

Mateusz Stasiak, Marek Molenda
Zakład Fizycznych Podstaw Oceny i Ulepszania Materiałów Roślinnych
Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie

ZASTOSOWANIE METODY AKUSTYCZNEJ DO WYZNACZANIA MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI NASION RZEPAKU O RÓŻNEJ WILGOTNOŚCI

Streszczenie

Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie modułu sprężystości E nasion rzepaku przy zastosowaniu aktualnie rozwijanej metody akustycznej. W metodzie tej moduł sprężystości wyznacza się na podstawie prędkości poprzecznych fal akustycznych w złożu materiału. Wyznaczano własności złoża rzepaku odmiany Licosmos dla wilgotności od 6 do 15%. Stwierdzono, że moduł sprężystości rósł wraz ze wzrostem ciśnienia hydrostatycznego i malał z wilgotnością.

Słowa kluczowe: rzepak, właściwości mechaniczne, moduł sprężystości, fale akustyczne

Wstęp

Niektóre biopaliwa w postaci stałej używane bezpośrednio do celów energetycznych oraz rzepak używany do produkcji olejów roślinnych stosowanych w biopaliwach stanowią przykłady sypkich materiałów roślinnych. Znajomość zachowania mechanicznego tych materiałów, pomimo licznych badań nie jest wystarczająca a wymagania stawiane przez współczesne technologie wymuszają ich bardziej dokładne rozpoznanie. Do utrzymania kontroli nad procesem technologicznym niezbędna jest pełna wiedza o zachowaniu się tych materiałów w warunkach zewnętrznych obciążeń mechanicznych [Knowlton i in. 1994; Massoudi 2001]. Wymagana jest znajomości takich parametrów materiałowych, jak: gęstość ρ , moduł sprężystości E , współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne μ , kąt tarcia wewnętrznego ϕ , iloraz naporu k oraz indeks płynięcia i . W praktyce konstruowania urządzeń stosowanych w technologiach materiałów sypkich przyjmowana jest najczęściej empiryczna zależność modułu sprężystości od ciśnienia [Sawicki

1998]. Norma Polska [PN-B-03262-2002] zaleca uzależniać wartość modułu sprężystości od zakresu ciśnienia w złożu materiału sypkiego, które jest proporcjonalne do wysokości słupa ziarna w silosie. Najnowsza norma europejska Eurocode 1 [2003] zaleca wyznaczanie dwóch wartości efektywnego modułu sprężystości. Przy obciążaniu E_{SL} oraz przy odciażaniu próbki E_{SU} zależnych od współczynników K_L i K_U reprezentujących stosunki przyrostów naprężeń w kierunku poziomym i pionowym odpowiednio przy obciążaniu i odciażaniu.

W poszukiwaniu optymalnych procedur pomiarowych właściwości sypkich materiałów roślinnych podejmuje się próby zastosowania różnych metod stosowanych przez współczesną technikę. W wielu dziedzinach naukowych stosuje się zjawiska akustyczne. Powiązanie poziomu naporu z prędkością fal akustycznych wzdłużnych i poprzecznych daje możliwość wyznaczania właściwości mechanicznych [Dano i in. 2003; Fioravante i in. 2001]. Wyniki badań wykazują istotny wpływ zarówno wymiarów oraz właściwości mechanicznych pojedynczych ziarn, jak i wilgotności złoża [Weir 2001] na prędkość propagacji fal akustycznych.

Ostatnio podejmuje się próby zastosowania do badań sypkich materiałów roślinnych metod sprawdzonych w innych działach mechaniki [Sawicki, Świdziński 1998; Lipiński 2000]. Użycie w badaniach akustycznych przetwornika piezoelektrycznego typu *bender* umożliwiło wyznaczenie prędkości fal poprzecznych, dające szersze możliwości interpretacyjne poprzez związki z parametrami materiałowymi [Dano i in. 2003; Inciu i in. 2003]. M. in. zastosowano te przetworniki w aparatach trójosiowego ścinania i jednoosiowego ściskania [Dano i in. 2002]. Prędkość fali akustycznej w materiale sypkim związana jest z właściwościami mechanicznymi złoża, dlatego podejmowane są próby wyznaczania parametrów na podstawie pomiaru prędkości fali. Techniki akustyczne, szeroko stosowane w mechanice gruntów, mogą stać się wygodnym narzędziem w badaniu właściwości sypkich materiałów roślinnych. Stosowanie tych technik w aparatach trójosiowego ściskania może rozszerzyć zakres informacji o zachowaniu się materiałów podczas obciążenia.

Cel i zakres pracy

Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie modułu sprężystości E nasion rzepaku przy zastosowaniu aktualnie rozwijanej metody akustycznej. Moduł sprężystości wyznaczano na podstawie prędkości poprzecznych fal akustycznych w złożu rzepaku odmiany Licosmos o różnej wilgotności. Przyjęty zakres wilgotności od 6 do 15% odpowiadał występującemu w praktyce technologicznej.

Metoda

Do wyznaczania modułu sprężystości złoża materiału w próbce materiału, poddanej ciśnieniu hydrostatycznemu zastosowano metodę pomiaru prędkości fal akustycznych. Metoda ta znana jest w mechanice gruntów [Lipiński 2000; Inciu 2003] jednak dotychczas nie stosowano jej do wyznaczania właściwości mechanicznych sypkich materiałów roślinnych. Piezoelementy umieszczone w kopułce i podstawie aparatu pozwalają na nieniszczący i dokładny pomiar (Rys.1). Przyłożenie zmiennego napięcia do piezoelementu powoduje vibracje elementu i przechodzenie impulsu mechanicznego wzdłuż próbki. Zjawisko to jest odwracalne i mechaniczne drgania elementu odbiorczego powodują powstanie sygnału elektrycznego, który emituje element odbiorczy. Sygnały wejścia i wyjścia są odczytywane na oscyloskopie, dzięki któremu można odczytać czas przejścia poprzecznej fali akustycznej od nadajnika do odbiornika.

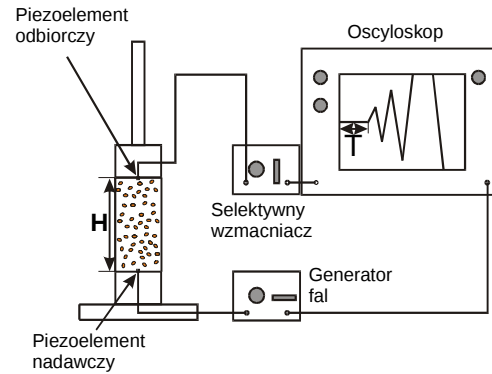
Drgania wywołane przez fale akustyczne w próbce materiału mają bardzo niewielką amplitudę odkształcenia, rzędu 10^{-6} - 10^{-5} m. Odpowiada to zakresowi odkształceń sprężystych złoża materiału. Dzięki temu, stosując zależności prędkości rozchodzenia się fali akustycznej od gęstości w sprężystym ośrodku izotropowym, można wyznaczyć moduł odkształcenia postaciowego, a następnie **moduł sprężystości** zależny od gęstości, prędkości fali poprzecznej oraz współczynnika Poissona na materiału:

$$E = \rho V_s^2 (1 + \nu)$$

gdzie:

- E – moduł sprężystości [MPa],
- ρ – gęstość objętościowa [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
- V_s – prędkość fali poprzecznej [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
- ν – współczynnik Poissona.

Badania prowadzono w komorze trójosiowej w warunkach hydrostatycznego ściskania z możliwością generowania i rejestracji fal akustycznych przy pomocy czujników piezoelektrycznych umiejscowionych w podstawie i kopułce aparatu (rys. 1). Zakres częstotliwości możliwych do uzyskania w aparacie wynosił od 1 do 10 kHz. Pomiar przeprowadzono dla sygnału wymuszającego o częstotliwości 1 kHz i amplitudzie 0,6 V.



Rys. 1. Stanowisko do pomiaru prędkości poprzecznych fal akustycznych
Fig. 1. Experimental set to determine acoustic shear waves

W układzie pomiarowym generator równocześnie wysyła sygnał do piezoelementu i bezpośrednio do oscyloskopu tak, że można dokładnie określić różnicę czasu, po jakim sygnał dociera do elementu odbiorczego bezpośrednio oraz przez próbkę materiału. Dzieląc wysokość próbki przez czas przejścia fali wyznacza się prędkość propagacji fal akustycznych, która zależy od właściwości sprężystych złoza. Badania przeprowadzono dla ciśnienia hydrostatycznego w przedziale 10-90 kPa, zwiększanego co 10 kPa. Prędkość wyznaczano również dla stanu początkowego – kiedy nie wywoływano ciśnienia w próbce materiału. Stan ten oznaczony jest na wykresach danych eksperymentalnych jako 0 kPa.

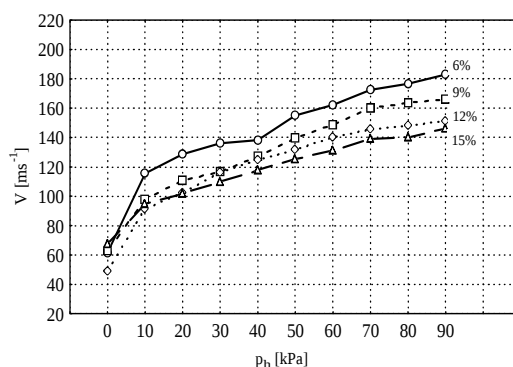
W każdym przypadku średnica początkowa próbki wynosiła około 70 mm, a wysokość 150 mm. Przed przystąpieniem do wykonywania pomiaru mierzono średnicę oraz wysokość początkową próbki. W czasie trwania eksperymentu mierzono, zmieniającą się w trakcie zwiększania ciśnienia, wysokość próbki za pomocą układu pomiarowego z indukcyjnym czujnikiem przemieszczenia o zakresie 50 mm i dokładności $\pm 0,05$ mm.

Wyniki badań i dyskusja

Prędkość propagacji fal akustycznych

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi zależności prędkości poprzecznych fal akustycznych od ciśnienia hydrostatycznego $V_s(p_h)$ dla złoza rzepaku. Zakres ciśnienia wynosił od 0 (stan początkowy) do 90 kPa, a wilgotność od 6 do 15%. Prędkość fal akustycznych V_s zwiększała się w miarę wzrostu ciśnienia hydrostatycznego p_h . Wynika to prawdopodobnie z przyrostu powierzchni kontaktów pomiędzy

poszczególnymi ziarnami ośrodka poddawanego wyższemu ciśnieniu i w konsekwencji z łatwiejszego przekazywania energii pomiędzy cząsteczkami. Największą zmienność wartości V_s ze wzrostem ciśnienia hydrostatycznego, stwierdzono dla rzepaku o wilgotności 6%. Prędkość wzrastała od około $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ przy ciśnieniu hydrostatycznym 0 kPa do około $180 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ przy ciśnieniu maksymalnym, a więc trzykrotnie.



Rys. 2. Wartości średnie prędkości fal akustycznych w złożu nasion rzepaku o różnej wilgotności dla ustalonych poziomów ciśnienia hydrostatycznego

Fig. 2. Mean values of shear waves velocities of rapeseed beddings of four levels of moisture content and hydrostatic pressure up to 90 kPa

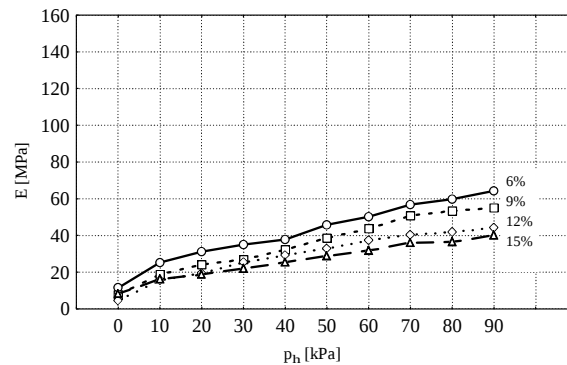
Najwyższe wartości prędkości poprzecznych fal akustycznych V_s otrzymano dla rzepaku o wilgotności 6%. Jedynie przy minimalnym ciśnieniu ($p_h = 0 \text{ kPa}$, stan początkowy), prędkość była zbliżona do wartości odpowiadających wyższym wilgotnościom. Najniżej usytuowany był przebieg $V_s(p_h)$ dla rzepaku o maksymalnej wilgotności równej 15%.

Prędkość poprzecznych fal akustycznych zależała od wilgotności i malała z jej wzrostem. Dla stanu początkowego ($p_h = 0 \text{ kPa}$) najniższą prędkość około $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ stwierdzono dla rzepaku o wilgotności 12%. Dla pozostałych wartości ciśnień spadek V_s ze wzrostem wilgotności wynosił około 20%, a dla maksymalnego ciśnienia równego 90 kPa prędkość malała od około $180 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do około $140 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Najmniejszą zmianę prędkości fal akustycznych o około $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ odnotowano dla ciśnienia hydrostatycznego 40 kPa .

Moduł sprężystości

Na podstawie wyznaczonych prędkości poprzecznych fal akustycznych V_s oraz gęstości ρ i współczynnika Poissona ν obliczono moduł sprężystości E , stosując

opisaną wcześniej procedurę. Wyznaczone wartości średnie E dla czterech poziomów wilgotności w i dziesięciu ciśnień p_h przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Średnie wartości modułu sprężystości złoża nasion rzepaku o różnej wilgotności dla ustalonych poziomów ciśnienia hydrostatycznego

Fig. 3. Mean values of modulus of elasticity of rapeseed beddings of four levels of moisture content for ten levels of hydrostatic pressure

Stwierdzono, że moduł sprężystości rósł wraz ze wzrostem ciśnienia hydrostatycznego i malał z wilgotnością. Najwyższe wartości E wynoszące od 10 do 62 MPa otrzymano dla nasion rzepaku o wilgotności 6%. Najniższe, zawierające się w przedziale od 5 do 40 MPa, otrzymano dla maksymalnej wilgotności. Największy zakres zmian modułu E ze wzrostem ciśnienia, wynoszący 52 MPa, stwierdzono dla minimalnej wilgotności. Najniższy zakres tych zmian, wynoszący około 30 MPa, stwierdzono dla wilgotności 15%. Spadek wartości E z przyrostem wilgotności rósł ze zwiększaniem ciśnienia hydrostatycznego. Największy spadek 22 MPa, otrzymano przy $p_h = 90$ kPa, a najniższy nie przekraczający kilku MPa stwierdzono przy $p_h = 0$ kPa.

Stwierdzono istotny wpływ ciśnienia hydrostatycznego w aparacie trójosiowego ściskania na prędkość propagacji poprzecznych fal akustycznych V_s w złożu rzepaku. Zwiększenie ciśnienia p_h od 0 do 90 kPa powodowało nawet trzykrotny przyrost V_s . Wynika to prawdopodobnie z przyrostu powierzchni obszarów kontaktów wzajemnych w miarę zwiększania się deformacji ziaren. Również wilgotność złoża materiału sypkiego wpływała istotnie na prędkość V_s . Spadek prędkości V_s jest prawdopodobnie wynikiem przyrostu intensywności tłumienia przekazywania energii pomiędzy cząstkami ośrodka o wyższej wilgotności. Przyrost zawartości wody zwiększa udział efektu lepkości na granicy faz, co powoduje zmniejszenie prędkości fali akustycznej.

Wyniki uzyskane metodą akustyczną wykazały, że moduł sprężystości rośnie z przyrostem ciśnienia hydrostatycznego. Moya i in. [2002] w badaniach jednoosiowego ściskania pszenicy otrzymali podobne wyniki. Przyrost ciśnienia hydrostatycznego od 10 do 90 kPa skutkował wzrostem modułu E od 20 MPa do 120 MPa.

Wnioski

1. Metoda wyznaczania prędkości poprzecznych fal akustycznych może być skutecznie zastosowana do wyznaczania chwilowych wartości modułu sprężystości złoża nasion rzepaku.
2. Prędkość poprzecznych fal akustycznych V_s wzrasta wraz z ciśnieniem hydrostatycznym p_h i zależy od wilgotności materiału.
3. Wzrost wilgotności materiałów od 6% do 15% spowodował spadek prędkości poprzecznych fal akustycznych od $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ do $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
4. Wartości modułów sprężystości E wyznaczonych na podstawie prędkości poprzecznych fal akustycznych wynosiły od 5 MPa do 62 MPa i były w większości przypadków wyższe niż otrzymane w wyniku badań jednoosiowego ściskania.

Bibliografia

Dano Ch., Hareb H., Hicher P.Y. 2003. Characterization of Loire river sand in the small strain domain using new bender-extender elements. 16th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Washington, Seattle, July 16-18.

Dano Ch., Hicher P.Y. 2002. Evolution of elastic shear modulus in granular materials along isotropic and deviatoric stress path. 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, June 2-5.

Eurocode 1 2003. Basis of design and actions on structures. Part 4. Actions in silos and tanks. DD ENV 1991-4.

Fioravante V., Capoferri R. 2001. On the use of multi-directional piezoelectric transducer in triaxial testing. *Geotechnical testing Journal*, 24(3), 243-255.

Fioravante V., Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F., Manfredini G., Pedroni S. 1998. Assessment of the coefficient of the earth pressure at rest from shear wave measurements. *Geotechnique*, 48(5), 657-666.

Inciu G., Yesiller N., Kagawa T. 2003. Experimental investigations of dynamic response of compacted clayey soils. *Geotechnical Testing Journal*, 26(2), 1-17.

Knowlton T. M., Carson J. W., Klinzing G. E., Wen-Ching Yang 1994 The importance of storage, transfer and collection. *Chemical Engineering Progress*, vol. 90, No.4, 44-54.

Lipiński M.J. 2000. Shear wave velocity for evaluation of state of cohesionless soils. *Annals of Warsaw Agricultural University. Land Reclamation*. 29, 11-20.

Massoudi M. 2001. On the flow of granular materials with variable material properties. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 36, 25-37.

Moya M., Ayuga F., Guaita M., Aguado P. 2002. Mechanical properties of granular agricultural materials, *Transactions of the ASAE*, 45(5), 1569-1577.

Polska Norma PN-B-03262-2002: Silosy żelbetowe na materiały sypkie. Obliczenia statyczne, projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja.

Sawicki A., Świdziński W. 1998. Elastic moduli of non-cohesive particulate materials. *Powder Technology* 96, 24-32.

Weir G.J. 2001. Sound speed and attenuation in dense, non-cohesive air-granular systems. *Chemical Engineering Science* 26, 3699-3717.

APPLYING THE ACOUSTIC METHOD TO DETERMINE THE MODULUS OF ELASTICITY OF RAPE SEEDS WITH DIFFERENT HUMIDITY

Summary

The purpose of the study was to determine the modulus of elasticity E of rapeseeds by using the currently developed acoustic method. According to this method, the modulus of elasticity is determined based on the velocity of transverse acoustic waves in the material deposit. Determined were the properties of rapeseed belonging to the Licosmos variety, for the humidity from 6 to 15%. It was established that the modulus of elasticity increased with the increase of hydrostatic pressure and decreased with the humidity.

Key words: rapeseed, mechanical properties, modulus of elasticity, acoustic waves