

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Metody opisu zjawisk mechanicznych zachodzących w materiałach porowatych infiltrowanych płynami

Danuta Miedzińska¹

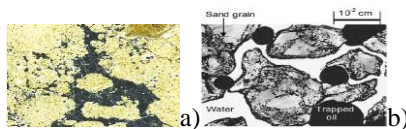
¹Institut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, Wojskowa Akademia Techniczna
email: danuta.miedzinska@ wat.edu.pl

STRESZCZENIE: Ośrodki porowate są to materiały, które są zbudowane z litej matrycy, w której są rozłożone pory, wraz z połączeniami między nimi. Taką budowę mają materiały naturalne, jak skały, gleby, drewno, ale i materiały wytworzone przez człowieka, jak filtry, środki opatrunkowe. W porach takich materiałów często znajdują się różnego rodzaju płyny (ropa, woda, gaz, leki, itd.). Opis zjawisk mechanicznych w takich materiałach jest zagadnieniem skomplikowanym, łączącym mechanikę ośrodków ciągłych z mechaniką płynów. W artykule przedstawione zostaną metody opisu tych zjawisk wraz ze wskazaniem przykładów ich zastosowań.

SŁOWA KLUCZOWE: materiały porowate, mechanika ośrodków porowatych, mechanika płynów

1. Wstęp

Materiały porowate, w których następuje przepływ płynów, lub w których porach ten płyn jest magazynowany są obiektem badań wielu dziedzin nauki i przemysłu.



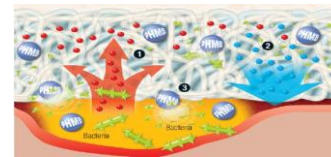
Rys. 1. Porowate geomateriały: a) mikroskopowe zdjęcie gleby [1], b) struktura skały zbiornikowej roponośnej [2]

Materiały te można znaleźć przede wszystkim w naukach o ziemi. Są to różnego typu geomateriały, jak skały pokładów gazo i roponośnych, gleby i grunty czy warstwy wodonośne (rys. 1) [1, 2]. Materiały te to także struktury pochodzenia roślinnego – drewno, łodygi roślin (rys. 2) [3], zwierzęcego – np. kości [4]. Materiały porowate są stosowane w medycynie, np. jako podłoża do opatrunków nasączanych lekami (rys. 3) [5], a także w wielu gałęziach przemysłu jako filtry, np. w elektrowniach czy samochodach [6, 7].

We wszystkich tych zastosowaniach istotne jest poznanie zjawisk towarzyszących przepływowi płynów w porach w powiązaniu z mechaniką materiału porowatego. W niniejszym opracowaniu przybliżone zostaną metody opisu tych zjawisk wraz ze wskazaniem przykładów ich zastosowań.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny struktury drewna klonu [3]



Rys. 3. Schemat działania porowatego opatrunku Suprasorb infiltrowanego substancją bakteriobójczą [5]

2. Charakterystyka materiałów porowatych i metod ich opisu

Porowate ciało stałe może być opisywane jako superpozycja litej matrycy i przestrzeni porowej (rys. 4).



Rys. 4. Ciało porowate jako superpozycja litej matrycy i przestrzeni porowej

Porowatość takiego ciała jest definiowana jako stosunek objętości porów do objętości całkowitej:

- wg Lagrange'a w odniesieniu do początkowej objętości:

$$\phi = \frac{V_p}{d\Omega_0} \quad (1)$$

- – wg Eulera w odniesieniu do aktualnej objętości:

$$n = \frac{V_p}{d\Omega} \quad (2)$$

Przyjmując $\epsilon = tr(\underline{\epsilon})$ jako wolumetryczną część tensora odkształcenia otrzymujemy:

$$\phi = (1 - \epsilon)n \quad (3)$$

Jeśli nie ma odkształcenia, obie wielkości porowatości są równe.

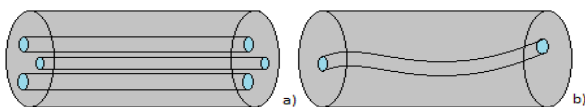
Zmianę porowatości po odkształceniu definiuje się w opisie Lagrange'a jako $\varphi = \phi - \phi_0$, a więc:

$$\varphi = \frac{V_p - V_p^0}{d\Omega_0} \quad (4)$$

Zmiana ta w opisie Eulera przyjmuje postać:

$$\varphi = n(1 - \epsilon) - n^0 \quad (5)$$

Istnieje wiele sposobów modelowania materiałów porowatych. Jednym z najprostszych jest wiązka rurek kapilarnych (rys. 5a). Podejście to jest łatwe do zrozumienia i odniesienia do rozkładu wielkości porów oraz obliczeń właściwości hydrodynamicznych uwzględniając przepływ Haagena-Poiseuille'a w każdym porze. Natomiast wyniki obliczeń zwykle nie pasują do danych eksperymentalnych, model nie uwzględnia połączenia między porami i ich krzywizn. Modyfikacją tego podejścia jest użycie wiązki krętych rurek kapilarnych. Rurki nie są proste, ale mają długość zależną od krętości ośrodka (rys. 5b). Jest to metoda bardziej odpowiadająca danym eksperymentalnym, natomiast wciąż nie uwzględnia połączeń między porami.



Rys. 5. Model ciała porowatego jako: a) wiązki rurek kapilarnych, b) wiązki krętych rurek kapilarnych

Problem ten może być rozwiązany z użyciem modelu pokazanego na rys. 6, w którym odwzorowane są pory i połączenia między nimi w litym materiale. Ta reprezentacja opisuje wszystkie cechy porowatego medium, przede wszystkim daje możliwość zmiany geometrii porów (można zastąpić kule czworościanami lub sześciącianami) i połączeń między nimi (zastępowanie cylindrów graniastoslupami o różnym przekroju poprzecznym), a także modyfikacji cechy zwanej łącznością, opisującej liczbę połączeń porów na por. Podejście to dobrze odzwierciedla wyniki eksperymentalne, uwzględnia łączność porów, natomiast do rozwiązania problemu potrzeba znacznej mocy obliczeniowych.



Rys. 6. Model odwzorowujący pory i połączenia między nimi w litym materiale

W opisie zjawisk mechanicznych występujących w materiale porowatym należy więc uwzględnić dwa typy deformacji:

- odkształcenie litej matrycy,
- deformację przestrzeni porowatej.

Jeśli uwzględnia się płyn wypełniający przestrzeń porową (wodę, powietrze, ropę, itd.), można uwzględnić dwa stany:

- gdy pory są wypełnione jednorodnym płynem, ciało stałe jest nasycone,
- gdy w ciele stałym występuje płyn w postaci kilku faz, ciało to jest w stanie nienasyconym.

Uwzględniając powyższe rozważania można stwierdzić, że niewiadome opisujące tzw. problem poromechaniczny (materiał porowaty wypełniony płynem) dzielą się na opis zachowania litej matrycy (naprężenie/odkształcenie) oraz zachowania płynu(ów) wypełniającego przestrzeń porową. Prosty problem poromechaniczny wymaga wyznaczenia 22 zmiennych, co pokazano w tab. 1.

Tabela 1. Zmienne do wyznaczenia w problemie poromechanicznym

Symbol	Nazwa zmiennej	Jednostka	Liczba niezależnych składowych
ξ	przemieszczenie	m	3
σ	tensor naprężenia	Pa	6
ϵ	tensor odkształcenia	-	6
ϕ	porowatość	-	1
p	ciśnienie płynu	Pa	1
m	jednostkowa masa płynu	kg/m ³	1
q	objętościowy przepływ płynu	m ³ /s	3
ρ	gęstość płynu	kg/m ³	1

3. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że problem opisu mechanicznego materiałów porowatych wypełnionych płynami jest zagadnieniem złożonym. Aby rozwiązać ten problem, należy określić zamknięty układ równań zawierający zarówno związki naprężeniowo-odkształceniowe, jak i równanie stanu płynu, prawo zachowania masy, opis przemieszczania się płynu w porach i równanie stanu ciała porowatego, łączące naprężenia, odkształcenia, porowatość i ciśnienie płynu w porach.

Literatura

- [1] Gołąb T., *Application of image analysis for soil macropore characterization according to pore diameter*, International Agrophysics, Vol. 21, No. 1, pp. 61-66, 2007.
- [2] Perazzo A., Tomaiuolo G., Preziosi V., Guido S., *Emulsions in porous media: From single droplet behavior to applications for oil recovery*, Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 256, pp. 305-325, 2018.
- [3] Safdari V., Ahmed M., Palmer J., Baig M.B., *Identification of Iranian commercial wood with hand lens*, Pakistan Journal of Botany, Vol. 40, No. 5, pp. 1851-1864, 2008.
- [4] Porrelli D., Abrami M., Pelizzo P., Formentin C., Ratti C., Turco G., Grassi M., Canton G., Grassi G., Murena L., *Trabecular bone porosity and pore size distribution in osteoporotic patients - A low field nuclear magnetic resonance and microcomputed tomography investigation*, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol. 125, 104933, 2022.
- [5] Glover D., Wicks G., *Suprasorb X + PHMB: the clinical evidence*, Journal of Wound Care, Vol. 13, pp. 15-21, 2009.
- [6] Bhattacharyya S., Dhinakaran S., Khalili A., *Fluid motion around and through a porous cylinder*, Chemical Engineering Science, Vol. 61, No. 13, pp. 4451-4461, 2006.
- [7] Hotza D., Di Luccio M., Wilhelm M., Iwamoto Y., Bernard S., Diniz da Costa J.C., *Silicon carbide filters and porous membranes: A review of processing, properties, performance and application*, Journal of Membrane Science, Vol. 610, 118193, 2020.