

WPLYW WILGOTNOŚCI NA KĄT TARCIA WEWNĘTRZNEGO ZIARNA ZBÓŻ¹

J. Łukaszuk, M. Stasiak, R. Rusinek, J. Horabik

Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

e-mail: jlukas@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie: W pracy omówiono wyniki badań wpływu wilgotności ziarna pszenicy, jęczmienia, owsa i kukurydzy na kąt tarcia wewnętrznego. Pomiary przeprowadzono metodą bezpośredniego ścinania w aparacie Jenikego o średnicy komory pomiarowej 210 mm i wysokości złoża 80 mm. Wartości kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy, tej samej odmiany, porównano z wynikami uzyskanymi metodą trójosiowego ściskania. Stwierdzono, że przy wilgotności ziarna do 20% kąt tarcia wewnętrznego wyznaczany w teście bezpośredniego ścinania przy zastosowaniu zalecanej przez normę Eurocode 1 procedury przygotowania próbki pokrywa się ściśle z wartością wyznaczoną metodą trójosiowego ściskania w przypadku próbek zagęszczanych wibracyjnie.

Słowa kluczowe: ziarna zbóż, kąt tarcia wewnętrznego, test bezpośredniego ścinania, gęstość krytyczna.

WSTĘP

Ziarno zbóż w trakcie procesów przetwarzania podlega licznym operacjom transportu, mieszania, czyszczenia i składowania [2]. Przy opracowywaniu nowych konstrukcji maszyn i urządzeń oraz przy wprowadzaniu nowych technologii przerobu niezbędną jest m.in. wiedza o zachowaniu się złoża ziarna w warunkach zewnętrznych obciążeń mechanicznych [4]. Jednym z podstawowych parametrów materiałowych jest kąt tarcia wewnętrznego [11,13]. Decyduje on o oporach prze-

¹ Pracę wykonano w ramach projektu badawczego 5 PO6F 021 17 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1999-2002.

mieszczenia i wyznacza maksymalne naprężenie styczne jakie może przenieść materiał sypki. Istotny wpływ na wartość kąta tarcia wewnętrznego mają właściwości nasion tworzących ośrodek [12]. Najważniejsze z nich to: kształt, wymiary, powierzchniowe właściwości cierne i zdolność do odkształceń. Właściwości te determinowane są przez gatunek i odmianę a przede wszystkim przez wilgotność.

Do pomiaru parametrów materiałowych ośrodków sypkich opracowano i skonstruowano wiele aparatów zwanych aparatami ścinania. Na ogół dzieli się je na aparaty bezpośredniego i pośredniego ścinania [10]. Płaszczyzna ścinania w aparatach bezpośredniego ścinania wymuszona jest poślizgiem obu części aparatu względem siebie, natomiast w aparatach pośredniego ścinania strefa ta formuje się w sposób swobodny zależny wyłącznie od właściwości ośrodka i panującego w nim stanu naprężeń. Wybór metody pomiarowej uzależniony jest przede wszystkim od zastosowania wyników badań. W badaniach podstawowych najczęściej stosowana jest metoda trójosiowego ściskania pozwalająca na precyzyjne wyznaczanie zależności naprężenie – odkształcenie [8]. W przypadku określania podstawowych parametrów materiałów sypkich dla praktycznych zastosowań powszechnie stosowana jest metoda bezpośredniego ścinania, która pomimo swoich wad jak np. krótka droga ścinania i niejednorodny stan naprężeń w ośrodku jest najczęściej zalecana przez normy [3]. Do pomiaru kąta tarcia wewnętrznego metodą bezpośredniego ścinania najczęściej stosowany jest aparat Jenikego [9].

Podstawy teoretyczne i metody pomiarowe parametrów plastycznego płynięcia materiałów sypkich wywodzą się z gruntoznawstwa. Różnice we właściwościach fizycznych materiałów sypkich pochodzenia mineralnego i biologicznego sprawiają, że adaptowane metody należy stosować z bardzo dużą ostrożnością. Wspólną cechą nasion, różniącą je od sypkich materiałów mineralnych, jest ich duża odkształcalność. Wzrost wilgotności powoduje, że rosną odkształcenia pojedynczych nasion, a wraz z tym wzrasta odkształcenie próbki niezbędne do osiągnięcia stanu granicznego.

Wymienione czynniki wynikające ze specyficznych cech materiału i niedoskonałość metod pomiarowych powodują, że nawet dla celów praktycznych interpretacja wyników badań jest kłopotliwa [15]. Sprawia to, że wciąż zachodzi potrzeba doskonalenia metod pomiarowych, które umożliwiałyby osiąganie jak największych dokładności wyników [14].

Celem badań było określenie wpływu wilgotności na wartość kąta tarcia wewnętrznego ziarna zbóż wyznaczanego metodą bezpośredniego ścinania w aparacie Jenikego zgodnie z procedurą zalecaną przez normę Eurocode 1 [3].

PRZYGOTOWANIE MATERIAŁU I METODA POMIARU

Materiałem do badań było ziarno pszenicy, jęczmienia, owsa i kukurydzy o pięciu wartościach wilgotności w zakresie od 10 do 22%. Wilgotność określano metodą suszarkową. Zróżnicowanie wilgotności uzyskano przez dolewanie wody do materiału, który poddawano następnie mieszaniu w wolnoobrotowym mieszadle bębnowym przez 24 godziny.

Pomiary kąta tarcia wewnętrznego przeprowadzono metodą bezpośredniego ścinania w aparacie Jenikego o średnicy komory pomiarowej $D = 210$ mm i wysokości złoża ziarna $H = 80$ mm. Prędkość ścinania V wynosiła 10,8 mm/min. Zgodnie z zaleceniem normy Eurocode 1 ziarno nasypywano do formy bez wibracji i innych sił zagęszczających a następnie przykładano obciążenie normalne $\sigma_n = 100$ kPa i wykonywano standardowe obroty pokrywą komory w obu kierunkach o kąt 10° w celu konsolidacji próbki. Pomiary kąta tarcia wewnętrznego przeprowadzono dla pięciu wartości naprężenia normalnego σ_n : 20, 40, 60, 80 i 100 kPa w trzech powtórzeniach. W czasie pomiarów rejestrowano zależność naprężenia ścinającego od przemieszczenia $\tau(\Delta L)$. Siłę styczną mierzono przy pomocy głowicy tensometrycznej o wartości nominalnej 2 kN z dokładnością ± 4 N. Kąt tarcia wewnętrznego i kohezję obliczono z zależności:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + c$$

gdzie: τ - naprężenie ścinające,
 σ_n - naprężenie normalne,
 c - kohezja,
 φ - kąt tarcia wewnętrznego.

Do wyznaczenia kąta tarcia wewnętrznego przyjmowano maksymalną wartość naprężenia ścinającego τ .

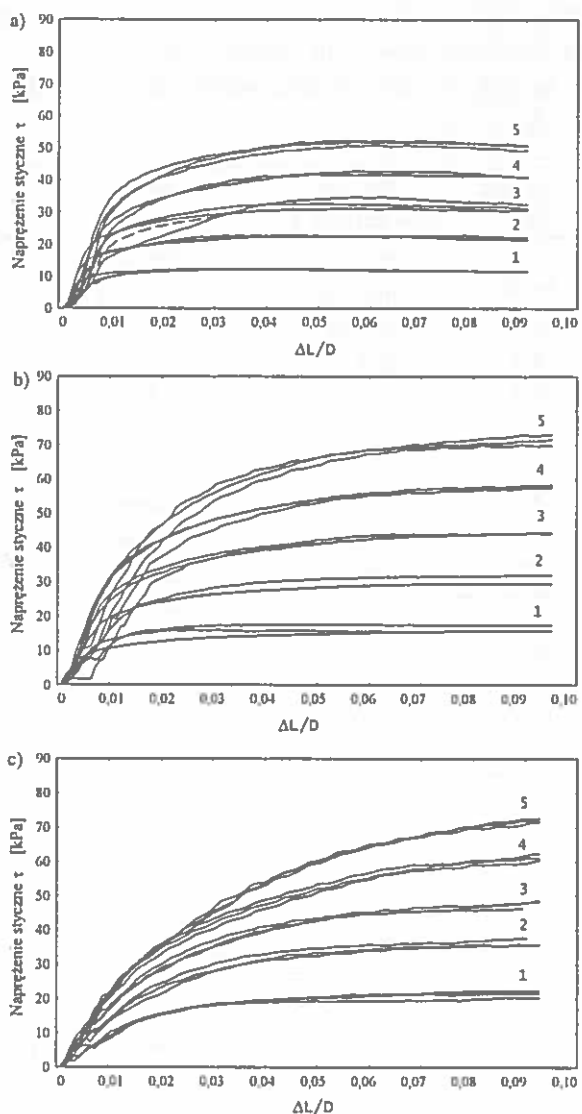
WYNIKI

Analizując zależność naprężenie ścinające - przemieszczenie stwierdzono, że dla małych wartości wilgotności ziarna i dla naprężeń normalnych σ_n dużo mniejszych od naprężenia konsolidującego naprężenie styczne τ stabilizowało się przy stosunkowo małym przemieszczeniu. Stosunek długości drogi ścinania do średnicy próbki $\Delta L/D$, przy którym następowała stabilizacja naprężenia τ , był mniejszy od 5%, a zatem mieścił się w przedziale zalecanym przez normę Eurocode 1. Natomiast, gdy naprężenie normalne było zbliżone do naprężenia konsolidacji osiągnięcie stabilizacji naprężenia stycznego wymagało dłuższej drogi ścinania. Jedynie dla ziarna pszenicy naprężenie to stabilizowało się przy $\Delta L/D$ nie przekraczającym 5% (Rys. 1a). Dla ziarna pozostałych gatunków zbóż

przy naprężeniu normalnym równym naprężeniu konsolidacji (100 kPa) nie osiągnięto stabilizacji naprężenia stycznego w zalecanym zakresie $\Delta L/D$ 5%. Wzrost wilgotności ziarna dodatkowo wydłużał drogę ścinania. W przypadku pszenicy o wilgotności 20% stabilizacja naprężenia ścinającego przy naprężeniu normalnym 100 kPa występowała przy przemieszczeniu wyraźnie wyższym od 5% średnicy próbki (Rys.1b). Przy wilgotności ziarna 22% wartość przemieszczenia była na tyle duża, że zrezygnowano z wyznaczenia kąta tarcia wewnętrznego (Rys. 1c).

Wartość odkształcenia, przy którym osiągnięty zostanie graniczny stan naprężenia zależy między innymi od ilorazu wielkości próbki do wielkości ziarna ośrodka [8]. Norma Eurocode 1 zaleca aby iloraz ten był nie mniejszy niż 40. W przypadku pszenicy i jęczmienia wartość ta mieściła się w zalecanym zakresie, zaś w przypadku owsa i kukurydzy została przekroczona. Powiększanie wymiarów komory pomiarowej aparatu bezpośredniego ścinania, tak aby zalecana wartość ilorazu obejmowała wszystkie badane materiały wiąże się z określonymi komplikacjami natury technicznej. Chcąc uniknąć nadmiernie dużych rozmiarów komory pomiarowej oraz poszukując możliwości dostosowania procedury wyznaczania kąta tarcia wewnętrznego ziarna zbóż do szerszego zakresu wilgotności zaproponowano poszerzenie przedziału $\Delta L/D$, w którym określane jest maksimum naprężenia stycznego z 5% do 10% średnicy próbki. Przeprowadzone pomiary wskazują, że w większości analizowanych przypadków stabilizacja naprężenia stycznego następowała przy wartości $\Delta L/D$ mniejszej niż 10% średnicy próbki. Oznacza to, że przyjęcie granicznej wartości 10% powinno umożliwić pomiar według jednolitej procedury w nieco szerszym niż rozważany w pracy zakresie wilgotności materiału.

Wyniki badań zestawiono w tabeli 1. Dla części rozważanych przypadków wartości kąta tarcia wewnętrznego, dla sąsiednich wartości wilgotności, nie różniły się. Natomiast w pełnym zakresie zmian wilgotności ziarna kąt tarcia wewnętrznego rósł istotnie wraz z jej wzrostem ($\alpha=0,05$). Największy wzrost występował dla ziarna pszenicy a najmniejszy dla owsa. Szybkość przyrostu kąta tarcia wewnętrznego ze zmianą wilgotności związana jest z różną budową morfologiczną ziarniaków poszczególnych gatunków zbóż. Ziarniaki jęczmienia i owsa, w odróżnieniu od ziarniaków pszenicy i kukurydzy, pokryte są plewkami kwiatowymi zbudowanymi przeważnie z substancji hydrofobowych [6]. Zawartość wody w plewkach jest więc mniejsza niż w ziarniaku. Wpływa to na zróżnicowanie powierzchniowych właściwości ziarniaków. Różna jest w związku z tym wartość kąta tarcia wewnętrznego oraz szybkość jego zmian ze zmianą wilgotności dla poszczególnych gatunków zbóż.



Rys. 1. Zależność naprężenia stycznego τ od ilorazu przemieszczenie - średnica próbki $\Delta L/D$ dla ziarna pszenicy o wilgotności: a - 11,7%, b - 20,0%, c - 22,0%, przy następujących wartościach naprężenia normalnego σ_n : 1 - 20 kPa, 2 - 40 kPa, 3 - 60 kPa, 4 - 80 kPa, 5 - 100 kPa.

Fig. 1. Shear stress τ versus ratio of the displacement to the sample diameter $\Delta L/D$ for wheat grain of the following moisture contents: a - 11,7%, b - 20,0%, c - 22,0%, for the following values of the normal stress σ_n : 1 - 20 kPa, 2 - 40 kPa, 3 - 60 kPa, 4 - 80 kPa, 5 - 100 kPa.

Tabela 1. Średnie wartości kąta tarcia wewnętrznego, kohezji oraz gęstości złoza ziarna po konsolidacji wraz z odchyleniami standardowymi dla badanych gatunków zbóż.

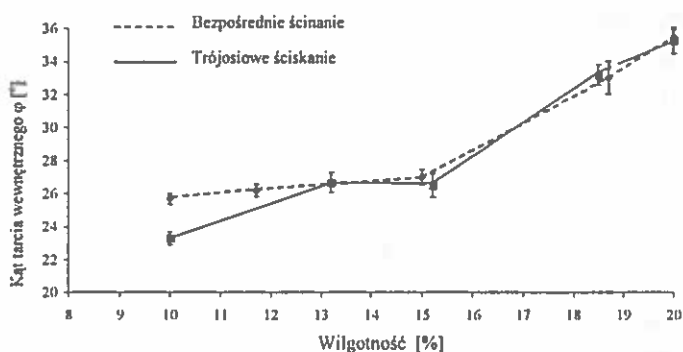
Table 1. Mean values of the angle of internal friction, cohesion and bulk density of cereal grain after consolidation with standard deviations.

Gatunek Odmiana	Wilgotność [%]	Kąt tarcia wewnętrznego φ [°]	Kohezja c [kPa]	Gęstość ρ [kg/m ³]
Pszenica Begra	10,0	25,7 \pm 0,3 <i>a*</i>	0,9 \pm 0,5 [#]	867 \pm 4
	11,7	26,2 \pm 0,4 <i>b</i>	2,8 \pm 0,5	858 \pm 6
	15,0	27,0 \pm 0,5 <i>b</i>	2,1 \pm 0,7	890 \pm 6
	18,7	33,0 \pm 1,0 <i>c</i>	5,1 \pm 0,5	802 \pm 10
	20,0	35,5 \pm 0,5 <i>c</i>	2,3 \pm 0,9	819 \pm 12
Jęczmień Rudnik	10,0	27,8 \pm 0,4 <i>a</i>	3,6 \pm 0,6	790 \pm 9
	12,5	28,5 \pm 0,5 <i>b</i>	4,7 \pm 0,8	798 \pm 14
	15,0	31,2 \pm 0,3 <i>c</i>	3,9 \pm 0,4	805 \pm 9
	17,5	30,6 \pm 1,0 <i>d</i>	2,9 \pm 0,5	801 \pm 5
	20,0	33,2 \pm 0,5 <i>e</i>	5,5 \pm 0,7	784 \pm 11
Owies Borowiecki	10,0	22,1 \pm 1,1 <i>a</i>	0,4 \pm 1,4 [#]	703 \pm 18
	12,5	22,4 \pm 0,9 <i>a</i>	1,1 \pm 1,3 [#]	707 \pm 3
	15,0	24,0 \pm 0,5 <i>b</i>	2,2 \pm 0,6	721 \pm 9
	17,5	23,9 \pm 1,0 <i>b</i>	4,0 \pm 1,1	726 \pm 17
	20,0	26,4 \pm 1,7 <i>c</i>	6,5 \pm ?,0	710 \pm 7
Kukurydza Mieszko	710,0	26,7 \pm 0,6 <i>a</i>	3,4 \pm 0,7	838 \pm 5
	12,5	31,7 \pm 0,5 <i>b</i>	6,1 \pm 0,9	814 \pm 13
	15,0	32,0 \pm 1,4 <i>b</i>	5,6 \pm 1,8	820 \pm 14
	17,5	33,4 \pm 0,8 <i>c</i>	5,9 \pm 1,1	814 \pm 10
	20,0	33,6 \pm 1,5 <i>c</i>	8,8 \pm 1,6	819 \pm 11

*Wartości oznaczone tym samym symbolem nie różnią się istotnie na poziomie $\alpha = 0,05$.

Kohezja była istotnie większa od zera (za wyjątkiem trzech przypadków oznaczonych w tabeli symbolem - #) i wykazywała tendencję wzrostu wraz ze wzrostem wilgotności. Indeks płynięcia, czyli stosunek wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie do maksymalnej wartości większego naprężenia głównego [9], na ogół był mniejszy niż 0,1. Materiał taki nazywany jest swobodnie płynącym. Jedynie w przypadku owsa i kukurydzy o wilgotności 20% indeks płynięcia wyniósł odpowiednio 1,1 oraz 1,36 klasyfikując materiał jako łatwo płynący. Potwierdza to powszechnie akceptowany pogląd, że materiały sypkie o wielkości ziarna powyżej 0,25 mm na ogół płyną swobodnie [1,10].

Rysunek 2 przedstawia porównanie wartości kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy wyznaczanych metodą Jenikego z wynikami badań przeprowadzonych przez Horabika i Łukaszuka [7] metodą trójosiowego ściskania w analogicznym zakresie wilgotności. Próbkę trójosiowego ściskania zagęszczane były wibracyjnie. Gęstość zawierała się pomiędzy 766 kg/m^3 dla wilgotności 20% a 826 kg/m^3 dla wilgotności 10%. Istotnym problemem było przygotowania próbek do badań trójosiowego ściskania o gęstości zbliżonej do gęstości krytycznej, co pozwalałoby maksymalnie skrócić drogę ścinania. Wysoką zgodność wartości kąta tarcia wewnętrznego wyznaczanych dwoma metodami w rozważanym zakresie wilgotności ziarna uzyskano dzięki rygorystycznemu przestrzeganiu procedury przygotowania próbek trójosiowego ściskania oraz rozszerzeniu w metodzie Jenikego zakresu przemieszczenia, w którym określane było maksimum naprężenia stycznego.



Rys. 2. Porównanie wartości kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy odmiany Begra wyznaczanych metodą bezpośredniego ścinania i trójosiowego ściskania [7] (wartość średnia \pm odchylenie standardowe).

Fig. 2. Comparison of values of the angle of internal friction of wheat grain cultiv. Begra measured with the direct shear and the triaxial compression [7] tests (mean value \pm standard deviation).

WNIOSKI

1. Rozszerzenie w metodzie bezpośredniego ścinania zakresu przemieszczenia, w którym określana była maksymalna wartość naprężenia stycznego, z zalecanych przez normę Eurocode 1 5% do 10% średnicy próbki, umożliwiło wyznaczenie dokładnych wartości kąta tarcia wewnętrznego ziarna badanych odmian zbóż w zakresie wilgotności do 20%.

2. Ze wzrostem wilgotności ziarna rósł kąt tarcia wewnętrznego. Największy wzrost występował w przypadku ziarna pszenicy a najmniejszy w przypadku owsa. Różna szybkość przyrostu kąta tarcia wewnętrznego ziarna badanych gatunków zbóż ze zmianą wilgotności wynika najprawdopodobniej z różnic w budowie okrywy owocowo-nasiennej ziarniaków.
3. Badania porównawcze przeprowadzone na ziarnie pszenicy odmiany Begra wykazały, że w zakresie wilgotności ziarna od 10 do 20% wartości kąta tarcia wewnętrznego wyznaczone w teście bezpośredniego ścinania, przy zastosowaniu zalecanej przez normę Eurocode 1 procedury przygotowania próbki oraz poszerzeniu zakresu przemieszczenia z 5 do 10% średnicy próbki, pokrywają się z wartościami wyznaczonymi metodą trójosiowego ściskania.

PIŚMIENICTWO

1. **Blight G.E.:** Effect of moisture on properties of grain stored in silos. *Bulk Solids Handling*, 15(2), 209-213, 1995.
2. **Byszewski W., Haman J.:** Gleba - maszyna - roślina. PWN, Warszawa 1977.
3. **ENV 191-4 Eurocode 1:** Basis of design and actions on structures-part 4. Actions in silos and tanks. European Committee for Standardization. Central Secretariat: rue de Stassart 36, B-1050 Brussels.
4. **Frączek J.:** Tarcie ziarnistych materiałów roślinnych. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kollątaja w Krakowie*, Nr 252, Kraków, 1999.
5. **Frontczak J., Metzger T.:** Określenie zależności współczynnika tarcia wewnętrznego od modułu Younga ziarna kukurydzy o różnej wilgotności. *Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych*, 320, 81-88, 1987.
6. **Herse J. (red.):** Szczegółowa uprawa roślin. PWN, Warszawa 1976.
7. **Horabik J., Łukaszuk J.:** Pomiar kąta tarcia wewnętrznego ziarna pszenicy metodą trójosiowego ściskania. *Acta Agrophysica*, 37, 39-49, 2000.
8. **Horabik J., Łukaszuk J., Grochowicz M.:** Formation of shear band in a granular material during triaxial compression test. *International Agrophysics*, 14, 273-278, 2000.
9. **Jenike A.W.:** Storage and flow of solids. *Bull. 123, Eng. Expt. Sta., Utah State Univ.*, 1964.
10. **Kobiela S.:** Przyrządy i metodyka pomiaru parcia materiałów rozdrobnionych w zbiornikach. *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej*, 58, 1990.
11. **Laskowski J., Skonecki S.:** Pomiar współczynnika tarcia wewnętrznego pszenicy o różnej wilgotności i stopniu rozdrobnienia. *Acta Agrophysica*, 46, 95-104, 2001.
12. **Metzger T.:** Analiza wpływu wybranych cech fizycznych ziarna kukurydzy na wartość współczynnika tarcia wewnętrznego. *Praca Doktorska (maszynopis), AR Wrocław*, 1985.

13. Molenda M., Horabik J., Grochowicz M., Szot B.: Tarcie ziarna pszenicy. Acta Agrophysica, 4, 1995.
14. Mróz Z., Drescher A., Hueckel T.: Doskonalenie metod badania parametrów płynięcia materiałów ziarnistych. Prace IPPT PAN, 54, 1973.
15. Suchnicka A.: Problemy określania wytrzymałości gruntów. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej, 30, 31-35, 1979.

EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON THE ANGLE OF INTERNAL FRICTION OF CEREAL GRAIN

J. Łukaszuk, M. Stasiak, R. Rusinek, J. Horabik

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences

Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

e-mail: jlukas@demeter.ipan.lublin.pl

Summary: The influence of moisture content of wheat, barley, oat and corn grain on the angle of internal friction was investigated. Measurements were performed with the method of the direct shear test in Jenike shear cell of diameter 210 mm and height of grain layer of 80 mm. Comparison of the angle of internal friction obtained with the direct shear test according to the Eurocode 1 procedure with the values obtained with the triaxial compression test for vibratory compacted samples indicated good agreement of results for the moisture content up to 20%.

Key words: granular material, angle of internal friction, direct shear test, critical bulk density.