

WPLYW ORIENTACJI PRZESTRZENNEJ ZIARNA NA KĄT TARCIA WEWNĘTRZNEGO
MIERZONY METODĄ TRÓJKĄSOWEGO ŚCISKANIA

Józef Horabik, Marek Molenda

Zakład Agrofizyki PAN w Lublinie

WSTĘP

Charakterystyki mechaniczne ośrodka rozdrobnionego zależą od wzajemnego przestrzennego ułożenia granул w próbce. Powstałą strukturę przestrzennego ułożenia granул najprościej można opisać dwoma parametrami [4, 7]:

- a) przestrzenną orientacją niesferycznych granул oraz
- b) gęstością upakowania.

Do opisu przestrzennej orientacji niesferycznych granул w próbce Oda [5] wprowadził dwie następujące miary przestrzennego uporządkowania:

1 - preferowany kierunek najdłuższych osi granул względem wybranego układu odniesienia:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i}{\sum_{i=1}^n \cos 2\theta_i} \right),$$

2 - intensywność równoległego ułożenia najdłuższych osi granул zdefiniowana następującym równaniem:

$$V \cdot M = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \cos 2\theta_i \right)^2} \cdot \frac{100}{n},$$

gdzie: n oznacza ilość pomiarów zaś θ_i jest nachyleniem danego ziarna względem układu odniesienia.

Wartość $V \cdot M$ zmienia się od 0 do 100%. Kompletnie losowemu ułożeniu najdłuższych osi granул odpowiada wartość 0%, podczas gdy 100% reprezentuje idealnie równoległe ułożenie wszystkich najdłuższych osi granул.

Oda [6] rozróżnia dwa rodzaje anizotropii ośrodka wywołanej przestrzennym uporządkowaniem granul:

1 - anizotropia spowodowana wyróżnionym kierunkiem ułożenia niesferycznych granul,

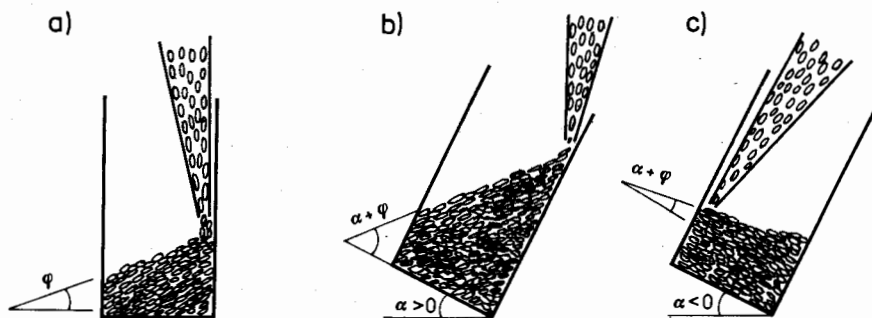
2 - anizotropia spowodowana wyróżnionym kierunkiem koncentracji normalnych do punktów styku ziaren.

Anizotropia ta spowodowana jest przez fakt, że każda cząstka dąży do zajęcia najbardziej stabilnej pozycji w polu grawitacyjnym. Gdy ośrodek sypki składa się z niesferycznych granul mogą wystąpić oba typy anizotropii, natomiast gdy ośrodek składa się ze sferycznych cząstek, jedynie drugi typ anizotropii może się pojawić. Anizotropię ośrodka rozdrobnionego można wywołać na różny sposób. Oda [5] stosował do tego celu specjalne metody formowania próbki, dzięki czemu uzyskiwał różną przestrzenną orientację ziaren. Autor ten stwierdził, że podczas badań trójosiowego ściskania ze wzrostem kąta nachylenia najdłuższej osi ziaren piasku względem pionu rośnie kąt tarcia wewnętrznego osiągając maksimum przy poziomym ułożeniu granul. Inny sposób uzyskiwania anizotropii ośrodka polega na wstępnym zdeformowaniu próbki, podczas którego na skutek poślizgu między ziarnami ośrodek zyskuje różne własności mechaniczne w różnych kierunkach [3].

W przypadku badania ośrodków złożonych z ziarna zbóż należy spodziewać się bardzo wyraźnego efektu anizotropii ośrodka wywołanej wyróżnionym kierunkiem ułożenia ziaren na skutek wyraźnej niesferyczności ziaren i ich geometrycznego podobieństwa. Anizotropię tę łatwo zaobserwować już chociażby w silosie, gdy ziarna układają się najdłuższą osią poziomo podczas załadunku zbiornika, zaś obracają się o 90° w kierunku pionowym podczas wypływu. Podobne zjawisko układania się ziaren najdłuższą osią w kierunku ruchu obserwowano podczas badania procesu tarcia ziaren o materiały konstrukcyjne [2].

Metodyka przygotowania próbki ośrodka sypkiego

W opracowaniu tym rozważono bliżej możliwość wywołania anizotropii masy ziarna żyta podczas procesu formowania próbki ośrodka do badań trójosiowego ściskania. Badania przeprowadzono na ziarnie żyta ze względu na najbardziej niesferyczny kształt ziaren spośród wszystkich gatunków zbóż. W celu wywołania określonej orientacji ziaren wykorzystano zjawisko powstawania kąta naturalnego usypu ziaren oraz efekt układania się ziaren najdłuższą osią (w przybliżeniu) wzdłuż powstałego stożka. Metodykę przygotowania próbki do badań trójosiowego ściskania ilustrują rysunki 1a, b i c. Ziarno nasypywano równomiernym strumieniem ze zbiornika zasypowego z prostokątnym otworem wylotowym o wymiarach 8 x 24 mm do gumowej membrany umieszczonej w sztywnej, dwuczęściowej, walcowej formie. Zbiornik zasypowy umieszczony przy ścianie formy podnoszono do góry w miarę napełniania formy



Rys. 1. Sposób przygotowania próbki

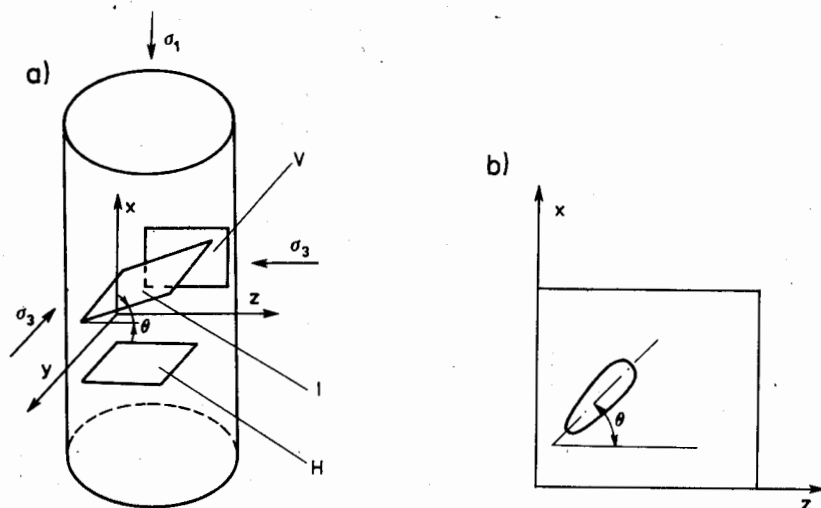
ziarnem, tak aby otwór wylotowy znajdował się zawsze około 20 mm powyżej wierzchołka swobodnej powierzchni usypującego się ziarna. Po wypełnieniu całej formy badanym ośrodkiem zamocowywano górną cylindryczną pokrywę próbki. Następnie, zgodnie z opracowaną wcześniej metodyką, wytworzano podciśnienie wewnątrz próbki [1]. Dzięki temu próbka zyskiwała sztywność kształtu, co pozwalało wyjąć ją z formy oraz umieścić w komorze ciśnieniowej bez obawy o naruszenie wytworzonej w trakcie formowania próbki przestrzennej struktury ośrodka. W ten sposób przygotowana walcowa próbka miała następujące wymiary: $\varnothing=150$ mm, $H=300$ mm.

Kąt zawarty między swobodną powierzchnią sypanego ziarna a podstawą próbki zmieniano poprzez pochylanie formy względem pionu podczas nasypywania ziarna. Ponieważ ziarna układają się na ogół najdłuższą osią równoległe do tworzącej stożka naturalnego usypu, zatem zmieniając pochycenie formy względem pionu zmieniano równocześnie preferowaną przestrzenną orientację ziaren względem układu odniesienia związanego z próbką. Do dalszych badań wybrano pięć wartości kąta pochycenia próbki: $\alpha = 0^\circ$ (rys. 1a), $\alpha = 20^\circ$ i 40° (rys. 1b) oraz $\alpha = -20^\circ$ i -40° (rys. 1c). Kąt naturalnego usypu ziarna żyta wynosił $\varphi = 19^\circ$. Dodatkowo w celach porównawczych przygotowywano próbkę w następujący sposób. Ziarno nasypywano do pionowej formy ($\alpha = 0^\circ$) umieszczając otwór wylotowy zbiornika zasypowego wzdłuż osi symetrii próbki, a nie jak poprzednio przy ścianie. Zastosowano w tym przypadku dwa rodzaje otworu wylotowego zbiornika zasypowego: poprzednio stosowany otwór prostokątny oraz okrągły o średnicy 10 mm.

Każdorazowo ta sama ilość ziarna wypełniała całą objętość formy, w związku z czym otrzymywano zawsze tę samą porowatość ośrodka, równą w tym przypadku 46,5%. Wilgotność ziarna wynosiła 10,5%. Tak przygotowane próbki poddawano następnie trójosiowemu ścisłaniu przy stałej wartości ciśnienia bocznego: $\sigma_3 = 0,03$ MPa, 0,06 MPa oraz 0,09 MPa. Prędkość odkształcenia w kierunku osi symetrii próbki wynosiła $\dot{\epsilon}_1 = 0,0028$ s⁻¹. Próbkę ziarna deformowano do momentu osiągnięcia maksymalnej wytrzymałości, tj. maksymalnej wartości naprężenia σ_1 . Każdy wariant eksperymentu powtarzano trzykrotnie.

Ocena przestrzennej orientacji w próbce

Próbki ziarna, przygotowane zgodnie z omówioną wyżej metodyką, zalewano żywicą poliestrową w celu oszacowania stopnia uporządkowania najdłuższych osi ziaren. Po zastygnięciu żywicy próbkę przecinano w płaszczyźnie V i H (rys. 2a). Następnie na podstawie otrzymanych przekrojów wyznaczono, wprowadzone wcześniej, miary uporządkowania struktury. Dla kąta $\alpha = 20^\circ$ oraz dla przekroju V miary te wynosiły odpowiednio: $\bar{\theta} = 38^\circ$, $V \cdot M = 65\%$. Następnie przecinano próbkę w płaszczyźnie I (rys. 2a), przy czym kąt θ nachylenia przekroju I względem poziomu odpowiadał najbardziej prawdopodobnemu kierunkowi orientacji ziaren w przekroju V.

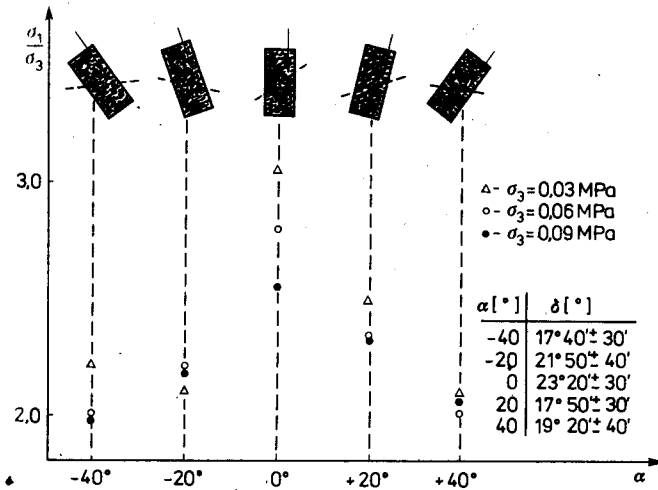


Rys. 2. Trzy płaszczyzny przekroju próbki

WYNIKI BADAŃ

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że sposób nasypywania ziarna do formy wpływa bardzo wyraźnie na otrzymane charakterystyki mechaniczne badanych próbek osrodka. Najbardziej wytrzymałe okazały się próbki nasypywane do pionowej formy. Ten rodzaj próbek wykazał również największą jednorodność deformacji. Na ogół nie obserwowano wyraźnej płaszczyzny ścicia, lecz próbka równomiernie pęczniała przyjmując kształt beczki. Zupełnie inaczej zachowywała się próbka nasypywana do formy pochylonej względem pionu pod kątem α . Próbka taka najszybciej traciła jednorodność deformacji i powstawała wyraźna płaszczyzna ścicia.

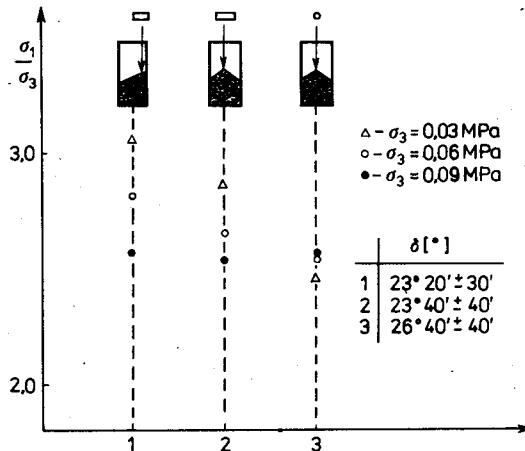
Najmniejsze odkształcenie $\epsilon_1 \approx 0,10$, przy którym występowało maksimum naprężenia σ_1 obserwowano dla próbek formowanych pod kątem $\alpha = 20^\circ$ oraz przy największym naprężeniu bocznym $\sigma_3 = 0,09$ MPa. Natomiast największe odkształcenie ($\epsilon_1 \approx 0,22$) konieczne było do zniszczenia próbek formowanych w pionowej formie dla



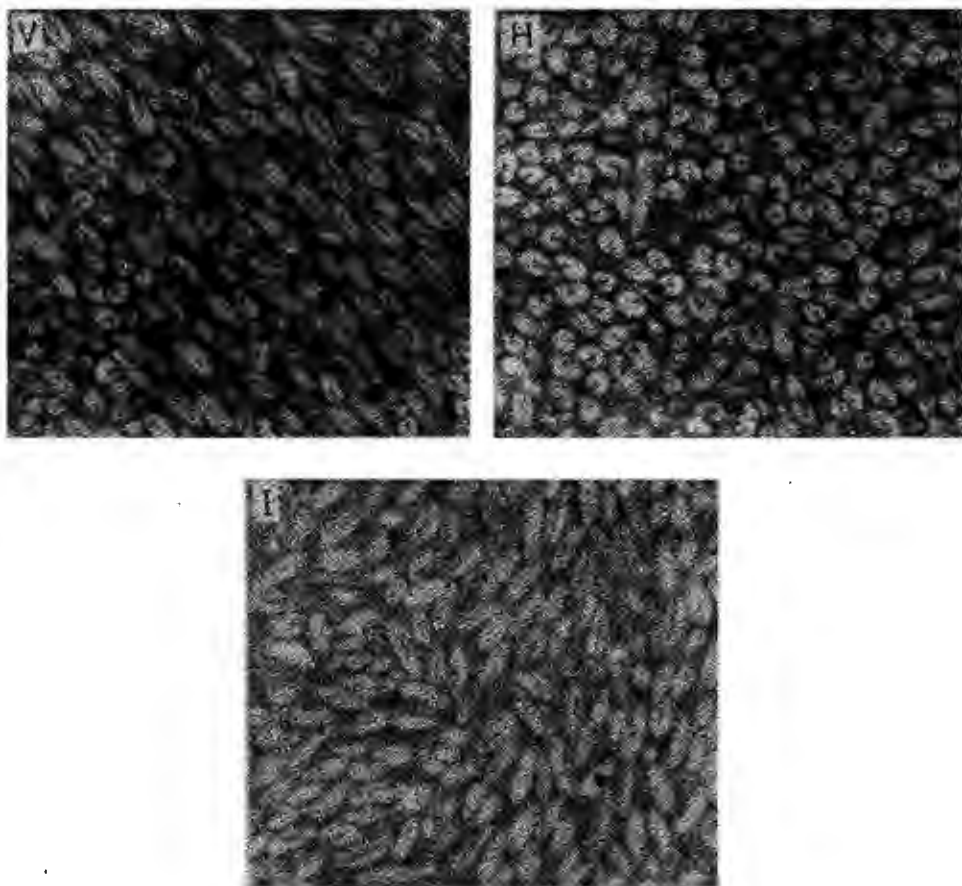
Rys. 3. Stosunek naprężeń σ_1/σ_3 dla pięciu wartości kąta pochylenia próbki α

wszystkich trzech wartości naprężenia bocznego σ_3 . Rysunek 3 przedstawia otrzymane wartości stosunku maksymalnego naprężenia σ_1 do stałego naprężenia σ_3 w funkcji kąta pochylenia formy względem pionu α . Z otrzymanych danych wynika, że ze wzrostem kąta α maleje wartość stosunku naprężeń. Na rysunku tym zaznaczono dodatkowo schematycznie sposób formowania poszczególnych próbek, a także powstałą w trakcie deformacji płaszczyznę ścięcia (linia przerywana). Zaznaczone na rysunku nachylenie płaszczyzny ścięcia powtarzało się regularnie w każdym eksperymencie.

Rysunek 4 przedstawia otrzymane wartości stosunku naprężeń σ_1/σ_3 dla trzech sposobów nasypywania ziarna do pionowej próbki (co symbolicznie zostało oznaczone



Rys. 4. Stosunek naprężeń σ_1/σ_3 dla trzech sposobów przygotowania próbki



Rys. 5. Przekroje próbki wzdłuż trzech płaszczyzn V, H oraz I

na rysunku). Dla serii eksperymentów oznaczonych numerami 2 i 3 bardzo rzadko pojawiała się wyraźna płaszczyzna oraz nie zaobserwowano żadnej prawidłowości w nachyleniu płaszczyzny ścicia.

Na podstawie otrzymanych wartości maksymalnego stosunku naprężeń σ_1/σ_3 obliczono kąt tarcia wewnętrznego ośrodką zakładając spełnienie warunku plastyczności Coulomba-Mohra. Największe wartości kąta tarcia wewnętrznego σ otrzymano w przypadku próbki nasypywanej do pionowej formy, a zwłaszcza gdy próbka nasypywana była wzdłuż osi symetrii przez okrągły otwór wylotowy ($\sigma = 26^{\circ}40'$), natomiast wraz ze wzrostem kąta pochylenia próbki α malał wyraźnie kąt tarcia wewnętrznego przyjmując najniższą wartość $\sigma = 17^{\circ}40'$ dla kąta pochylenia próbki $\alpha = -40^{\circ}$.

WNIOSKI

1. Ośrodek sypki złożony z ziarna żyta wykazuje wyraźne efekty anizotropowe spowodowane wyróżnioną orientacją przestrzenną niesferycznych ziaren. Najmniejszy

kąt tarcia wewnętrzznego obserwowano w próbkach, dla których preferowany kierunek orientacji najdłuższych osi ziaren był w przybliżeniu równoległy do kierunku ścięcia próbki, natomiast próbki usypywane wzdłuż osi symetrii przez okrągły otwór wykazywały największy kąt tarcia wewnętrzznego ze względu na zachowanie warunku symetrii osiowej próbki.

2. Znajomość anizotropii ośrodka sypkiego, tj. znajomość wyróżnionego kierunku najdłuższych osi ziaren w próbce pozwala przewidzieć kierunek płaszczyzny ścięcia w badaniach trójosiowego ściskania.

3. Jednym ze sposobów uzyskiwania anizotropii ośrodka sypkiego jest wykorzystanie zjawiska układania się ziaren najdłuższą osią wzdłuż tworzącej stożka naturalnego usypania.

PIŚMIENNICTWO

1. Grochowicz M., Horabik J., Molenda M.: Zastosowanie aparatu trójosiowego ściskania do badania właściwości mechanicznych ośrodków rozdrobnionych pochodzenia roślinnego. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. (w druku).
2. Molenda M.: A method for determining the friction coefficient of grains on metal urfaces. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. (w druku).
3. Mróz Z., Drescher A., Hueckel T.: Doskonalenie metod badania parametrów płynięcia materiałów ziarnistych. Prace IPPT, 54, 1973.
4. Dda M.: Deformation mechanism of and in triaxial compression test. Soils and Foundations 12, 4, 1972, 45-63.
5. Oda M.: Fabric and their effects on the deformation behaviours of and. Fac. of Engng, Saitama University Japa, Special Issue 1976.
6. Oda M.: Significance of fabric in granular mechanics. Proc. of the U.S. - Japan Seminar on Continuum Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials, Gakujutsu Bunken Fukyu-kai, Tokyo 1978, 7-26.
7. Yamada Y.: Deformation characteristics of and in three dimensional stress state. Proc. of the U.S. - Japan Seminar on Continuum Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials, Gakujutsu Bunken Fukyu-kai, Tokyo 1978, 91-97.

Ю. Горабик, М. Моленда

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТИРОВКИ ЗЕРНА ПРОБЫ НА УГОЛ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ, ИЗМЕРЯЕМЫЙ МЕТОДОМ ТРЕХОСНОГО СЖИМАНИЯ

Р е з ю м е

Работа показывает результаты тестов трехосного сжатия проб зерна ржи. Особенное внимание обратили на процесс подготовки пробы для исследований. Пространственное расположение зерен в пробе описали 2 параметрами: плотностью упаковки и пространственной ориентировкой несферических зерен. В работе исследовали влияние начальной анизотропии пробы зерна ржи (вынужденной пространственной ориенти-

ровкой зерен) на механические свойства. Результаты представили в виде зависимости отношения напряжений σ_1/σ_3 от угла между направлением ориентировки зерен и системой отнесения. Przen - 250, -

J. Horabik, M. MOLENDА

INFLUENCE OF THE INITIAL ANISOTROPY OF GRANULAR MATERIAL ON THE ANGLE OF INTERNAL FRICTION MEASURED IN TRIAXIAL COMPRESSION TEST

S u m m a r y

A series of triaxial compression tests on bulk rye grain was carried out. Because the mechanical characteristics of granular material depend on the spatial arrangement of solid particles and associated voids therefore special attention was paid to the process of sample preparation during the formation of the fabric.

Spatial arrangement of particles in a sample can be described by two parameters: packing density and spatial orientation of non-spherical particles. Influence of the initial anisotropy of bulk rye grain (formed by forced spatial orientation of the grains in the sample) on their mechanical characteristics was investigated in this report. Results received were presented as the dependence of σ_1/σ_3 ratio on the angle between long axes of grains and the reference system.