, 1, 2021, 91-100, DOI: 10.1080/02726351.2019.1666946
- [46] *Xiao Y., Desai C.S., Daoudji A., Stuedlein A.W., Liu H., Abuel-Naga H.*: Grain crushing in geoscience materials – Key issues on crushing response, measurement and modeling: Review and preface. *Geoscience Frontiers*, **11**, 2, 2020, 363-374, DOI: 10.1016/j.gsf.2019.11.006
- [47] *Lai R., Xu F., Qi Q., Nie Z.*: Exploring the effects of gravel shapes on vibration compaction behaviours of coarse-grained mixtures via DEM simulations. *International Journal of Pavement Engineering*, **24**, 1, 2023, ID article: 2201501, DOI: 10.1080/10298436.2023.2201501
- [48] *Coetzee C.J.*: Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape. *Powder Technology*, **297**, 2016, 50-70, DOI: 10.1016/j.powtec.2016.04.003
- [49] *Brzeziński K., Ciężkowski P., Bąk S.*: Tricking the fractal nature of granular materials subjected to crushing. *Powder Technology*, **425**, 2023, ID article: 118601, DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118601
- [50] *Zhu S., Ye H., Yang Y., Ma G.*: Research and application on large-scale coarse-grained soil filling characteristics and gradation optimization. *Granular Matter*, **24**, 4, 2022, ID article: 121, DOI: 10.1007/s10035-022-01280-0
- [51] *Rosato A., Strandburg K.J., Prinz F., Swendsen R.H.*: Why the Brazil nuts are on top: Size segregation of particulate matter by shaking. *Physical Review Letters*, **58**, 10, 1987, 1038-1040, DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.1038
- [52] *Krawczyk B., Szydło A., Mackiewicz P., Dobrucki D.*: Assessment criteria of the recycled aggregate cement bound bases. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 2, 2019, 109-126, DOI: 10.7409/rabdim.019.007
- [53] *Graczyk M., Beblacz D.*: Roller-compacted concrete with the use of recycled aggregate for local road pavement execution. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **22**, 4, 2023, 433-438, DOI: 10.7409/rabdim.023.025
- [54] *Stokfisz A., Liphardt A.*: Assessment of crack propagation resistance in SMA mixtures with reclaimed asphalt pavement. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **22**, 4, 2023, 593-604, DOI: 10.7409/rabdim.023.039
- [55] *Suhr B., Skipper W.A., Lewis R., Six K.*: DEM modeling of railway ballast using the Conical Damage Model: a comprehensive parametrisation strategy. *Granular Matter*, **24**, 1, 2022, ID article: 40, DOI: 10.1007/s10035-021-01198-z
- [56] *Juhász E., Fischer S.*: Investigation of railroad ballast particle breakage. *Pollack Periodica*, **14**, 2, 2019, 3-14, DOI: 10.1556/606.2019.14.2.1
- [57] *Eliáš J.*: Simulation of railway ballast using crushable polyhedral particles. *Powder Technology*, **264**, 2014, 458-465, DOI: 10.1016/j.powtec.2014.05.052
- [58] *Liu Y., Gao R., Chen J.*: A new DEM model to simulate the abrasion behavior of irregularly-shaped coarse granular aggregates. *Granular Matter*, **23**, 3, 2021, ID article: 61, DOI: 10.1007/s10035-021-01130-5
- [59] *Ngo T., Indraratna B.*: Mitigating ballast degradation with under-sleeper rubber pads: Experimental and numerical perspectives. *Computers and Geotechnics*, **122**, 2020, ID article: 103540, DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103540