

WYZNACZANIE STAŁYCH MATERIAŁOWYCH DLA FIZYCZNYCH I KINEMATYCZNYCH SKŁADNIKÓW OŚRODKA POROWATEGO WYPEŁNIONEGO CIECZĄ

MARIUSZ KACZMAREK i JÓZEF KUBIK (POZNAŃ)

W pracy dokonano przeglądu statycznych i quasi-statycznych metod wyznaczania stałych materiałowych dla ośrodków porowatych nasyconych cieczą opisaną teorią Biota. Przedyskutowano sposób wykorzystania tych metod do określenia stałych, gdy ośrodek porowaty traktowany jest jako złożenie dwóch składników kinematycznych: 1) cieczy uwięzionej i porowatego szkieletu, 2) cieczy swobodnej. Praca zawiera zestawienie liczbowych wartości stałych dla najczęściej stosowanych materiałów porowatych.

1. WSTĘP

W większości prac poświęconych analizie stałych dla ośrodków porowatych wypełnionych cieczą za punkt wyjścia przyjmuje się liniową teorię konsolidacji, zapoczątkowaną przez BIOTA [1] i rozwijaną w pracach [2 i 3]. Dla tej teorii BIOT i WILLIS [4] zaproponowali sposób określenia stałych materiałowych konsolidacji za pomocą parametrów mierzalnych w eksperymencie. Jego istota sprowadza się do pomiaru zmian objętości porowatej próbki poddanej danemu hydrostatycznemu ciśnieniu cieczy, odpowiednio w eksperymencie z próbką powierzchniowo izolowaną oraz próbką niez izolowaną. Idea ta była następnie stosowana przez innych autorów do określenia charakterystyki materiałów skalnych [5 i 6] oraz gruntów [7 i 8]. Odrębną grupę stanowią metody określania stałych wykorzystujące rozwiązania jednowymiarowych zagadnień quasi-statycznych dla osiadania ośrodka [9] lub jego odpowiedzi na okresowozmienne obciążenia [10–12].

Należy zaznaczyć, że sformułowane przez Biota równania konsolidacji i występujące w nich stałe materiałowe odnoszą się do składników ośrodka rozróżnialnych z fizycznego punktu widzenia czyli tzw. składników fizycznych.

W ostatnich latach rozwinęło się nowe, strukturalne spojrzenie na badania dotyczące deformacji ośrodków porowatych zawierających ciecz zapoczątkowane przez DERSKIEGO [13], a następnie rozwijane przez innych autorów w pracach [14, 15 i 16]. Następstwem takiego ujęcia deformacji ośrodka

porowatego jest to, że równania teorii odniesione są do następujących składników rozróżnialnych z kinematycznego punktu widzenia: 1) porowatego szkieletu i cieczy w nim uwięzionej oraz 2) cieczy swobodnej. Pozwoliło to na bardziej wnikliwą analizę oddziaływań pomiędzy składnikami ośrodka z uwzględnieniem charakterystyki wewnętrznej struktury porów. Fakt ten wymaga rozróżnienia pomiędzy stałymi materiałowymi występującymi odpowiednio w związkach konstytutywnych składników fizycznych i składników kinematycznych. Zachodzi więc konieczność dokonania nie tylko przeglądu dotychczas proponowanych metod określania stałych, ale również ustalenia związku pomiędzy stałymi jednej i drugiej grupy.

Niniejsza praca zawiera analizę sposobów określania stałych materiałowych ośrodków porowatych wypełnionych cieczą na podstawie zagadnień statycznych i quasi-statycznych oraz zbiorcze zestawienie liczbowych wartości stałych dla różnych materiałów porowatych uzyskanych przez różnych autorów. Metody wyznaczania i interpretacji stałych przy wykorzystaniu zjawisk dynamicznych będą przedmiotem oddzielnego opracowania.

2. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA KONSTITUTYWNE ORAZ RÓWNANIA RUCHU DLA IZOTROPOWEGO OŚRODKA BIOTA

Matematyczny model ośrodka konsolidującego Biota oparty jest na następujących założeniach:

- 1) ośrodek składa się z dwóch fizycznie spójnych faz, porowatego szkieletu oraz cieczy całkowicie wypełniającej pory szkieletu; każda z faz charakteryzuje się odpowiednio jednym polem prędkości;
- 2) ośrodek konsolidujący jest ciałem jednorodnym i izotropowym;
- 3) porowaty szkielet posiada własności sprężyste, natomiast ciecz jest lepka i ściśliwa;
- 4) odkształcenia ośrodka są małe, a związki fizyczne są liniowe;
- 5) przepływ cieczy w ośrodku opisany jest prawem Darcy'ego;
- 6) porowatość objętościowa ośrodka jest liczbowo równa porowatości powierzchniowej i uważana jest za wielkość stałą.

Związki konstytutywne dla scharakteryzowanego powyżej ośrodka przy pominięciu wpływu lepkości na naprężenia w cieczy mają postać [1-3]

$$(2.1) \quad \begin{aligned} \sigma_{ij}^s &= 2N\varepsilon_{ij} + (A\varepsilon + Q\Theta) \delta_{ij}, \\ \sigma^f &= Q\varepsilon + R\Theta. \end{aligned}$$

W równaniach (2.1) ε_{ij} są współrzędnymi tensora odkształcenia szkieletu, ε i Θ oznaczają odpowiednio dylatacje szkieletu i cieczy, σ_{ij}^s są współrzędnymi tensora naprężenia w szkielecie oraz $\sigma^f = -pf_v$ jest naprężeniem przenoszonym przez ciecz, gdzie f_v oznacza porowatość objętościową, a p ciśnienie

efektywne (porowe) cieczy. Wielkości A , N , Q , R są stałymi opisującymi własności fizyczne ośrodka. Stała N odpowiada modułowi ścinania porowatego szkieletu, czyli $N = G = \mu$ (μ oznacza stałą Lamégo), który mierzy się tak samo jak w przypadku ośrodków jednofazowych. Sposób określenia pozostałych stałych omówiony będzie w następnym paragrafie.

Dla przypadków, w których wygodnie jest badać naprężenie całkowite, czyli

$$(2.2) \quad T_{ij} = \sigma_{ij}^s + \sigma^f \delta_{ij},$$

przytoczymy inną postać związków fizycznych. Oznaczając $N = \mu$, $\lambda = A - Q^2/R$ oraz wprowadzając dwie nowe stałe

$$(2.3) \quad M = \frac{R}{f_v^2}, \quad \alpha = \frac{Q+R}{R} f_v,$$

i funkcję zmian zawartości cieczy

$$(2.4) \quad \zeta = f_v (e - \Theta),$$

równania (2.1) można napisać w następującej postaci:

$$(2.5) \quad \begin{aligned} T_{ij} &= 2\mu\varepsilon_{ij} + (\lambda + \alpha^2 M) \varepsilon \delta_{ij} - \alpha M \zeta \delta_{ij}, \\ p &= -\alpha M \varepsilon + M \zeta, \end{aligned}$$

które określają naprężenia całkowite T_{ij} oraz ciśnienie porowe p jako funkcje składowych odkształcenia szkieletu ε_{ij} i zmiany zawartości cieczy ζ .

Równania ruchu dla ośrodka porowatego nasyconego cieczą przy wykorzystaniu koncepcji równań Lagrange'a, zaproponował Biot [3] w postaci

$$(2.6) \quad \begin{aligned} \sigma_{i,j}^s + r_i^s &= \varrho_{11} \frac{\partial}{\partial t} v_i^s + \varrho_{12} \frac{\partial}{\partial t} v_i^f, \\ \sigma_{,i}^f + r_i^f &= \varrho_{12} \frac{\partial}{\partial t} v_i^s + \varrho_{22} \frac{\partial}{\partial t} v_i^f, \end{aligned}$$

gdzie pominięto siły masowe. Wektory \mathbf{v}^s i \mathbf{v}^f są prędkościami odpowiednio szkieletu i cieczy oraz \mathbf{r}^s i \mathbf{r}^f oznaczają siły wzajemnego oddziaływania liniowo zależne od prędkości względnej składników:

$$(2.7) \quad r_i^s = -r_i^f = -b (v_i^f - v_i^s), \quad b = \frac{\mu^f}{k} f_v^2,$$

przy czym μ^f jest lepkością cieczy oraz k jest przepuszczalnością ośrodka.

Współczynniki masowe ϱ_{11} , ϱ_{12} , ϱ_{22} spełniają związki

$$(2.8) \quad \begin{aligned} \varrho_{11} + \varrho_{12} &= \varrho^s (1 - f_v), \\ \varrho_{12} + \varrho_{22} &= \varrho^f f_v, \\ \varrho_{11} > 0, \quad \varrho_{22} > 0, \quad \varrho_{11} \varrho_{22} - \varrho_{12}^2 &> 0, \end{aligned}$$

gdzie ϱ^s i ϱ^f są efektywnymi gęstościami odpowiednio szkieletu i cieczy. Uwzględnienie w (2.6) liniowych zależności geometrycznych

$$(2.9) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \varepsilon = \varepsilon_{kk}, \quad \Theta = \Theta_{kk} = U_{k,k}$$

oraz związków fizycznych (2.1) i (2.7) pozwala na napisanie przemieszczeniowych równań ruchu w formie

$$(2.10) \quad \begin{aligned} NV^2 u_i + (A + N) \varepsilon_{,i} + Q\Theta_{,i} &= \varrho_{11} \frac{\partial}{\partial t} v_i^s + \varrho_{12} \frac{\partial}{\partial t} v_i^f + b (v_i^f - v_i^s), \\ (Q\varepsilon + R\Theta)_{,i} &= \varrho_{12} \frac{\partial}{\partial t} v_i^s + \varrho_{22} \frac{\partial}{\partial t} v_i^f - b (v_i^f - v_i^s), \end{aligned}$$

gdzie \mathbf{u} i U są wektorami przemieszczeń szkieletu i cieczy.

Należy zaznaczyć, że związki fizyczne oraz równania ruchu sformułowane przez Biota odnoszą się do składników ośrodka rozróżnialnych z fizycznego punktu widzenia, czyli tzw. składników fizycznych. Z tym właśnie opisem ośrodka związane są proponowane dotychczas metody wyznaczania stałych materiałowych.

3. METODY WYZNACZANIA STAŁYCH MATERIAŁOWYCH DLA SKŁADNIKÓW FIZYCZNYCH

W liniowej teorii izotropowych ośrodków porowatych wypełnionych cieczą, przy uwzględnieniu związków fizycznych (2.1) lub (2.5), występują cztery niezależne stałe materiałowe, odpowiednio A , Q , R , N lub α , M , λ , μ . Ich określenie wymaga zaprojektowania odpowiednich doświadczeń, aby dokonać pomiaru niezależnych czterech wielkości. Bezpośredni pomiar występujących w teorii stałych nie jest jednak możliwy. Zachodzi więc potrzeba ustalenia czterech innych parametrów mierzonych doświadczalnie, które następnie pozwolą określić poszukiwane stałe.

Omówimy tutaj pomiary doświadczalne na podstawie zagadnień statycznych i quasi-statycznych, charakteryzując parametry pomiarowe BIOTA-WILLISA [4], które stanowią punkt wyjścia dla innych propozycji wyliczania stałych fizycznych.

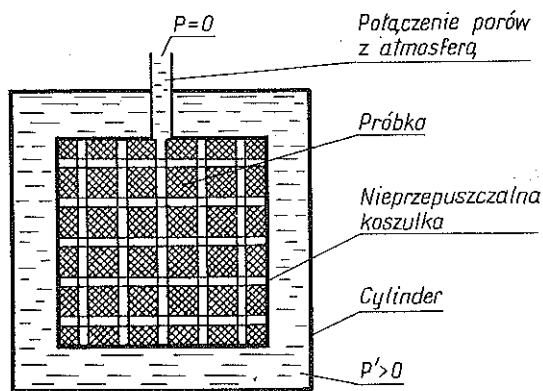
3.1. Statyczne próby ścisłości Biota-Willisa

Istota metody sprowadza się do pomiaru zmian objętości porowatej próbki poddanej danemu hydrostatycznemu ciśnieniu cieczy odpowiednio w eksperymencie z próbką powierzchniowo izolowaną oraz próbką nieizolowaną.

Autorzy proponują następujące pomiary: A) współczynnika ścisłości próbki izolowanej α , B) współczynnika ścisłości próbki nieizolowanej δ oraz C) współczynnika zawartości cieczy γ .

A. Próba wszechstronnego ściskania próbki izolowanej (rys. 1)

Warunki próby: 1) próbka jest osłonięta nieprzepuszczalną dla cieczy elastyczną koszulką i umieszczona w cylindrze pomiarowym wypełnionym



Rys. 1. Wszechstronne ściskanie izolowanej próbki

cieczą; 2) pory próbki wypełnione cieczą połączone są z atmosferą, co umożliwia utrzymywanie w nich zerowego ciśnienia.

Wielkości kontrolowane: 1) ciśnienie cieczy p' w cylindrze pomiarowym; 2) zmiana objętości (dylatacja) próbki, $\varepsilon = \Delta V/V$.

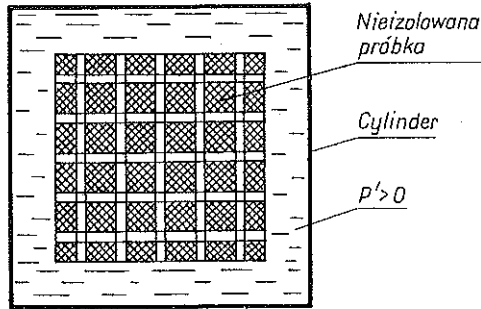
Wynik próby: określenie współczynnika ścisłości α próbki izolowanej

$$(3.1) \quad \alpha = -\frac{\varepsilon}{p'}$$

B. Próba wszechstronnego ściskania próbki nieizolowanej (rys. 2)

Warunki próby: próbka nieizolowana umieszczona w cylindrze pomiarowym wypełnionym cieczą.

Wielkości kontrolowane: 1) ciśnienie cieczy p' w cylindrze pomiarowym; 2) zmiana objętości (dylatacja) próbki $\varepsilon' = \Delta V'/V$.



Rys. 2. Wszechstronne ściskanie nieizolowanej próbki

Wynik próby: określenie *współczynnika ściśliwości* δ próbki nieizolowanej

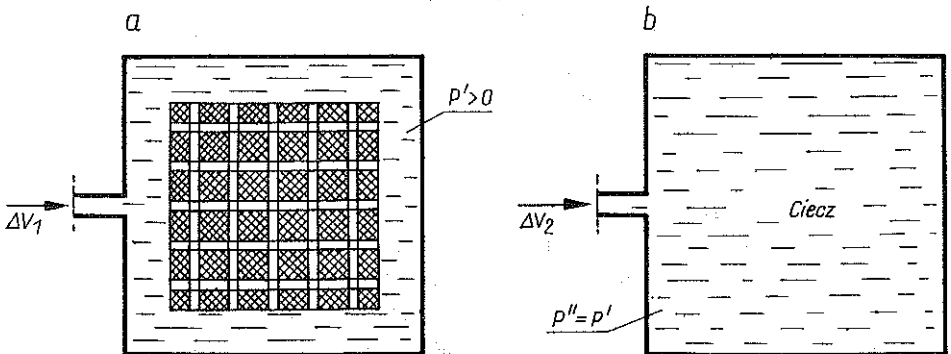
$$(3.2) \quad \delta = -\frac{\varepsilon'}{p'}$$

C. *Próba wszechstronnego ściskania próbki nieizolowanej i ściśliwości cieczy* (rys. 3)

Celem próby jest określenie współczynnika zawartości cieczy γ zdefiniowanego następująco:

$$(3.3) \quad \gamma = \frac{\zeta}{p'} = \frac{f_v(e - \Theta)}{p'}$$

gdzie wykorzystano wzór (2.4).



Rys. 3. Ściskanie nieizolowanej próbki i cieczy

Warunki próby: 1) próbka nieizolowana o jednostkowej objętości umieszczona w cylindrze pomiarowym (a) wypełnionym cieczą; 2) pory próbki całkowicie wypełnione cieczą identyczną jak w cylindrze; 3) wtlaczana ciecz do cylindra z próbka (a) i do cylindra bez próbki (b) wywołuje zmianę ciśnienia o jednostkę.

Wielkości kontrolowane: 1) ilość wtłoczonej cieczy ΔV_1 do cylindra (a) przy zmianie ciśnienia o jednostkę, 2) zmiana objętości (dylatacja) próbki nieizolowanej, $\varepsilon = \Delta V/V$, 3) ilość wtłoczonej cieczy ΔV_2 do cylindra (b) bez próbki przy zmianie ciśnienia o jednostkę.

Wynik próby: określenie współczynnika zawartości cieczy γ na podstawie zależności

$$(3.4) \quad \Delta V_2 - \Delta V_1 = \delta + \gamma - c,$$

gdzie c jest współczynnikiem ściśliwości cieczy. Znajomość c z innych prób pozwala określić γ bezpośrednio z próby ściskania nieizolowanej próbki na podstawie wzoru

$$(3.5) \quad \gamma = f_v (c - \delta).$$

W celu wyliczenia nieznanymi stałymi wykorzystujemy wyznaczone z kolejnych pomiarów wielkości w związkach fizycznych (2.1) lub (2.5). Podstawiając w miejsce naprężeń mierzone ciśnienia oraz zapisując odkształcenia za pomocą parametrów κ , δ , γ , p' i f_v otrzymamy dwa układy równań z niewiadomymi odpowiednio N , A , Q , R oraz μ , λ , α , M . Ich rozwiązanie można przedstawić następująco:

$$A = \frac{f_v^2 + \frac{\gamma}{\kappa} + \left(1 - 2f_v\right) \left(1 - \frac{\delta}{\kappa}\right)}{\gamma + \delta - \frac{\delta^2}{\kappa}} - \frac{2}{3} \mu, \quad N \equiv \mu,$$

(3.6)

$$Q = \frac{f_v \left(1 - f_v - \frac{\delta}{\kappa}\right)}{\gamma + \delta - \frac{\delta^2}{\kappa}}, \quad R = \frac{f_v^2}{\gamma + \delta - \frac{\delta^2}{\kappa}},$$

oraz

$$(3.7) \quad \lambda = \frac{1}{\kappa} - \frac{2}{3} \mu, \quad \alpha = \left(1 - \frac{\delta}{\kappa}\right), \quad M = \frac{1}{\gamma + \delta - \frac{\delta^2}{\kappa}}.$$

Statyczne próby ściśliwości Biota-Willisa wykorzystał FATT [5] do określenia wartości parametrów κ , δ , γ oraz stałej α dla materiałów skalnych. Wyznaczył współczynniki dla piaskowca wypełnionego naftą. Zastosował ideę pomiaru proponowaną przez Biota i Willisa w przyrządzie pozwalającym zmierzyć zmianę objętości porów i objętości całkowitej próbki przy zmianie wewnętrznego i zewnętrznego ciśnienia hydrostatycznego. Szukane współczynniki są wówczas określone wzorami (3.1), (3.2) i (3.5). Ponadto określono

stałą α występującą we wzorach (2.5). Wykorzystano przy tym zależność

$$\alpha = (\kappa - c_r) \kappa^{-1},$$

gdzie c_r jest współczynnikiem ściśliwości materiału skalnego.

Wartości współczynników κ , δ , γ oraz odpowiednich stałych N , A , Q , R i α przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1

Rodzaj ośrodka \ Stała materiałowa	Piaskowiec Boise + nafta	Piaskowiec Berea + woda	Piaskowiec Pecos + woda	Wapień Indiana + woda	Dolomit + woda	Kreda + woda
f_v —	-0,26	0,187	0,195	0,173	0,108	0,306
μ [N/m^2] $\times 10^{10}$		0,7608	0,5846		2,06*	
κ [m^2/N] $\times 10^{-10}$	2,1755	1,06	1,506		0,31	
δ [m^2/N] $\times 10^{-10}$	0,32	0,235	0,256		0,259	
γ [m^2/N] $\times 10^{-10}$	1,74	1,24	1,215		0,4753	
A [N/m^2] $\times 10^{10}$		0,7663	0,677		1,843	
Q [N/m^2] $\times 10^{10}$	0,077	0,1047	0,1235	0,0217	0,0043	0,0379
R [N/m^2] $\times 10^{10}$	0,129	0,0331	0,0379	0,04	0,0264	0,0572
λ [N/m^2] $\times 10^{10}$		0,435	0,2744		1,84	
α —	0,85	0,7785	0,83		0,126	
M [N/m^2] $\times 10^{10}$	0,497	0,947	0,997		2,26	
K [cm^2] $\times 10^{-12}$		1238,7	7,89			
P [N/m^2] $\times 10^{10}$		2,2879	1,846	3,52	5,96	1,37
Ciśn. [N/m^2] $\times 10^4$	23,93			23,93	23,93	4,786
Źródło danych	[5]	[6]			[17], (*)	[21]

Uwaga: Dane w obwódkach podano za autorami prac wymienionych w ostatniej rubryce; pozostałe dane wyliczono

Określenia parametrów Biota-Willisa dla kilku innych rodzajów skał wypełnionych wodą dokonali YEW i JOGI [6 i 17]. Przeprowadzili oni próby ściskania na aparacie umożliwiającym pomiar odkształceń osiowych e_a cylindrycznej próbki przy danym wszechstronnym ciśnieniu hydrostatycznym p . Wówczas współczynnik ściśliwości κ próbki izolowanej jest równy

$$\kappa = 3e_a p^{-1},$$

a współczynnik ściśliwości δ próbki nieizolowanej wynosi

$$\delta = 3e'_a p^{-1}.$$

Współczynnik zawartości cieczy γ obliczono ze wzoru (3.5), a dla wyliczenia modułu ścinania autorzy korzystają ze wzoru

$$\mu = \frac{3\bar{k}(1-2\nu)}{2(1-\nu)},$$

gdzie ν oznacza współczynnik Poissona, \bar{k} moduł ściśliwości objętościowej.

Liczbowe wartości współczynników κ , δ , γ i określone na ich podstawie stałe N , A , Q , R podano w tabelicy 1.

Przytoczone powyżej rezultaty pomiarów Fatta, Yewa i Jogi dotyczyły skał. Teoria Biota stosowana jest również do opisu deformacji gruntów. Ze względu na istotnie różne własności gruntów w porównaniu ze skałami

Tabelica 2

Stala materiałowa \ Rodzaj ośrodka	Elektrokorund + woda	Pianka poliur. + ciekłe silik.	Filc + ciekłe silik.	Gruboziarnisty piasek + woda	Gлина pylasta + woda	Il kaolinowy + woda
f_b —	0,316	0,33	0,3	0,3	0,4617	0,456
μ [N/m ²] $\times 10^6$	25330,0	0,0031	0,531	97,9	0,2	
κ [m ² /N] $\times 10^{-6}$	3200,0	123,0	0,872	0,0052	2,6	
δ [m ² /N] $\times 10^{-6}$	1270,0	7,4	0,0785	0,00015	0,045	0,002
γ [m ² /N] $\times 10^{-6}$	16600,	7,03	0,0949	0,00099	1,1	
A [N/m ²] $\times 10^6$	14989,	3,76	8,57	368,2	0,5	
Q [N/m ²] $\times 10^6$	570,0	2,09	7,78	239,2	0,22	11,2
R [N/m ²] $\times 10^6$	630,0	1,09	3,83	107,1	0,195	9,36
λ [N/m ²] $\times 10^6$	14470,0	0,006	0,79	129,0	0,252	
α —	0,602	0,94	0,91	0,97	0,9826	
M [N/m ²] $\times 10^8$	63,1	0,101	0,425	11,9	0,0092	
K [cm ²] $\times 10^{-8}$	2,67	968,0	0,372	3,62	$10^{-3} \div 10^{-5}$ *	$10^{-4} \div 10^{-6}$ *
E_e [N/m ²] $\times 10^6$						1,23
Ciśn. [N/m ²] $\times 10^4$					5,0	4,9
Źródło danych	[6]		[12]		[7], (*)-[22]	[9], (*)-[22]

Uwaga: Dane w obwódkach podano za autorami prac wymienionych w ostatniej rubryce; pozostałe dane wyliczone.

lub porowatymi materiałami konstrukcyjnymi, nie można korzystać bezpośrednio z techniki pomiarowej stosowanej do skał.

Sposób wyznaczania stałych dla gruntów na podstawie prób ściśliwości Biota-Willisa przedstawił DOMSKI [7]. Opis dokonywania pomiarów oraz niezbędne modyfikacje dotyczące zwłaszcza określenia parametru δ zawarto w pracy [18]. Liczbowe wyniki zamieszczono w tabelicy 2.

Inną propozycję określenia parametrów κ , δ , γ dla gruntu podaje DZIECIELAK [8] przy założeniu, że grunt składa się z n składników. Znane wielkości wyjściowe tworzą następujący zbiór parametrów: globalny moduł sprężystości E , globalny współczynnik Poissona ν , moduł sprężystości objętościowej K_i , udział objętościowy φ_i , (i -tego składnika gruntu) oraz współczynnik ściśliwości cieczy c i porowatość objętościowa f_b . Wówczas parametry

Biota-Willisa określają wzory

$$\kappa = \frac{3(1-2\nu)}{E}, \quad \delta = \sum_{i=1}^n \varphi_i \frac{1}{K_i}, \quad \gamma = f_v(c-\delta).$$

Moduł E można również wyrazić przez edometryczny moduł sprężystości E_e gruntu:

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} E_e.$$

W tym przypadku κ określa wzór

$$\kappa = \frac{3(1-\nu)}{(1+\nu)E_e}.$$

3.2. Określanie stałych na podstawie rozwiązań zagadnień quasi-statycznych

W odróżnieniu od statycznych prób ściśliwości Biota-Willisa, gdzie odpowiednich pomiarów dokonywano w stanie początkowym i końcowym procesu odkształcenia, istnieją metody określania stałych wykorzystujące rozwiązania jednowymiarowych zagadnień quasi-statycznych. Punktem wyjścia w tym przypadku jest uproszczony układ równań przemieszczeniowych (2.10)

$$(3.8) \quad \begin{aligned} NV^2 u_i + (A+N) \varepsilon_{,i} + Q\Theta_{,i} &= b(v_i^f - v_i^i), \\ (Q\varepsilon + R\Theta)_{,i} &= -b(v_i^f - v_i^i). \end{aligned}$$

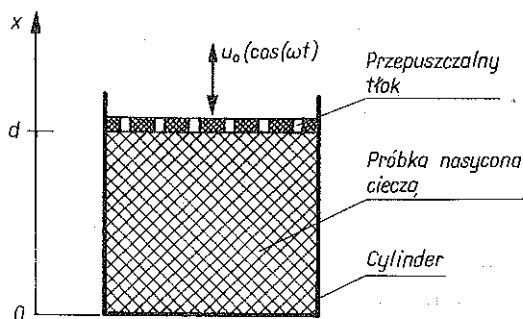
Rozwiązanie równań (3.8) dla zagadnienia osiadania ośrodka lub jego odpowiedzi na okresowo zmienne obciążenie przy konfrontacji z ich wartościami mierzonymi daje możliwość wyznaczenia poszukiwanych stałych. Te dwa sposoby omówimy poniżej.

3.2.1. *Jednowymiarowe osiadanie próbki w edometrze.* Sposób wyznaczenia stałych na podstawie znajomości funkcji osiadania gruntu w jednowymiarowym stanie odkształcenia realizowanym w edometrze przedstawił STRZELECKI [9]. Próbkę gruntu umieszczoną w edometrze obciąża się przez tłok niezmienną w czasie siłą P . Porowaty tłok umożliwia swobodny wypływ nadmiaru cieczy z próbki w czasie procesu osiadania (rys. 4). Osiadanie powierzchni próbki pod tłokiem, przy warunkach brzegowych

$$(3.9) \quad \begin{aligned} \sigma_{11}^s(h, t) + \sigma^f(h, t) &= -P\eta(t), \\ \sigma^f(h, t) &= 0, \quad u(0, t) = 0, \end{aligned}$$

określa funkcja

$$(3.10) \quad u(t) = -\frac{Ph}{E_e} \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \frac{H^2}{RE_e + H^2} S_1 \right),$$



Rys. 4. Osiadanie w edometrze

gdzie

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp \left[-\frac{R^2 E_e K \pi^2 (2n-1)^2 \cdot t}{4h^2 (RE_e + H^2)} \right], \quad H = Q + R,$$

oraz K jest współczynnikiem przepuszczalności a E_e jest edometrycznym modułem ścisłości związanym ze stałymi fizycznymi zależnością

$$(3.11) \quad E_e = 2N + A - \frac{Q^2}{R}$$

W doświadczeniu obserwowany jest przebieg osiadania w czasie jako efekt konsolidacji gruntu.

W celu wyznaczenia poszukiwanych stałych stosuje się procedurę numeryczną opartą na trójparametrowym modelu regresji nieliniowej. Wówczas rozwiązanie (3.10) napiszemy w postaci

$$(3.12) \quad Y = B_1 (1 + B_2 S_1) P,$$

$$S_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \exp \{ [-(2n-1)^2 B_3^{-1} \cdot t] \} (2n-1)^{-2},$$

gdzie wielkości

$$(3.13) \quad B_1 = \frac{1}{E_e}, \quad B_2 = -\frac{8}{\pi^2} \frac{H^2}{RE_e + H^2},$$

$$B_3 = \frac{4h^2 (RE_e + H^2)}{\pi^2 R^2 E_e K}, \quad Y = \frac{u}{h},$$

są parametrami modelu regresji. Ustalony doświadczalnie przebieg funkcji osiadania $u(t)$ umożliwia określenie parametrów B_1 , B_2 i B_3 . Następnie na podstawie wzorów (3.13) i przy założeniu, że iloraz δ/κ jest mały, obliczamy

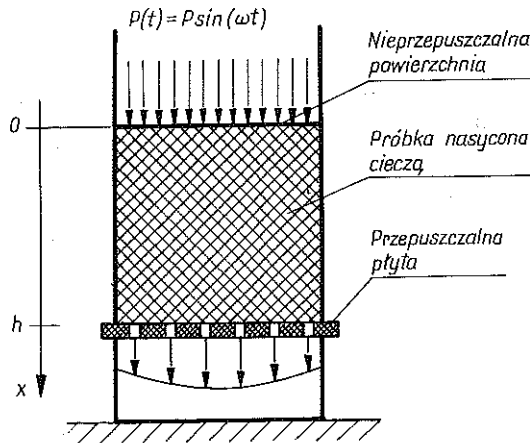
stałe E_e , R , $H = Q + R$, K w następujący sposób:

$$(3.14) \quad H = -\frac{\pi^2 B_2 E_e f_v}{(8 + \pi^2 B_2)(1 + f_v)}, \quad E_e = \frac{1}{B_1},$$

$$R = \frac{H f_v}{1 + f_v}, \quad K = \frac{4h^2 (E_e R + H^2)}{\pi^2 R^2 E_e B_3}.$$

Doświadczenia omówione w [9] zostały przeprowadzone dla iltu kaoliniowego. Wybrane wyniki liczbowe zamieszczono w tablicy 1. Należy zaznaczyć, że w przypadku, kiedy woda wypełniająca pory gruntu nie zawiera pęcherzyków gazu, istnieje dobra zbieżność stałych wyznaczonych wyżej opisaną metodą i metodą testów statycznych.

3.2.2. *Jednowymiarowe harmoniczne zmienne obciążenia próbki.* Kolejne dwie propozycje określania stałych opierają się na rozwiązaniu zagadnienia jednowymiarowego stanu odkształcenia harmonicznie obciążonej próbki. Pierwsza zaprezentowana w pracach Uklejewskiego [10 i 11] opracowana była do badania charakterystyki sprężystych ośrodków porowatych stosowanych jako dwufazowe wibroizolatory. Warunki doświadczenia przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Harmonicznie obciążona próbka

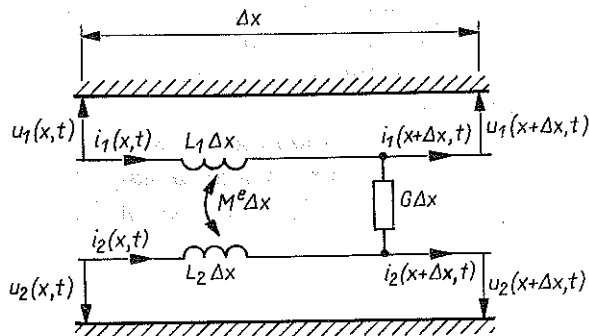
Wykorzystując własności analogii elektromechanicznych typu Firestone'a rozwiązania równań (3.8) z warunkami brzegowymi

$$(3.15) \quad \sigma^f(x=h, t) = 0, \quad u(x=0, t) = U(x=0, t),$$

$$u(x=h, t) = 0, \quad \sigma^f(x=0, t) + \sigma_{11}^s(x=0, t) = \bar{P}, \quad \bar{P} = \frac{P(t)}{F},$$

poszukiwano w grupie zagadnień elektrycznych opisanych równaniami tego samego rodzaju. We wzorach (3.15) u , U oznaczają przemieszczenia odpowiednio szkieletu i cieczy, F jest polem przekroju poprzecznego próbki oraz $P(t)$ zewnętrznym obciążeniem.

Elektrycznym analogiem rozważanego układu mechanicznego jest układ dwóch linii długich sprzężonych magnetycznie i konduktancyjnie jak pokazano na rysunku 6. W tym przypadku równania (3.8) dla zagadnienia jedno-



Rys. 6. Odcinek dwóch sprzężonych linii długich

wymiarowego są równoważne następującemu równaniu stanu:

$$(3.16) \quad \frac{dS(x)}{dx} = AS(x),$$

gdzie $S(x)$ jest wektorem stanu układu mechanicznego oraz A macierzą układu. Mają one postać

$$S = \begin{bmatrix} v^s(x) \\ v^f(x) \\ \sigma_{11}^s(x) \\ \sigma^f(x) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -Z_1 & -Z_M \\ 0 & 0 & -Z_M & -Z_2 \\ -Y_M & Y_M & 0 & 0 \\ Y_M & -Y_M & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

gdzie v^s , v^f oznaczają prędkości odpowiednio szkieletu i cieczy, σ_{11}^s , σ^f naprężenia w szkielecie i cieczy oraz gdzie immitancje (składowe macierzy A) układu elektrycznego są określone wzorami

$$Z_1^e = j\omega L_1, \quad Z_2^e = j\omega L_2, \quad Z_M^e = j\omega M^e, \quad Y_M^e = G, \quad j = \sqrt{-1},$$

immitancje zaś układu mechanicznego są następujące:

$$Z_1 = j\omega \frac{1}{M+2N}, \quad Z_2 = j\omega \left[\frac{1}{R} + \frac{Q^2}{R^2(M+2N)} \right],$$

$$Z_M = -j\omega \frac{Q}{R(M+2N)}, \quad Y_M = \frac{1}{C} = b, \quad j = \sqrt{-1}.$$

Występujące w macierzy A wielkości M , N , Q , R są poszukiwanymi stałymi materiałowymi ośrodka porowatego.

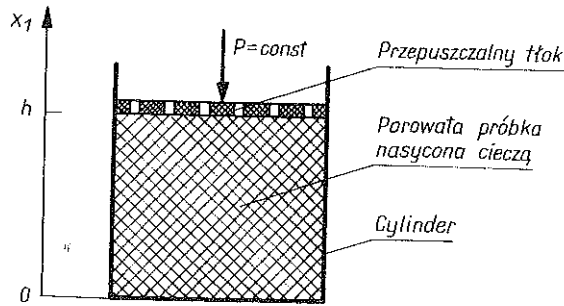
Rozwiązanie równania (3.16) z warunkami brzegowymi (3.15) w połączeniu z wielkościami mierzonymi

$$v^s(x=0), \quad v^f(x=h), \quad \sigma^f(x=0), \quad \bar{P}(x=0),$$

pozwala wyliczyć stałe A , Q i R , gdzie $A = M + Q^2 R^{-1}$.

Zakres stosowalności charakteryzowanej metody dotyczy teoretycznie wszystkich materiałów porowatych, na których można przeprowadzić próby przy obciążeniu harmonicznym (są to m.in. materiały porowate stosowane do celów wibroizolacji).

Inny wariant wykorzystania harmonicznie obciążonej próbki w jednowymiarowym stanie odkształcenia do wyznaczenia stałych α i M (wzory (2.5)), zaproponowali KIM i KINGSBURY [12]. Warunki próby przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Harmoniczne wymuszenie ruchu powierzchni próbki

Do rozwiązania układu równań przemieszczeniowych dla takiego zagadnienia wykorzystano metodę funkcji zespolonych. Otrzymano wzór określający moduł zespolony $\bar{E}(\omega)$ [19]:

$$(3.17) \quad \bar{E}(\omega) = \frac{\sigma_{11|a}}{u_0 d^{-1}} = \frac{\varrho(\lambda + 2\mu)}{\left[c_2 + \frac{c_1 \alpha}{\lambda + 2\mu} \left(\frac{\operatorname{tg} h \Omega d}{\Omega d} \right) \right]}$$

gdzie $\sigma_{11|a}$ jest normalnym naprężeniem na górnej powierzchni próbki, u_0 amplitudą przemieszczenia oraz d — wysokością próbki. Ponadto wprowadzono następujące oznaczenia:

$$c_1 = \frac{\mu^f \alpha}{k}, \quad c_2 = -\frac{\mu^f}{kM},$$

$$\varrho = c_2 + \frac{c_1 \alpha}{\lambda + 2\mu}, \quad \Omega = (1+j) \sqrt{\frac{\varrho \omega}{2}}, \quad j = \sqrt{-1},$$

gdzie μ^f jest współczynnikiem lepkości dynamicznej cieczy, ω oznacza częstość kołową, k współczynnik przepuszczalności oraz μ , λ , α i M są stałymi materiałowymi we wzorach (2.5).

Moduł zespolony \bar{E} określa się z pomiaru zespolonej impedancji \bar{Z} na podstawie wzoru

$$\bar{E} = \omega \bar{Z} dA,$$

gdzie A jest polem powierzchni przekroju próbki. Pomiar \bar{Z} umożliwia układ, którego opis podaje się w pracy [12], przy czym próby doświadczalne należy prowadzić poniżej granicy częstości wymuszenia

$$\omega_g = \frac{\pi^2}{2} \frac{\nu}{d_1^2},$$

aby zapewnić laminarny ruch cieczy [3], oraz dla częstości, przy której można pominąć wpływ efektów dynamicznych. W powyższym wzorze ν jest współczynnikiem lepkości kinematycznej oraz d_1 oznacza charakterystyczny wymiar porów.

Znajomość modułu \bar{E} oraz parametrów μ , λ , K , ω , μ^f pozwala określić stałe α i M . W pracy [12] zamieszczono wartości α i M wyznaczone tą metodą dla poliuretanowej pianki, filcu i piasku nasyconego wodą, powietrzem oraz ciekłymi silikonami. Wartości stałych dla częściej spotykanych materiałów podano w tabelicy 2.

4. RÓWNANIE RUCHU I ZWIĄZKI KONSTITUTYWNE SKŁADNIKÓW KINEMATYCZNYCH

Równania ruchu dla izotropowego ośrodka porowatego wypełnionego cieczą, odmienne od sformułowanych przez Biota, zaproponował DERSKI [13]. Zakładając, że faza ciekła dzieli się na ciecz swobodną z własnym polem prędkości \vec{v}^2 oraz ciecz uwieczoną w szkieletcie i poruszającą się z jego prędkością \vec{v}^1 , energię kinetyczną ośrodka postulował w postaci kanonicznej dla tzw. składników kinematycznych, to jest

$$E = \frac{1}{2} (\hat{\varrho} \vec{v}_i^1{}^2 + \hat{\varrho} \vec{v}_i^2{}^2),$$

gdzie $\hat{\varrho}$ oznacza gęstość szkieletu i cieczy uwieczonej, a $\hat{\varrho}$ gęstość cieczy swobodnej. Na tej podstawie otrzymał on równania ruchu, przy pominięciu sił masowych i zaniedbaniu wymiany masy pomiędzy składnikami, w następu-

jącej postaci [13 i 14]

$$(4.1) \quad \begin{aligned} \overset{1}{\sigma}_{ij,j} &= \overset{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \overset{1}{v}_i + \hat{b}_1 (\overset{2}{v}_i - \overset{1}{v}_i), \\ \overset{2}{\sigma}_{,i} &= \overset{2}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \overset{2}{v}_i - \hat{b}_1 (\overset{2}{v}_i - \overset{1}{v}_i). \end{aligned}$$

Strukturalne uzasadnienie kinematycznego traktowania ośrodka porowatego nasyconego cieczą, dla przypadku gdy porowaty szkielet charakteryzuje się porowatością objętościową i różną od niej liczbowo porowatością powierzchniową, podano w pracach [15, 16 i 20]. Ponadto sformułowano równania ruchu dla składników kinematycznych uwzględniając odpowiednie tensory naprężenia dla takich składników $\overset{1}{\sigma}$ i $\overset{2}{\sigma}$ oraz efekt wymiany masy m . Mają one postać

$$(4.2) \quad \begin{aligned} \overset{1}{\sigma}_{ij,j} + \overset{1}{\rho} b_i + \hat{b}_1 (\overset{2}{v}_i - \overset{1}{v}_i) &= \overset{1}{\rho} \frac{D}{Dt} \overset{1}{v}_i + \frac{1}{2} m_i, \\ \overset{2}{\sigma}_{,i} + \overset{2}{\rho} b_i - \hat{b}_1 (\overset{2}{v}_i - \overset{1}{v}_i) &= \overset{2}{\rho} \frac{D}{Dt} \overset{2}{v}_i + \frac{1}{2} m_i. \end{aligned}$$

Związki pomiędzy naprężeniami $\overset{1}{\sigma}$ i $\overset{2}{\sigma}$ składników kinematycznych i naprężeniami składników fizycznych σ^s i σ^f są następujące [15]:

$$(4.3) \quad \begin{aligned} \overset{1}{\sigma}_{ij} &= \sigma_{ij}^s + \left(1 - \frac{\hat{\lambda}}{f_v}\right) \sigma^f \delta_{ij}, \\ \overset{2}{\sigma} &= \frac{\hat{\lambda}}{f_v} \sigma^f. \end{aligned}$$

Prędkość względna cieczy spełnia równania

$$(4.4) \quad \mathbf{v}^f - \mathbf{v}^s = \frac{\hat{\lambda}}{f_v} (\overset{2}{\mathbf{v}} - \overset{1}{\mathbf{v}}), \quad \overset{1}{\mathbf{v}} \equiv \mathbf{v}^s,$$

gdzie $\hat{\lambda}$ jest porowatością powierzchniową efektywną.

Uwzględnienie równań (2.1) i (4.4) w (4.3) pozwala napisać związki fizyczne dla składników kinematycznych:

$$(4.5) \quad \begin{aligned} \overset{1}{\sigma}_{ij} &= 2N \overset{1}{\varepsilon}_{ij} + (A' \overset{1}{\varepsilon} + Q' \overset{2}{\Theta}) \delta_{ij}, \\ \overset{2}{\sigma} &= Q' \overset{1}{\varepsilon} + R' \overset{2}{\Theta}, \end{aligned}$$

gdzie $\overset{1}{\varepsilon} \equiv \varepsilon_{ij}$ oraz $\overset{2}{\Theta} = \overset{2}{\Theta}_{ii} = \overset{2}{U}_{i,i}$ jest dylatacją cieczy swobodnej, która dla

małych odkształceń związana jest z prędkością $\overset{2}{v}$ w następujący sposób:

$$\frac{\partial}{\partial t} \overset{2}{\Theta} = \overset{2}{v}_{i,i}$$

Stałe A' , Q' i R' są pewnymi kombinacjami wielkości A , Q , R oraz ilorazu $\hat{\lambda}/f_v$ i mają postać

$$(4.6) \quad A' = \left[A + 2 \left(1 - \frac{\hat{\lambda}}{f_v} \right) Q + \left(1 - \frac{\hat{\lambda}}{f_v} \right)^2 R \right],$$

$$Q' = \left[Q + \left(1 - \frac{\hat{\lambda}}{f_v} \right) R \right] \frac{\hat{\lambda}}{f_v}, \quad R' = \frac{\hat{\lambda}^2}{f_v^2} R.$$

Równania (4.5) w połączeniu z (2.16) prowadzą do przemieszczeniowych równań ruchu składników kinematycznych, które przy zaniedbaniu sił masowych oraz efektu wymiany masy mają (w przypadku liniowym) postać

$$(4.7) \quad NV^2 \overset{1}{u}_i + \{N + A'\} \overset{1}{\varepsilon}_{,i} + Q' \overset{2}{\Theta}_{,i} = \overset{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \overset{2}{v}_i + \hat{b}_1 (\overset{2}{v}_i - \overset{1}{v}_i),$$

$$Q' \overset{1}{\varepsilon}_{,i} + R' \overset{2}{\Theta}_{,i} = \overset{2}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} \overset{2}{v}_i - \hat{b}_1 (\overset{2}{v}_i - \overset{1}{v}_i),$$

gdzie $\overset{1}{u}$ i $\overset{2}{U}$ są wektorami przemieszczeń odpowiednich składników kinematycznych.

Równania (4.7) identyfikują się z równaniami (2.10) w sytuacji zaniku ruchu względnego składników, czyli gdy $\frac{\partial}{\partial t} \overset{2}{\Theta} = \frac{\partial}{\partial t} \Theta = \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon$ oraz gdy $\hat{\lambda} = f_v$.

5. OKREŚLENIE STAŁYCH MATERIAŁOWYCH SKŁADNIKÓW KINEMATYCZNYCH

Odmienne od fizycznego, kinematyczne podejście do opisu ośrodka porowatego wiąże się z potrzebą określenia stałych materiałowych występujących we wzorach (4.5). Możliwe są dwa sposoby postępowania:

1. W przypadku ośrodka porowatego o znanych stałych A , Q , R i f_v wielkości A' , Q' i R' wyliczamy na podstawie wzorów (4.6) wykonując dodatkowo pomiar porowatości powierzchniowej $\hat{\lambda}$.

2. Dla ośrodka o nieznannej wcześniej charakterystyce materiałowej, stałe A' , Q' i R' określać można opierając się na statycznych i quasi-statycznych metodach pomiarów omówionych dla składników fizycznych. Należy jednak zwrócić uwagę na inny sposób realizacji warunków brzegowych i niektórych mierzonych wielkości, co omówimy poniżej przy założeniu, że struktura porów jest znana i scharakteryzowana wielkościami $\hat{\lambda}$ i f_v .

a. Próby statyczne

Warunki prób ściśliwości Biota-Willisa (p. 3.1) i występujące w nich wielkości kontrolowane nie ulegają zmianie. Przedstawiając definicje współczynników B-W w postaci

$$\kappa = -\frac{1}{p'} \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon}, \quad \delta = -\frac{1}{p'} \frac{\dot{\sigma}}{\sigma}, \quad \gamma = \frac{\hat{\lambda} \left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{\dot{\sigma}}{\sigma} \right)}{p'},$$

a następnie wykorzystując wzory (4.5) i (4.3) otrzymamy stałe materiałowe składników kinematycznych:

$$(5.1) \quad A' = \frac{\hat{\lambda}^2 + \frac{\gamma}{\kappa} + (1-2\hat{\lambda}) \left(1 - \frac{\delta}{\kappa} \right)}{\gamma + \delta - \frac{\delta^2}{\kappa}},$$

$$Q' = \frac{\hat{\lambda} \left(1 - \frac{\delta}{\kappa} - \hat{\lambda} \right)}{\gamma + \delta - \frac{\delta^2}{\kappa}}, \quad R' = \frac{\hat{\lambda}^2}{\gamma + \delta - \frac{\delta^2}{\kappa}}.$$

b. Określanie stałych na podstawie rozwiązań zagadnień quasi-statycznych

Równania przemieszczeniowe w przypadku quasi-statycznym mają postać

$$(5.2) \quad NV^2 \dot{u}_i + (A' + N) \dot{\varepsilon}_{,i} + Q' \dot{\sigma}_{,i} = \hat{b}_1 (\dot{v}_i - \dot{v}_i),$$

$$(Q' \dot{\varepsilon} + R' \dot{\sigma})_{,i} = -\hat{b}_1 (\dot{v}_i - \dot{v}_i).$$

Przy metodzie wykorzystującej jednowymiarowe osiadanie próbki w edometrze (p. 3.2.1) warunki brzegowe (3.9) mają postać

$$(5.3) \quad \dot{\sigma}_{11}(h, t) + \dot{\sigma}(h, t) = -P\eta(t), \quad \dot{\sigma}(h, t) = 0, \quad \dot{u}(0, t) = 0.$$

Powtarzając następnie procedurę omówioną w p. 3.2.1, przy zachowaniu założenia, że $Q/R \approx 1/f_v$, można określić stałe materiałowe składników kinematycznych:

$$(5.4) \quad H' = -\frac{\pi^2 B_2 E_e \hat{\lambda}}{(\pi^2 B_2 + 8)(1 + f_v)}, \quad E_e = E'_e = \frac{1}{B_1},$$

$$R' = \frac{\hat{\lambda} H'}{1 + f_v}, \quad K' = \frac{4h^2 (R' E_e + H'^2)}{\pi^2 R'^2 E_e B_3}.$$

Można również wykorzystać sposób oparty na jednowymiarowym harmonicznie zmiennym obciążeniu próbki (p. 3.2.2). Warunki brzegowe (3.15)

przyjmą postać

$$(5.5) \quad \begin{aligned} \overset{2}{\sigma}(x=h, t) &= 0, & \overset{1}{u}(x=0, t) &= \overset{2}{U}(x=0, t), \\ \overset{1}{u}(x=h, t) &= 0, & \overset{2}{\sigma}(x=0, t) + \overset{1}{\sigma}_{11}(x=0, t) &= \bar{P}. \end{aligned}$$

Wielkościami mierzonymi będą

$$\overset{1}{v}(x=0), \quad \overset{2}{v}(x=h), \quad \overset{2}{\sigma}(x=0), \quad \bar{P}.$$

Dla wyznaczenia stałych wygodnie jest zastosować procedurę wynikającą z analogii elektromechanicznej omówionej w p. 3.2.2.

DODATEK

1. Relacje pomiędzy stałymi materiałowymi A , Q , R i M , α

$$A = \lambda + M [f_v^2 + \alpha(\alpha - 2f_v)],$$

$$Q = f_v M (\alpha - f_v),$$

$$R = f_v^2 M.$$

2. Związki pomiędzy parametrami definiującymi przepuszczalność ośrodka

Z uwagi na różne definicje przepuszczalności stosowane w cytowanych pracach poniżej podaje się relacje pomiędzy współczynnikami przepuszczalności, przyjmując za punkt odniesienia przepuszczalność właściwą k występującą w prawie Darcy

$$\mathbf{q} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } p,$$

\mathbf{q} — prędkość filtracyjna cieczy, μ — lepkość dynamiczna, p — ciśnienie.

a) W pracach БИОТА [1, 2] współczynnik przepuszczalności k' jest

$$k' = \frac{k}{\mu}.$$

b) STRZELECKI [9] używa współczynnika przepuszczalności K

$$K = \frac{k_1}{f_v^2},$$

i współczynnika filtracji k_1

$$k_1 = \frac{k}{\mu}.$$

c) W pracach UKLEJEWSKIEGO [10, 11] używa się współczynnika przepuszczalności C

$$C = \frac{k}{\mu f_v^2} = K.$$

d) W pozostałych pracach, na które powoływano się w niniejszym opracowaniu, używa się współczynnika oporności właściwej (rezystywności) b lub b_1 , gdzie

$$b = \frac{\mu f_v^2}{k} = \frac{1}{K}, \quad b_1 = \frac{\mu \lambda^2}{k}.$$

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. M. A. BIOT, *General theory of three-dimensional consolidation*, J. Appl. Phys., **12**, 155–164, 1941.
2. M. A. BIOT, *Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid*, J. Appl. Phys., **26**, 2, 182–185, 1955.
3. M. A. BIOT, *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, I. Low-frequency range*, J. Acoust. Soc. Am., **28**, 2, 168–178, 1956.
4. M. A. BIOT, D. G. WILLIS, *The elastic coefficient of the theory of consolidation*, J. Appl. Mech., **24**, 594–601, 1957.
5. I. FATT, *The Biot-Willis elastic coefficients for a sandstone*, J Appl. Mech., **26**, 296–297, 1959.
6. C. H. YEW, P. N. JOGI, *The determination of Biots parameters for sandstones, Part 1. Static tests*, Experimental Mechanics, 167–172, May 1978.
7. J. DOMSKI, *Problemy konsolidacji gruntów w świetle pewnych eksperymentów doświadczalnych i numerycznych*, Zesz. Nauk. Politechniki Krakowskiej, **3**, 1980.
8. R. DZIĘCIELAK, *On the determination of the constens of a consolidating medium*, Acta Techn. Acad. Sci. Hung., **73**, 433–439, 1972.
9. T. STRZELECKI, *Elektrokinetyczna konsolidacja gruntu*, Prace Nauk. Inst. Geotechniki Politechniki Wrocławskiej, **37**, 1982.
10. R. UKLEJEWSKI, *Zastosowanie analogii elektromechanicznych w teorii konsolidacji*, Prace IPPT, **61**, 1979.
11. R. UKLEJEWSKI, *On the determination of the Biot-Willis elastic coefficients for consolidation theory*, Studia Geot. et Mech., **4**, 3–4, 1982.
12. Y. K. KIM, H. B. KINGSBURY, *Dynamic characterization of poroelastic materials*, Experimental Mechanics, **19**, 7, 1979.
13. W. DERSKI, *Equations of motion for a fluid-saturated porous solids*, Bull. Acad. Pol. Sci., Série Sci. Tech., **26**, 1, 11–16, 1978.
14. W. DERSKI, S. KOWALSKI, *On the motion and mass continuity equations in a porous fluid-saturated medium*, Studia Geotech. et Mech., **2**, 3–12, 1980.
15. J. KUBIK, *Mechanika silnie odkształcalnych ośrodków o anizotropowej przepuszczalności*, Prace IPPT, **29**, 1981.
16. J. KUBIK, *A dynamic theory of fluid-porous solid composition, I. Motion equations*, Arch. Mech., w druku.
17. C. H. YEW, P. N. JOGI, *Study of wave motions in fluid-saturated porous rocks*, J. Acoust. Soc. Am., **60**, I, 1976.

18. M. KACZMAREK, J. KUBIK, *O metodach określania stałych materiałowych dla ośrodków porowatych wypełnionych cieczą*, Prace IPPT, 35, 1984.
19. A. M. WIJESINGHE, H. B. KINGSBURY, *On the dynamic behaviour of poroelastic materials*, J. Acoust. Soc. Am., 65, 1, 1979.
20. S. J. KOWALSKI, *Współrzędne normalne i warunki brzegowe w teorii mieszanin*, Prace IPPT, 5, 1980.
21. M. HOBLER, *Badania fizykomechanicznych własności skal*, PWN, 1977.
22. *Mechanika techniczna. Mechanika skal i gruntów*, t. VII, PWN, 1982.

РЕЗЮМЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ЗАПОЛНЕННОЙ ЖИДКОСТЬЮ

В работе проведено обзрение статических и квазистатических методов определения материальных постоянных для пористых сред, насыщенных жидкостью, описанных теорией Био. Обсужден способ использования этих методов для определения постоянных, когда пористая среда трактуется как сложение двух кинематических компонентов: 1 — заключенная жидкость и пористый скелет, 2 — свободная жидкость. Работа содержит составление числовых значений постоянных для наиболее часто применяемых пористых материалов.

SUMMARY

MATERIAL CONSTANTS DETERMINATION OF PHYSICAL AND KINEMATIC COMPONENTS OF FLUID-SATURATED POROUS SOLID

Static and quasi-static methods of determination of elastic constants for fluid-saturated porous solid that of Biot type, are reviewed. Application of these methods to a porous medium considered as a composition of two kinematic components: 1) imprisoned fluid and porous skeleton, 2) free fluid, is discussed. Numerical results of elastic constants of most frequently considered technical porous materials are in two tables.

POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI

Praca została złożona w Redakcji dnia 28 lutego 1985 r.