

WPLYW SZEROKOŚCI PRÓBK I KSZTAŁTU CZĄSTEK
NA CHARAKTERYSTYKI JEDNOOSIOWEGO ŚCISKANIA ZŁOŻA
MATERIAŁU SYPKIEGO

Piotr Parafiniuk, Joanna Wiącek, Marek Molenda, Piotr Frankowski

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: p.parafiniuk@ipan.lublin.pl

Streszczenie. Celem prezentowanego projektu było badanie związku przebiegu testu jednoosiowego ściskania złoża materiału sypkiego z kształtem cząstek i szerokością prostopadłościenną komory pomiarowej. Komora miała wysokość i głębokość 0,12 m oraz szerokość (drugi wymiar poziomy) nastawny w zakresie 0 do 0,12 m. Wykonano pomiary laboratoryjne jednoosiowego ściskania na złożach bliskich kształtu sferycznego nasion grochu oraz wyraźnie niesferycznych nasion fasoli. Otrzymano wartości ilorazu naporu dla nasion fasoli w przybliżeniu 0,5, zaś dla grochu niższe, w przybliżeniu równe 0,4. Podobne tendencje były obserwowane wcześniej w badaniach nasion rzepaku i pszenicy. Wykonano symulacje numeryczne eksperymentów laboratoryjnych w złożu kul oraz zlepków trzech kul modelujących cząstki wydłużone. Analizowano przebiegi charakterystyk ilorazu naporu k od naporu pionowego. Testy numeryczne potwierdziły tendencje obserwowane w eksperymentach. Iloraz naporu w przypadku cząstek kulistych szybko rósł ze wzrostem szerokości próbki do około 2 wymiarów cząstki, po przekroczeniu tego wymiaru zmiany były niewielkie. W złożach cząstek niekulistych iloraz naporu był wyższy już w wąskich próbkach przy czym iloraz naporu rósł ze wzrostem współczynnika wydłużenia. Tak w pomiarach laboratoryjnych, jak i w symulacjach obserwowano silne fluktuacje obciążenia pionowego związane ze zmianami sieci kontaktów.

Słowa kluczowe: DEM, metoda elementów dyskretnych, materiał sypki, jednoosiowe ściskanie, modelowanie numeryczne

WSTĘP

Materiały sypkie występują jako surowiec bądź produkt w licznych procesach technologicznych w rolnictwie jak i przemysłach m.in.: spożywczych, chemicznym kosmetycznym, farmaceutycznym. W ostatnich latach nastąpiła globalizacja rynku i, w konsekwencji zaostriżyła się konkurencja. Dlatego szczególnie istotna staje się automatyzacja i optymalizacja procesów, co wymaga precyzyjnego pro-

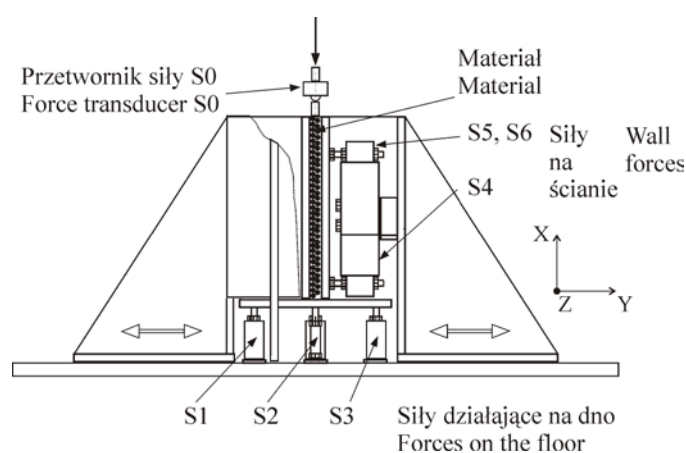
jektowania. Zasadniczego znaczenia nabiera rozpoznanie właściwości przechowywanych i przetwarzanych materiałów. W odniesieniu do złóż o ogromnej ilości cząstek skuteczne okazały się metody mechaniki ośrodków ciągłych, które pozwoliły na rozwój mechaniki gruntów (Glazer 1977), czy mechaniki ośrodków sypkich (Drescher 1991). Ogromna liczba cząstek w złożu pozwoliła na traktowanie go jako ośrodka ciągłego, użycie koncepcji naprężenia, opis zjawisk za pomocą równań różniczkowych i rozwiązań na gruncie analizy matematycznej. Szereg zjawisk, zwłaszcza w skali kilku/kilkunastu wymiarów cząstek, kiedy istotne stają się niejednorodność i nieciągłość materiału nie poddaje się takiemu opisowi. Tego rodzaju procesy próbowano opisać stosując metody numeryczne. Pierwsza chronologicznie koncepcja rokująca skuteczność metod numerycznych w modelowaniu ośrodków granularnych pojawiła się w 1979 roku. Autorzy – Cundall i Strack (1979) nazwali swoje podejście metodą elementów dyskretnych (DEM). Początkowo, koszt szybkich komputerów pozwalał jedynie na modelowanie niezbyt licznych układów cząstek płaskich. Obniżanie kosztu mocy obliczeniowej w ostatnich latach spowodowało zwiększone zainteresowanie badaczy i praktyków wykorzystaniem DEM do badań mechaniki materiałów sypkich, a także do projektowania urządzeń i procesów. Celem prezentowanego projektu było określenie zależności reakcji złoża na obciążenie mechaniczne od kształtu cząstek i jego grubości w zakresie do kilku wielokrotności wymiaru cząstki.

MATERIAŁ I METODY

Eksperymenty laboratoryjne wykonano z zastosowaniem aparatu jednoosiowego ściskania z komorą prostopadłościenną o wysokości i głębokości 0,12 m oraz o szerokości regulowanej w zakresie od 0 do 0,12 m (rys.1). Kształt komory modeluje wyobrażony wycinek materiału, a jej wymiary, w przybliżeniu równe od kilku do kilkunastu wymiarów typowych nasion pozwoliły na analizę wyników w terminologii mechaniki kontinuum. Oznacza to analizę w układzie współrzędnych kartezjańskich z zastosowaniem pojęć naprężenia i odkształcenia. Złoże typowych nasion uformowane w takich wymiarach komory ma liczebność od kilku do kilkunastu tysięcy cząstek, a więc może być symulowane numerycznie w racjonalnym czasie kilku dni na niezbyt kosztownym komputerze.

Części aparatu wykonano z blachy stalowej galwanizowanej o grubości 6 mm, co zapewniało sztywność granic próbki przy stosowanym obciążeniu. Dwie ściany aparatu o wysokości 0,12 m, równoległe do płaszczyzny rysunku były stabilnie zamocowane do podstawy aparatu w odległości 0,12 m od siebie. Płyta stanowiąca dno komory opiera się na trzech przetwornikach siły S1, S2 i S3 (przetworniki Omega LCEC-50) i umożliwia pomiar działającej na nią siły pionowej. Dwie nastawne ściany aparatu, prostopadłe do płaszczyzny rysunku 1 były

ulożone 1 mm nad dnem, aby uniknąć przeniesienia ich pionowego obciążenia. Prawa ściana aparatu (rys. 1) opierała się na trzech przetwornikach siły (S4, S5 i S6) i umożliwiała pomiar siły poziomej. Aparat umieszczano na stole maszyny wytrzymałościowej pod głowicą pomiarową i próbkę obciążano przez odpowiedniego rozmiaru pokrywę uruchamiając napęd z prędkością $0,35 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Po osiągnięciu naporu pionowego 100 kPa napęd zatrzymywano, a następnie odciążano próbkę z tą samą prędkością. Siłę pionową działającą na pokrywę aparatu mierzono za pomocą przetwornika siły S0.

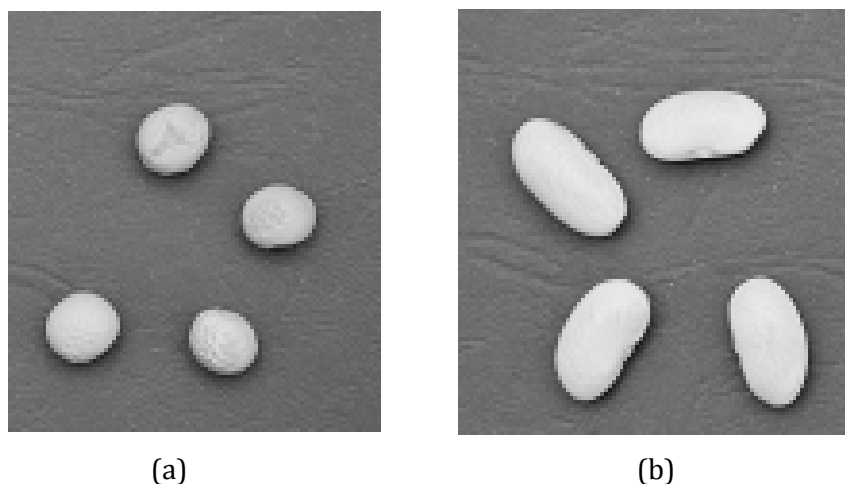


Rys. 1. Aparat jednoosiowego ściskania

Fig. 1. Uniaxial compression apparatus

Pomiary laboratoryjne

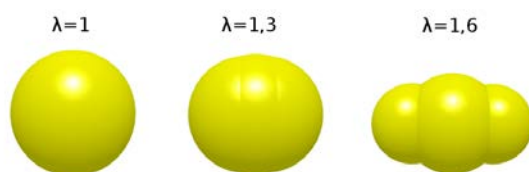
Testy jednoosiowego ściskania wykonano na próbkach grochu (odmiana Piast) o wilgotności 11% oraz na próbkach fasoli (odmiana Komosa) o wilgotności 9% (rys. 2). Nasiona obu roślin miały podobne: stan powierzchni i właściwości mechaniczne, a wyraźnie różniły się kształtem. Nasiona grochu miały kształt bliski kuli, a nasiona fasoli były wyraźnie wydłużone (rys. 2). Średnie wartości największego i najmniejszego wymiaru nasion grochu wynosiły 8,0 i 6,9 mm, zaś odpowiednie wymiary nasion fasoli wynosiły 12,2 oraz 5,4 mm. Średnie współczynniki wydłużenia λ (iloraz największego i najmniejszego wymiaru) wynosiły 1,17 dla grochu i 2,28 dla fasoli. Nasiona wsypywano do komory aparatu za pomocą lejka i górną powierzchnię próbki wyrównywano. Wykonywano trzy powtórzenia testu dla każdego typu nasion. Iloraz naporu k obliczano zgodnie z zaleceniem Eurocode 1 (2006) jako iloraz naporu poziomego σ_x do naporu pionowego σ_z .



Rys. 2. Próbki nasion grochu a) i fasoli b) użyte w eksperymentach
Fig. 2. Samples of pea (a) and bean (b) seeds used for testing

EKSPERYMENTY NUMERYCZNE (DEM)

W symulacjach numerycznych zastosowano model kontaktu Hertza-Mindlina (Ji i Shen 2006) ze sprężyną i tłumikiem w kierunku normalnym oraz z tłumikiem i elementem ślizgowym w kierunku poziomym. Zastosowano oprogramowanie EDEM (DEM Solutions, Ltd 2010). Złoża modelowano jako układy kul o jednakowej średnicy o różnych parametrach materiałowych. Cząstki modelowano także jako zlepki kul o tej samej średnicy, i ponadto, jako zlepki trzech kul – gdzie wewnętrzna była większa niż zewnętrzne. Kształty cząstek ilustruje rysunek 3, a ich właściwości materiałowe przyjęto równe zmierzonym dla grochu i fasoli (tab. 1).



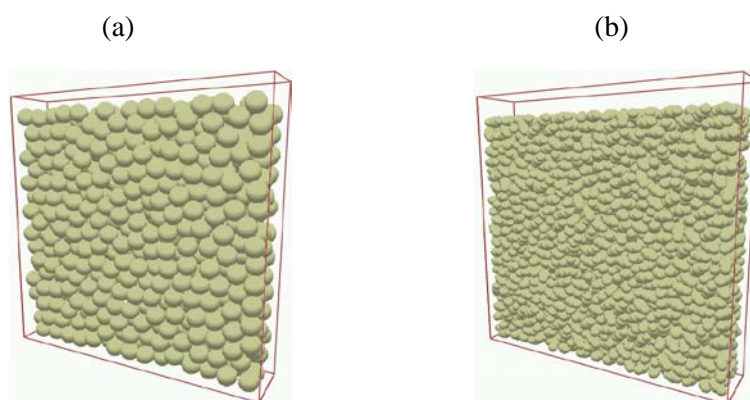
Rys. 3. Kształty cząstek użyte w symulacjach numerycznych (λ – iloraz największego i najmniejszego wymiaru cząstki)

Fig. 3. Shapes of particles used in numerical simulations (λ – ratio of the largest to the smallest dimension of particle)

Tabela 1. Parametry materiałowe cząstek i stali (Wiącek 2008)
Table 1. Material parameters of particles and steel (Wiącek 2008)

Parametr – Parameter	Groch – Pea	Fasola – Bean	Stal – Steel
Liczba Poissona Poisson ratio	0,26	0,26	0,3
Moduł Younga Young modulus (MPa)	560	526	200000
Gęstość – Density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1720	1720	7800
Wsp. restytucji Coefficient of restitution	Cząstka – cząstka Particle – particle	Cząstka – cząstka Particle – particle	Groch, fasola – stal Pea, bean – steel
	0,4	0,4	0,4
Wsp. tarcia ślizgowego Coefficient of friction	0,24	0,2	0,22
Wsp. tarcia tocznego Coefficient of rolling friction	0,01	0,01	0,01

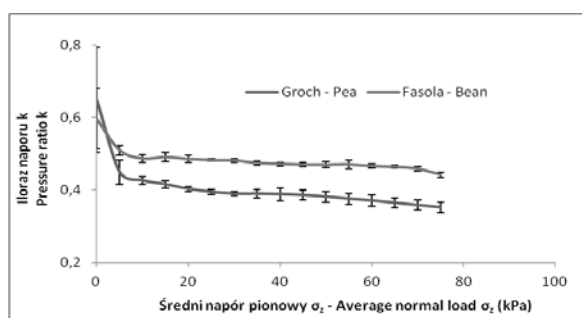
Cząstki były wytwarzane w losowych położeniach w przestrzeni nad symulowaną komorą aparatu i swobodnie spadały wypełniając ją (rys. 4). Na powierzchni swobodnej uformowanego złoża umieszczano górną pokrywę odpowiedniej szerokości i nadawano jej ruch pionowo w dół z prędkością $0,005 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Po osiągnięciu obciążenia złoża odpowiadającego 100 kPa pokrywę zatrzymywano, a następnie rozpoczynano ruch ku górze, który trwał do momentu ustania kontaktu między pokrywą i cząstkami.



Rys. 4. Próbkę w eksperymencie numerycznym złożoną z kul (a) oraz z cząstek wydłużonych (b)
Fig. 4. Initial configuration of specimens composed of spheres (a) and elongated particles (b)

WYNIKI EKSPERYMENTÓW LABORATORYJNYCH

Rysunek 5 przedstawia zależności ilorazu naporu, k od naporu pionowego σ_z dla nasion grochu i fasoli otrzymane w eksperymencie laboratoryjnym w złożu o grubości 33 mm. Wartości ilorazu naporu w pobliżu $\sigma_z = 0$ przekraczają 0,6 i szybko maleją do momentu osiągnięcia σ_z około 10 kPa. W dalszym przebiegu, w badanym zakresie naporu pionowego do około 80 kPa, k zmienia się już tylko nieznacznie. Wartości dla nasion fasoli wynoszą w przybliżeniu 0,5, zaś wartości dla grochu są niższe, w przybliżeniu równe 0,4. Podobne tendencje były obserwowane w badaniach innych nasion (Molenda i Horabik 2005), gdzie w przypadku nasion rzepaku i żyta wyznaczone wartości k są zbliżone do otrzymanych dla grochu i fasoli w prezentowanym projekcie. Złoża cząstek wydłużonych charakteryzują się wyższym tarcie wewnętrzne i większym ilorazem naporu.



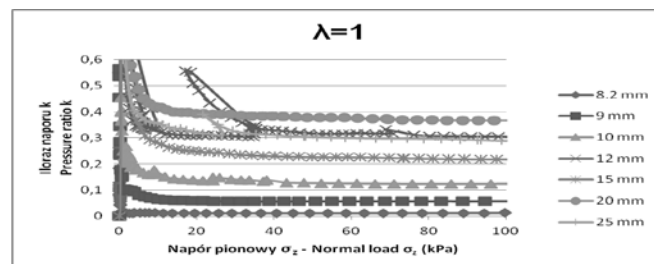
Rys. 5. Zależność ilorazu naporu k od naporu pionowego σ_z dla nasion grochu i fasoli otrzymana w eksperymencie laboratoryjnym w złożu o grubości 33 mm

Fig. 5. Experimental relationships between pressure ratio k and normal pressure σ_z for pea and bean seed beddings 33 mm thick

WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNYCH

Rysunek 6 przedstawia wyniki symulacji numerycznych jednoosiowego ścisania próbek o sześciu grubościach 8,2, 9, 10, 12, 15, 20 i 25 mm złożonych z cząstek kulistych o średnicy 8 mm. Najwyższa próbka ilustruje sytuację quasi 2D tzn. grubość jest tylko nieznacznie większa od średnicy cząstki (d_p) i wynosi $1,025 d_p$. W tej sytuacji bardzo niewielka część obciążenia pionowego przenosi się na ściany, iloraz naporu jest bliski zera. Przyrost grubości próbki do $1,125 d_p$, $1,25 d_p$ i $1,46 d_p$ pociąga za sobą przyrost k odpowiednio do około 0,06, 0,14 i 0,24 przy naporze normalnym 2,5 kPa. Dalsze poszerzanie próbki powoduje przyrost k do wartości w zakresie 0,3 do 0,4. Na niektórych przebiegach $k(\sigma_z)$ wystąpiły gwałtowne wzrosty wartości naporu i następujące po nich asymptotyczne

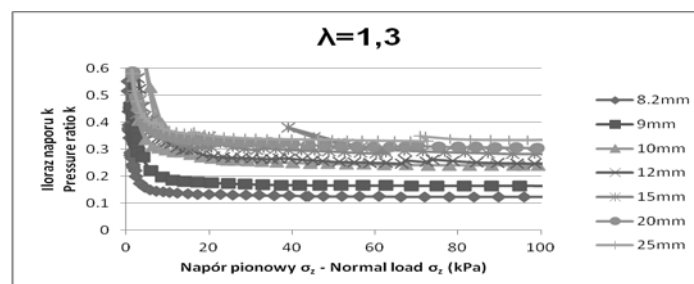
spadki. Jest to prawdopodobnie efekt reorientacji łańcuchów sił w sieci kontaktów, załamanie wytrzymałości i jej odbudowa w trakcie dalszego obciążania. Tego typu efekty występują także w badaniach eksperymentalnych i są określane terminem stick-slip (Stasiak i in. 2011). W prezentowanym zestawie wyników najsilniejsze wahania ilorazu naporu wystąpiły w próbkach o grubości 12 i 25 mm, i mają prawdopodobnie charakter losowy związany z geometrią sieci kontaktów powstałą w wyniku formowania próbki.



Rys. 6. Zależność ilorazu naporu k od naporu pionowego σ_z uzyskana z symulacji dla cząstek kulistych i grubości złoża: 8,2 , 9, 10, 12, 15, 20 i 25 mm

Fig. 6. Results of simulations of relationships of pressure ratio k vs. vertical pressure σ_z for spherical particles and bedding thicknesses of 8.2 , 9, 10, 12, 15, 20 and 25 mm

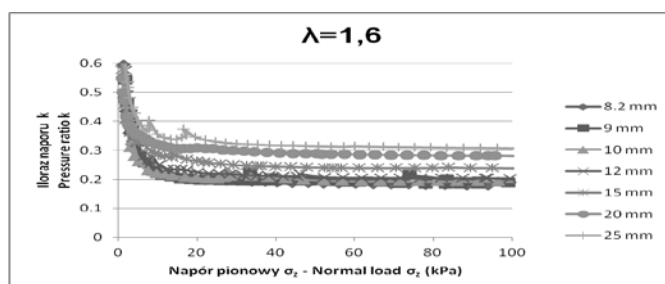
Rysunek 7 ilustruje zależności $k(\sigma_z)$ dla próbek złożonych z cząstek o współczynniku wydłużenia $\lambda = 1,3$ i grubościach jak w wyżej opisanym eksperymencie. Już w przypadku największych próbek wartości ilorazu naporu są wyższe niż w złożu cząstek kulistych. Tutaj przy $\sigma_z = 2,5$ kPa i $1,125 d_p$ iloraz naporu wynosi 0,17, zaś przyrost grubości próbki do $1,25 d_p$ powoduje przyrost k do wartości 0,27, a dalszy przyrosty grubości próbki lokują przebiegi $k(\sigma_z)$ w przedziale od 0,3 do 0,4, a więc podobnie jak w przypadku złożów cząstek kulistych.



Rys. 7. Zależność ilorazu naporu k od naporu pionowego σ_z uzyskana z symulacji dla cząstek o $\lambda = 1,3$ i grubości złoża: 8,2 , 9, 10, 12, 15, 20 i 25 mm

Fig. 7. Results of simulations of relationships of pressure ratio k vs. vertical pressure σ_z for particles of $\lambda = 1.3$ and bedding thicknesses of 8.2 , 9, 10, 12, 15, 20 and 25 mm

Na rysunku 8 przedstawiono zależność ilorazu naporu k od naporu pionowego σ_z dla cząstek o współczynniku wydłużenia $\lambda = 1,6$. W tym przypadku iloraz naporu dla największych szerokości jest większy zarówno od ilorazu naporu w złożu złożonym z cząstek kulistych jak i tych o $\lambda = 1,3$. Wynik ten można tłumaczyć zarówno większym upakowaniem cząstek o $\lambda = 1,6$, a co za tym idzie większą liczbą kontaktów, spowodowanym mniejszą objętością pojedynczej granuli w porównaniu z przypadkiem cząstek kulistych jak i występowaniem dodatkowego przyczynku do tarcia spowodowanego nieregularnością powierzchni pojedynczej cząstki w przypadku cząstek o $\lambda = 1,6$. Iloraz naporu w zakresie szerokości złoża 8,2; 9; 10 i 12 mm nieznacznie się zmienia, w porównaniu z większymi szerokościami układu, co może sugerować istnienie szerokości granicznej powyżej której charakter złoża ulega zmianie.



Rys. 8. Zależność ilorazu naporu k od naporu pionowego σ_z uzyskana z symulacji dla cząstek o $\lambda = 1,6$ i grubości złoża: 8,2 , 9 , 10, 12, 15, 20, 25 mm

Fig. 8. Results of simulations of relationships of pressure ratio k vs. vertical pressure σ_z for particles of $\lambda = 1.6$ and bedding thicknesses of 8.2 , 9 , 10, 12, 15, 20 and 25 mm

PODSUMOWANIE

Tak eksperyment laboratoryjny, jak i badania numeryczne wskazują na trudności wnioskowania o zachowaniu mechanicznym złóż 3D na podstawie testów 2D. Oddziaływania cząstek ze ścianą aparatu w układach o niewielkiej grubości wprowadzają znaczące błędy zaburzające parametry geometryczne (porowatość czy liczba koordynacyjna) jak i w sieci kontaktów. W wąskich złożach powstają łańcuchy sił powodujące zawieszanie materiału na ścianach komory i przekazywanie tylko niewielkiej części obciążenia pokrywy aparatu na dno. Ten efekt fałszuje wyniki pomiaru np. ilorazu naporu. Istnieje minimalna grubość próbki zapewniająca powtarzalność wyników wyznaczania k i wynosi ona około pięciu wymiarów cząstek.

Mierzone wartości ilorazu naporu dla nasion grochu i fasoli w próbce grubości 33 mm (około 4 wymiary nasiona grochu) szybko malały ze wzrostem naporu

pionowego σ_z do około 10 kPa, po czym, do najwyższego $\sigma_z = 80$ kPa zastosowanego w eksperymencie, malały już tylko nieznacznie. Parametr k przybierał wartości równe w przybliżeniu 0,5 dla nasion fasoli a w przypadku grochu wartości k były niższe, w przybliżeniu równe 0,4. Jest to efekt obserwowany już wcześniej w złożach nasion wydłużonych w porównaniu do ziół nasion o kształcie bliższym kulistemu, przypisywany większemu tarciu wewnętrznemu tych pierwszych. W symulacjach numerycznych wartości ilorazu naporu były szczególnie mocno zaniżone przy szerokości złoża poniżej 1,5 wymiaru cząstki, po przekroczeniu szerokości złoża ponad cztery wymiary cząstek wyniki zmieniały się nieznacznie.

WNIOSKI

1. Wykonane eksperymenty potwierdzają tezę, że układy kul tylko w ograniczonym zakresie mogą reprezentować złoża cząstek niekulistych.
2. Metoda elementów dyskretnych może być wartościowym narzędziem badania zjawisk mechaniki materiałów sypkich, wymaga jednak dalszych prac badawczych.
3. W świetle prezentowanych wyników, w odniesieniu do ziół nasion szczególnie istotne wydaje się wprowadzenie statystycznej zmienności wymiarów cząstek, jak i zmienności parametrów materiałowych używanych w symulacjach które w realnych materiałach biologicznych cechują się dużą zmiennością.

PIŚMIENNICTWO

- Cundall P.A, Strack O.D., 1979. A discrete element model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47-65.
- DEM Solutions, Ltd. 2009. EDEM 2.3 User Guide. Copyright © 2010
- Drescher A., 1991. Analytical methods in bin-load analysis. Elsevier, Amsterdam.
- DEM Solutions, Ltd. 2009. EDEM 2.3 User Guide. Copyright © 2010
- Eurocode 1, Actions on structures. Part 4. Silos and tanks. 2006. EN 1991-4.
- Glazer Z., 1977. *Mechanika gruntów*. Wydawnictwa geologiczne. Warszawa.
- Molenda M., Horabik J., 2005. Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. Part I. Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling. Institute of Agrophysics PAS, Lublin.
- Ji S.Y., Shen H.H., 2006. Effect of contact force models on granular flow dynamics. *Journal of Engineering Mechanics: ASCE*, 132 (11), 1252–1259.
- Stasiak M., Rusinek R., Molenda M., Fornal J., Błaszczak W., 2011. Effect of potato starch modification on mechanical parameters and granules morphology. *Journal of Food Engineering*, 102, 154-162.
- Wiącek J., 2008. Discrete element modeling of quasi-static effects in grain assemblies. PhD dissertation. Institute of Agrophysics PAS, Lublin, Poland.

EFFECT OF SAMPLE WIDTH AND SHAPE OF PARTICLES
ON UNIAXIAL COMPRESSION OF BEDDING OF GRANULAR MATERIAL

Piotr Parafiniuk, Joanna Wiqcek, Marek Molenda, Piotr Frankowski

Institute of Agrophysics PAS, ul. Doswiadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: p.parafiniuk@ipan.lublin.pl

Abstract. Uniaxial compression characteristics of granular material were examined as influenced by the shape of particles and the width of cuboidal chamber of the apparatus. The chamber was 0.12 m high and wide, while its width was adjustable in a range from 0 to 0.12 m. Testing was performed on nearly spherical pea seeds and on clearly oblong bean seeds. Numerical simulations of laboratory tests were conducted using the discrete element method (DEM) on assemblies of spherical particles of aspect ratio $\lambda = 1.0$ or on assemblies of elongated particles in the form of clusters of three coaxial spheres having aspect ratios $\lambda = 1.3$ or $\lambda = 1.6$. Asymptotic values of k in laboratory testing were found approximately 0.4 for pea seeds and approximately 0.5 for bean seeds. Similar tendencies were observed earlier in testing of wheat and rapeseeds. The results of numerical simulations were found to be in qualitative agreement with the results of laboratory testing performed. Values of pressure ratio k increased sharply with an increase in sample width up to approximately two particle diameters, and changed only slightly after surpassing this value. In assemblies of elongated particles k stabilised in narrower samples, and pressure ratio increased with an increase in λ . In laboratory testing as well as in numerical simulations strong fluctuations of values of normal load were observed, probably due to rearrangements of contact network.

Keywords: DEM, discrete element method, granular material, bulk solid, uniaxial compression, numerical simulations