

Różne postaci równania ciśnienia efektywnego uzyskane podczas badań laboratoryjnych piaskowca „Tumlin”

ANDRZEJ NOWAKOWSKI

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

Artykuł zawiera analizę wyników laboratoryjnych testów klasycznego trójosiowego ściskania próbek piaskowca „Tumlin”. Podczas testów przestrzeń porowa badanych próbek skał wypełniona była znajdującym się pod ciśnieniem gazem, przy czym stosowano gaz uznawany za fizykochemicznie obojętny wobec badanej skały (azot) oraz gaz sorbujący (dwutlenek węgla). Przedmiotem analizy była zależność postaci równania ciśnienia efektywnego od stanu naprężenia. Poszukiwano postaci równania ciśnienia efektywnego w zakresie naprężeń sprężystych (wg teorii Biot), na granicy liniowości odkształceń podłużnych oraz na granicy wytrzymałości. Wyniki analiz pozostają w sprzeczności z wynikami uzyskiwanymi w latach 2003-2005. Praca zawiera opis zaistniałych sprzeczności oraz wskazuje możliwe przyczyny ich zaistnienia.

Słowa kluczowe: ciśnienie efektywne, równanie ciśnienia efektywnego, ciśnienie porowe, trójosiowe ściskanie

1. Wstęp

Dotychczasowe prace prowadzone w Pracowni Odkształceń Skał nad badaniem wpływu płynów porowych na właściwości mechaniczne próbek skał znajdujących się w klasycznym, trójosiowym stanie naprężenia pozwoliły na przetestowanie i ocenę skuteczności stosowania pojęcia ciśnienia efektywnego do opisu zjawisk zachodzących w skałe w takich warunkach. Badania prowadzone w latach 2003-2005 pozwoliły przede wszystkim uporządkować podstawowe definicje. Idąc za sugestią Robina (1973) wprowadzono do opisu badanych procesów jednoznacznie zdefiniowane pojęcia „równanie ciśnienia efektywnego” i „wartość ciśnienia efektywnego” (por. Nowakowski, 2005), zastępując nimi stosowany dotychczas termin „ciśnienie efektywne”. Zweryfikowano również możliwość stosowania jako równania ciśnienia efektywnego klasycznego związku Terzagiego (por. von Terzaghi, 1923) w postaci:

$$\sigma_3' = \sigma_3 - q \quad (1)$$

w którym:

- σ_3' – ciśnienie efektywne,
- σ_3 – ciśnienie okólne,
- q – ciśnienie porowe.

Eksperymentalnie potwierdzono, że związek (1) może być uznany dla skały za równanie ciśnienia efektywnego tylko w takim przypadku, gdy skała i płyn porowy spełniają następujące warunki sformułowane przez Handina i in. (1963):

- 1) płyn porowy jest obojętny wobec składników skały (ciśnienie porowe działa wyłącznie mechanicznie),
- 2) przepuszczalność skały pozwala na takie przenikanie płynu porowego, że ciśnienie porowe pozostaje stałe i równomierne podczas deformacji skały,
- 3) skała jest agregatem podobnym do piasku z porami, których konfiguracja zapewnia pełne przejmowanie ciśnienia przez fazę stałą.

Badania laboratoryjne pokazały, że szczególnym przypadkiem skały spełniającej te warunki jest skała, w której naprężenia osiągnęły różnicową granicę wytrzymałości.

Przebadano również, jak postać równania ciśnienia efektywnego zależy od rodzaju porowego. W szczególności stosując niesorbujące (nafta, azot) i sorbujące (H_2O , CO_2) płyny porowe wykazano, że sformułowane na podstawie związków teorii konsolidacji Biota (Biot, 1941) równanie ciśnienia efektywnego postaci:

$$'\sigma_3 = \sigma_3 - \alpha q \quad \wedge \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2)$$

może być stosowane jako równanie ciśnienia efektywnego dla wypełnionej płynem porowym skały, która osiągnęła różnicową granicę wytrzymałości pod warunkiem wprowadzenia następującej modyfikacji (patrz: Gustkiewicz i Nowakowski, 2005; Nowakowski, 2005):

$$'\sigma_3 = \sigma_3 - \alpha q \quad \wedge \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{\sigma_3}{q} \quad (3)$$

Istotą modyfikacji wprowadzonej wzorem (3) jest dopuszczenie możliwości, że znajdujący się w tym wzorze współczynnik α przyjmuje wartości większe niż 1. Wykazano również, że jeżeli płyn porowy jest gazem sorbującym (np. CO_2) to dla skały znajdującej się na granicy wytrzymałości równanie ciśnienia efektywnego może mieć charakter nieliniowy ze względu na ciśnienie porowe q (Nowakowski, 2005).

2. Przedmiot badań

Zarówno studia literaturowe (np. Nur i Byerlee, 1971; Brace, 1972; Robin 1973) jak i przeprowadzone dotychczas badania laboratoryjne prowadzą do wniosku, że postać równania ciśnienia efektywnego zależy m. in. od następujących czynników:

- i) właściwości przestrzeni porowej skały; przez co rozumieć należy nie tylko udział porów w objętości skały, ale także ich kształt oraz to, czy są one izolowane czy też tworzą one sieć połączeń,
- ii) analizowanej właściwości skały; co oznacza, że dla różnych właściwości skały analizowanych jako funkcja ciśnień okólnego i porowego równania ciśnienia efektywnego mogą być różne,
- iii) stanu naprężenia w skale; czyli, że równanie ciśnienia efektywnego będzie najprawdopodobniej zupełnie inne dla skały, w której stan naprężenia i deformacji powiązany jest zmodyfikowanymi przez Biota (patrz: Biot, 1941) równaniami Hooke'a, niż dla skały, która osiągnęła granicę wytrzymałości.

Dotychczas prowadzone w Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN badania koncentrowały się na wyznaczeniu równania ciśnienia efektywnego dla skały znajdującej się na granicy wytrzymałości i poszukiwaniu jego postaci w zależności od rodzaju płynu porowego. Niniejsza praca jest próbą prześledzenia, jak zmienia się równanie ciśnienia efektywnego dla jednej skały w zależności od panującego w niej stanu naprężenia i użytego gazu porowego. Przeanalizowano w niej postacie równania ciśnienia efektywnego oraz jego wartości dla naprężeń odpowiadających różnicowej granicy liniowości (${}^L\sigma_1 - \sigma_3$) oraz różnicowej granicy wytrzymałości (${}^R\sigma_1 - \sigma_3$). Jako płynów porowych użyto dwóch gazów: fizykochemicznie obojętnego azotu oraz silnie sorbującego dwutlenku węgla.

Przedmiotem analiz były wyniki badań uzyskanych w latach 2003-2005 dla piaskowca z kamieniołomu w Tumlinie w Górach Świętokrzyskich (dalej zwanego piaskowcem „Tumlin”). Szczegółowy opis petrograficzny tej skały znaleźć można odpowiednio m.in. w pracach Nowakowskiego i in. (2003) i Gustkiewicza i in. (2004). Analizy prowadzono posługując się podanymi dla piaskowca „Tumlin” przez Nowakowskiego (2005) wartościami stałych materiałowych: porowatości całkowitej (n_T), porowatości spękań (η_T), ściśliwości (K_T) i ściśliwości szkieletu (K_{ST}), które zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wartości stałych materiałowych uzyskane na podstawie badań porozymetrycznych oraz eksperymentów ściśliwości; piaskowiec „Tumlin” (Nowakowski, 2005)

	n_T [%]	η_T [%]	K_T [GPa]	K_{ST} [GPa]
Piaskowiec „Tumlin”	7,85	0,75	17,7	40,0

Należy jeszcze dodać, że wartość modułu ścisłości szkieletu piaskowca „Tumlin” uzyskano na podstawie drenowanego eksperymentu ścisłości, w którym płynem wypełniającym pory skały była nafta, a zatem ciecz fizykochemicznie obojętna wobec skały.

3. Równanie ciśnienia efektywnego a stan naprężenia

Jak wspomniano wyżej (rozdz. 2, pkt. *iii*) stan naprężenia w skale jest jednym z czynników mających istotny wpływ na postać równania ciśnienia efektywnego. Poniżej zaprezentowane zostaną rozważania dotyczące postaci tego równania dla skały znajdującej się w jednym z dwóch, zdecydowanie różnych, stanów naprężenia. Pierwszy z nich odpowiada sytuacji, w której zależność między naprężeniem a odkształceniem skały ma charakter liniowosprężysty, czyli może zostać opisana układem równań teorii konsolidacji Biota (Biot, 1941), drugi zaś, to stan naprężenia i deformacji, który osiąga skała na po osiągnięciu swojej różnicowej granicy wytrzymałości (${}^R\sigma_1 - \sigma_3$).

3.1. Ciśnienie efektywne w zakresie stosowalności równań Biota

Podstawą wyznaczenia równania ciśnienia efektywnego dla ciała, którego stan naprężenia i deformacji jest układ równań teorii konsolidacji Biota (Biota, 1941). Układ ten jest w istocie układem równań Hooke'a uzupełnionych o składniki uwzględniające sprężystą, objętościową deformację gruntu, do którego dodano równanie konstytutywne dla porów, uwzględniające obecność ciśnienia porowego (por. np. Gustkiewicz, 1989). Korzystając z układu równań Biota Nur i Byerlee (1971) zaproponowali w swojej pracy, aby równanie ciśnienia efektywnego miało postać (2), przy czym – stosując oznaczenia wprowadzone w rozdz. 2 – współczynnik α wyrażałby się następującymi związkami:

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \quad (4)$$

gdy równanie ciśnienia efektywnego formułowane jest dla zmiany objętości badanego ośrodka jako całości (tj. faza stała + przestrzeń porowa), lub też

$$\alpha = 1 - \frac{nK}{K_s - K} \quad (5)$$

gdy równanie ciśnienia efektywnego formułowane jest wyłącznie dla przestrzeni porowej ośrodka. Szczegółowe rozważania na temat zjawisk zachodzących w liniowo sprężystym ośrodku porowatym, którego przestrzeń porowa wypełniona jest niesorbującym płynem porowym znaleźć można w pracy Gustkiewicza (1989).

Podstawiając do związków (4) i (5) wartości odpowiednich stałych materiałowych zamieszczone w tab. 1 a następnie wstawiając otrzymane wartości do równania (2) otrzymujemy odpowiednio dwa następujące równania ciśnienia efektywnego:

$${}'\sigma_3 = \sigma_3 - 0,575 q \quad (6)$$

dla zmiany objętości badanego ośrodka jako całości, oraz

$${}'\sigma_3 = \sigma_3 - 0,940 q \quad (7)$$

dla przestrzeni porowej ośrodka.

Zauważmy, że – zgodnie z rozważaniami Nura i Byerlee'go – związki (6) i (7) są równaniami ciśnienia efektywnego dla rozważanego piaskowca „Tumlin”, którego przestrzeń porowa wypełniona jest płynem fizykochemicznie obojętnym (w tym przypadku był to azot), a ich stosowalność dotyczy zakresu naprężeń, w którym prawdziwe są równania teorii konsolidacji Biota czyli, w praktyce, równania Hooke'a. Jest to sytuacja jakościowo różna od opisywanej np. przez Gustkiewicza i Nowakowskiego (2005) czy też Nowakowskiego (2005), którzy poszukiwali postaci równania ciśnienia efektywnego oraz wartości ciśnienia efektywnego dla konkretnej, jednoznacznie określonej wartości naprężenia różnicowego, a nie dla pewnego zakresu naprężeń. Procedury poszukiwania równania i wartości ciśnienia efektywnego opisane przez wspomnianych wyżej autorów nie znajdują tutaj zastosowania.

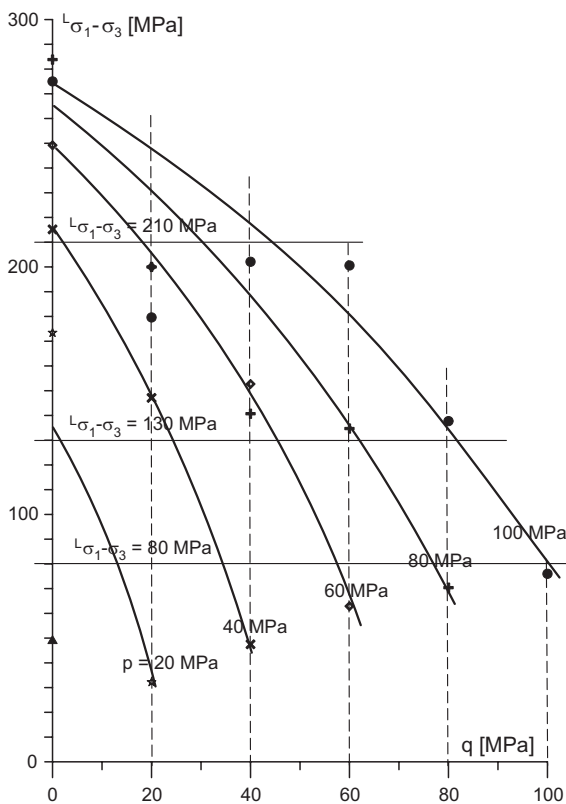
Związki (6) i (7) mogą zostać uznane za równania ciśnienia efektywnego w przypadku, gdy płynem porowym jest gaz obojętny – w tym przypadku azot. Z uwagi na niesprawność urządzenia GTA-10 nie było możliwości wykonania testów ściśliwości dla próbki wypełnionej dwutlenkiem węgla stąd brak w powyższych rozważaniach odpowiednich związków dla przypadku, gdy płynem porowym jest CO_2 .

3.2. Ciśnienie efektywne na różnicowej granicy liniowości odkształceń podłużnych

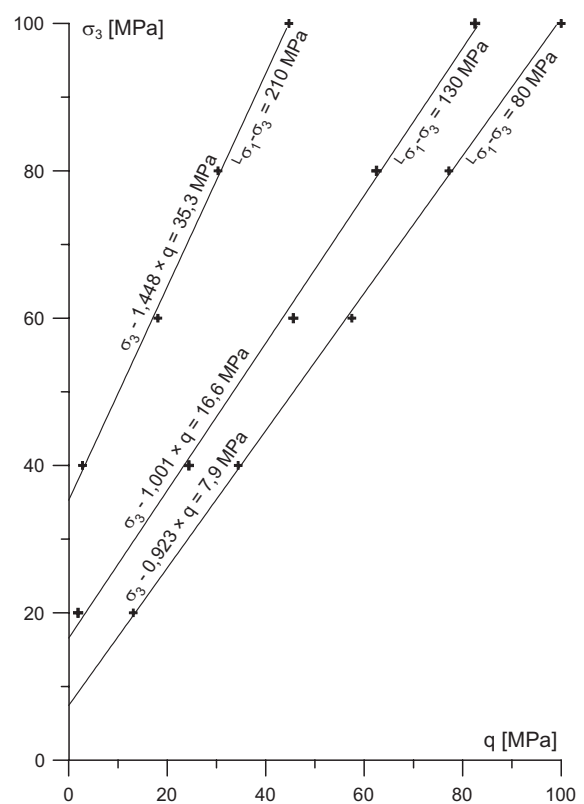
Przez różnicową granicę liniowości odkształceń podłużnych ${}^L\sigma_1 - \sigma_3$ (dalej zwaną różnicową granicą liniowości) rozumieć należy maksymalne naprężenie różnicowe $\sigma_1 - \sigma_3$, dla którego – podczas eksperymentu klasycznego, trójosiowego ściskania – zależność między tym naprężeniem a odkształceniem podłużnym ε_1 ma charakter liniowy. W szczególności dla materiału Hooke'a granica liniowości i granica sprężystości pokrywają się. W przypadkach analizowanych w niniejszej pracy zależność taka najprawdopodobniej nie występuje jednakże, z uwagi na brak możliwości wykonania pętli obciążenie – odciążenie – ponowne obciążenie, wykazanie tego na drodze eksperymentalnej nie było możliwe.

Zależność między różnicową granicą liniowości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze, dla eksperymentów, w których płynem porowym był azot pokazano na rys. 1. Równania i wartości ciśnień efektywnych wyznaczono dla wartości ${}^L\sigma_1 - \sigma_3$ równych 80 MPa, 130 MPa i 210 MPa zgodnie z procedurą opisaną przez Nowakowskiego (2005). Jako wynik otrzymano następujące równania i wartości ciśnienia efektywnego (por. rys. 2):

$$\begin{aligned} {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 80 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 0,923 \times q = 7,9 \text{ MPa} \wedge ' \sigma_3 = 7,9 \text{ MPa}) \\ {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 130 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 1,001 \times q = 16,6 \text{ MPa} \wedge ' \sigma_3 = 16,6 \text{ MPa}) \\ {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 210 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 1,448 \times q = 35,3 \text{ MPa} \wedge ' \sigma_3 = 35,3 \text{ MPa}) \end{aligned} \quad (8)$$



Rys. 1. Zależność między różnicową granicą liniowości (${}^L\sigma_1 - \sigma_3$) a ciśnieniem porowym (q), przy ciśnieniu okólnym (p) jako parametrze; piaskowiec „Tumlin” nasączony azotem



Rys. 2. Równania (8) ciśnienia efektywnego na granicy liniowości; piaskowiec „Tumlin” nasączony azotem

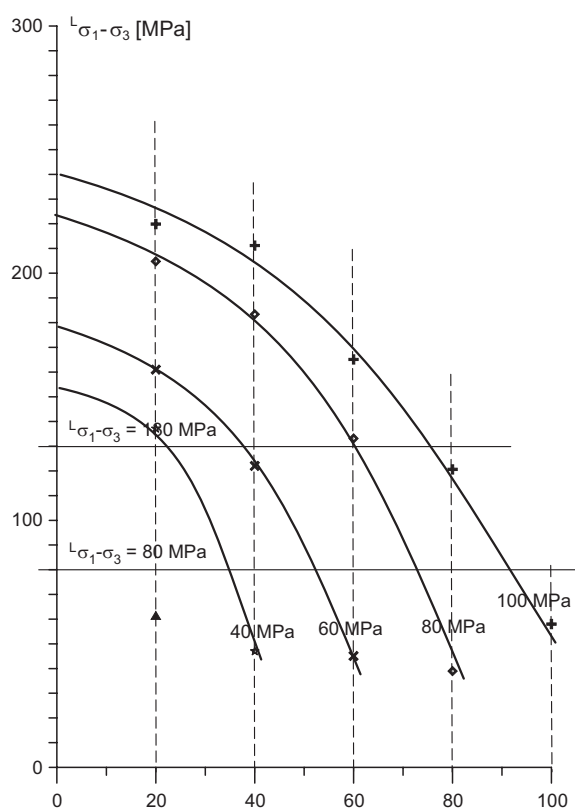
Z kolei zależność między różnicową granicą liniowości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze, dla eksperymentów, w których płynem porowym był dwutlenek węgla pokazano na rys. 3. Równania i wartości ciśnień efektywnych wyznaczano w tym przypadku dla wartości różnicowej granicy liniowości równych 80 MPa i 130 MPa. Otrzymane jako wynik równania i wartości ciśnienia efektywnego były następujące (por. rys. 4):

$$\begin{aligned} {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 80 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 1,038 \times q = 4,8 \text{ MPa} \wedge {}'\sigma_3 = 4,8 \text{ MPa}) \\ {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 130 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 0,984 \times q = 23,1 \text{ MPa} \wedge {}'\sigma_3 = 23,1 \text{ MPa}) \end{aligned} \quad (9)$$

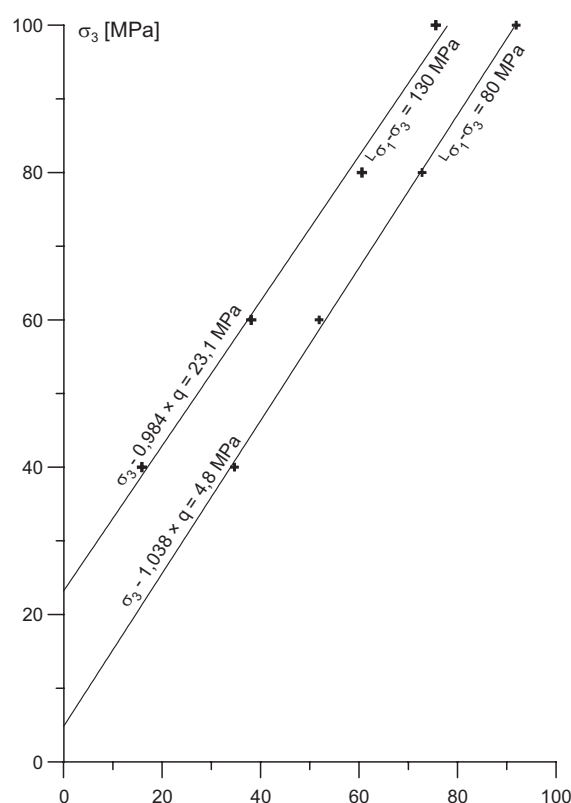
Biorąc pod uwagę dokładność aproksymacji krzywych, dla których $p = \text{const.}$ oraz porównując związki (8) i (9) wydaje się, że niezależnie od rodzaju użytego płynu porowego, równania ciśnienia efektywnego na granicy liniowości wyznaczone dla ${}^L\sigma_1 - \sigma_3$ równych 80 MPa i 130 MPa, mają formę identyczną, odpowiadającą przypadkowi konwencjonalnego ciśnienia efektywnego opisanemu równaniem Terzagiego (1). Na tym tle dość zaskakująco prezentuje się równanie ciśnienia efektywnego uzyskane dla próbki nasączonej azotem i odpowiadające granicy liniowości równej 210 MPa. Jego forma jest wyraźnie bliższa równaniu typu (3).

3.3. Ciśnienie efektywne na różnicowej granicy wytrzymałości

Przez różnicową granicę wytrzymałości ${}^R\sigma_1 - \sigma_3$ rozumieć należy maksymalne naprężenie różnicowe $\sigma_1 - \sigma_3$ uzyskane przez próbkę podczas eksperymentu klasycznego, trójosiowego ściskania. Podstawą wyznaczania równań i wartości ciśnienia efektywnego dla różnych wartości granicy wytrzymałości były wykresy zależności między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym przy ciśnieniu okólnym jako parametrze.



Rys. 3. Zależność między różnicową granicą liniowości (${}^L\sigma_1 - \sigma_3$) a ciśnieniem porowym (q), przy ciśnieniu okólnym (p) jako parametrze; piaskowiec „Tumlin” nasączony dwutlenkiem węgla



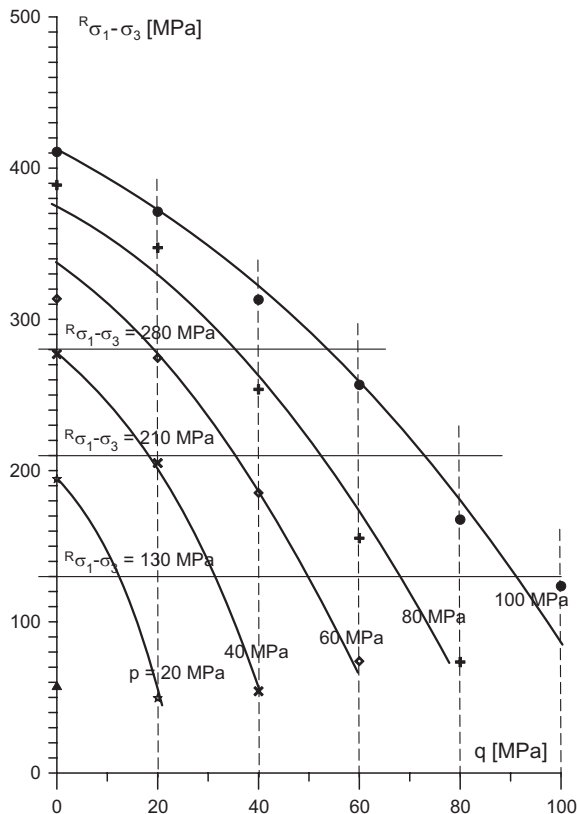
Rys. 4. Równania (9) ciśnienia efektywnego na granicy liniowości; piaskowiec „Tumlin” nasączony dwutlenkiem węgla

Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze, dla eksperymentów, w których płynem porowym był azot pokazano na rys. 5. Równania

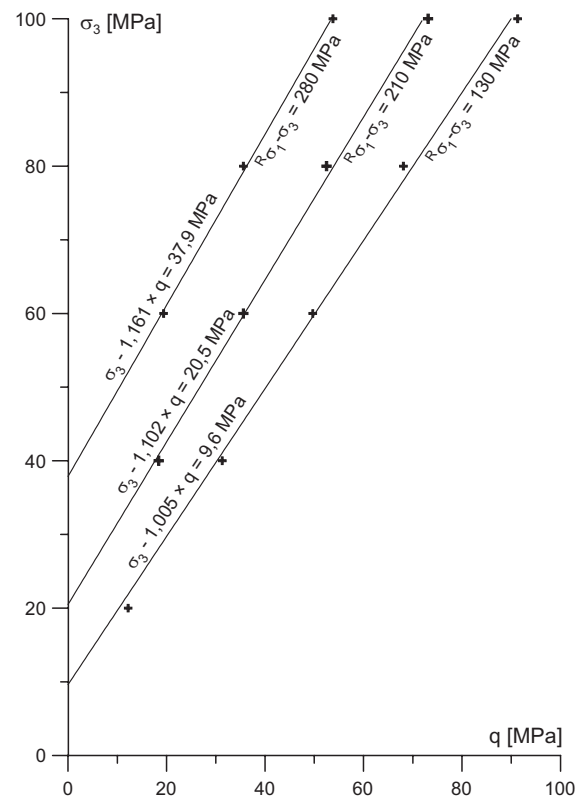
i wartości ciśnień efektywnych wyznaczono dla wartości ${}^R\sigma_1 - \sigma_3$ równych 130 MPa, 210 MPa i 280 MPa. Jako wynik otrzymano następujące równania i wartości ciśnienia efektywnego (por. rys. 6):

$$\begin{aligned} {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 130 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 1,005 \times q = 9,6 \text{ MPa} \wedge {}'\sigma_3 = 9,6 \text{ MPa}) \\ {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 210 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 1,102 \times q = 20,5 \text{ MPa} \wedge {}'\sigma_3 = 20,5 \text{ MPa}) \\ {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 280 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 1,161 \times q = 37,9 \text{ MPa} \wedge {}'\sigma_3 = 37,9 \text{ MPa}) \end{aligned} \quad (10)$$

Równania te są równaniami typu (3), przy czym występujący w nich współczynnik α rośnie wraz ze wzrostem wartości ${}^R\sigma_1 - \sigma_3$ (por. Nowakowski, 2005).



Rys. 5. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości (${}^R\sigma_1 - \sigma_3$) a ciśnieniem porowym (q), przy ciśnieniu okólnym (p) jako parametrze; piaskowiec „Tumlin” nasączony azotem

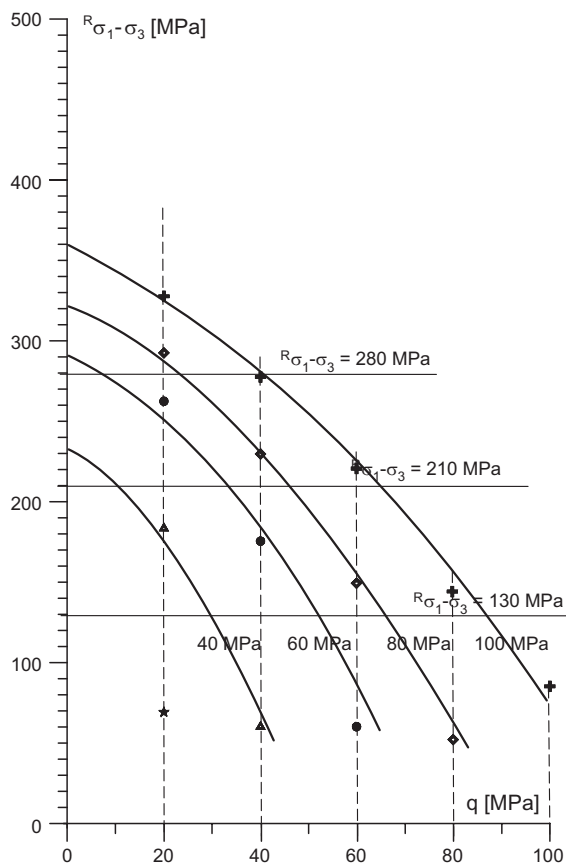


Rys. 6. Równania (10) ciśnienia efektywnego na granicy wytrzymałości; piaskowiec „Tumlin” nasączony azotem

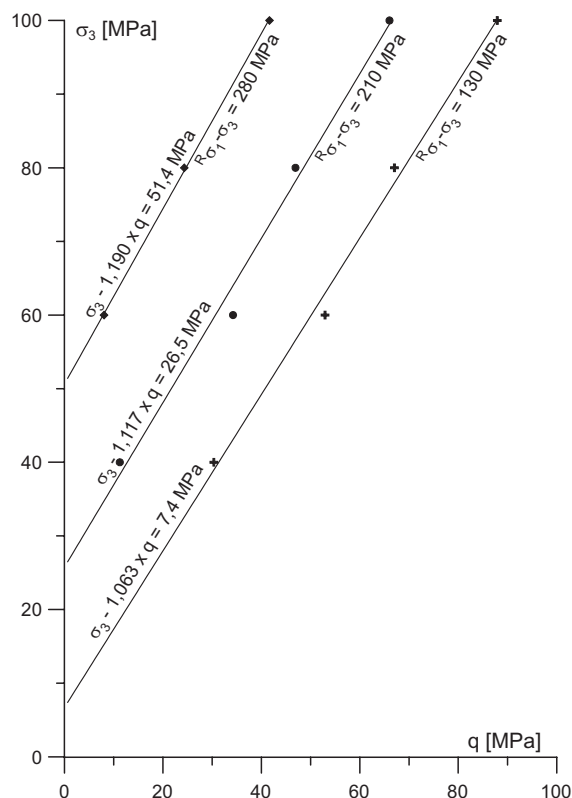
Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze, dla eksperymentów, w których płynem porowym był dwutlenek węgla pokazano na rys. 7. Analogicznie jak w przypadku próbek nasączonych azotem równania i wartości ciśnień efektywnych wyznaczono dla wartości ${}^R\sigma_1 - \sigma_3$ równych 130 MPa, 210 MPa i 280 MPa. W wyniku otrzymano następujące równania i wartości ciśnienia efektywnego (por. rys. 8):

$$\begin{aligned} {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 130 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 1,063 \times q = 7,4 \text{ MPa} \wedge {}'\sigma_3 = 7,4 \text{ MPa}) \\ {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 210 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 1,117 \times q = 26,5 \text{ MPa} \wedge {}'\sigma_3 = 26,5 \text{ MPa}) \\ {}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 280 \text{ MPa} &\Rightarrow (\sigma_3 - 1,190 \times q = 51,4 \text{ MPa} \wedge {}'\sigma_3 = 51,4 \text{ MPa}) \end{aligned} \quad (11)$$

Równania (11), analogicznie do równań (10), są równaniami typu (3) z tym, że wartości współczynników α są odpowiednio nieco większe.



Rys. 7. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości ($R_{\sigma_1-\sigma_3}$) a ciśnieniem porowym (q), przy ciśnieniu okólnym (p) jako parametrze; piaskowiec „Tumlin” nasączony dwutlenkiem węgla



Rys. 8. Równania (11) ciśnienia efektywnego na granicy wytrzymałości; piaskowiec „Tumlin” nasączony dwutlenkiem węgla

4. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszej pracy rozważania omawiają wyniki poszukiwania równania i wartości ciśnienia efektywnego dla naprężeń odpowiadających granicy liniowości odkształceń podłużnych oraz granicy wytrzymałości próbki. Porównano wyniki otrzymane dla tego samego piaskowca w przypadku, gdy płynami porowymi były dwa gazy: azot i dwutlenek węgla.

Wyniki przeprowadzonej w rozdz. 3.2. analizy kształtowania się równania ciśnienia efektywnego na granicy liniowości dla piaskowca „Tumlin” prowadzą do dwóch, następujących spostrzeżeń:

- rodzaj gazu porowego (sorbujący czy niesorbujący) nie ma wpływu na postać równania ciśnienia efektywnego,
- równanie ciśnienia efektywnego na granicy liniowości jest klasycznym równaniem Terzagiego typu (1).

Taki wynik jest dość zaskakujący, biorąc pod uwagę to wszystko, co dotychczas wiadomo na przykład o wpływie rodzaju płynu porowego na postać równania ciśnienia efektywnego dla skały znajdującej się na granicy wytrzymałości (por. Nowakowski, 2005; Gustkiewicz i Nowakowski, 2005; Gustkiewicz i in., 2004).

Należy w tym momencie zwrócić uwagę, że tzw. warunki Handina (patrz: rozdz. 1., pkt 1-3) dość ściśle precyzują okoliczności, w jakich wzór (1) można dla skały uznać za równanie ciśnienia efektywnego. Tymczasem użyty jako płyn porowy dwutlenek węgla w oczywisty sposób nie spełnia warunku 1), a trudno przypuszczać by piaskowiec „Tumlin” – o stosunkowo niewielkiej porowatości (por. tab. 1) – spełniał warunek 3) dla naprężeń bliskich granicy liniowości. Dodatkowo bliska jedności wartość współczynnika α w równaniach (8) i (9) pozostaje w sprzeczności z wyliczoną wg związku (4) wartością tego współczynnika

wynikającą z równań teorii Biota (por. równanie (6)). Z drugiej strony wartość tego współczynnika można zweryfikować wykorzystując podany przez Fabre'a i Gustkiewicza (1998) uogólniony wzór na wartość współczynnika Biota dla piaskowców. Autorzy ci udowodnili eksperymentalnie, że jeżeli n jest porowatością skały, zaś A pewną stałą, która dla piaskowców spełnia warunek:

$$A = 5,5 \pm 1,5 \quad (12)$$

to współczynnik Biota α wyliczyć można korzystając ze wzoru:

$$\alpha = 1 - e^{-A \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2}\right)} \quad (13)$$

Wstawiając we wzorze (13) $A = 7$ i $n = n_T = 0,0785$ otrzymujemy $\alpha = 0,580$ czyli praktycznie tyle, ile wg wzoru (4), co potwierdza poprawność wyznaczenia tego współczynnika wg teorii Biota.

Wszystko, co napisano powyżej wydaje się wskazywać, że wyniki analizy kształtowania się równania ciśnienia efektywnego na granicy liniowości pozostają w sprzeczności zarówno z tym co wynika z teorii ośrodka Biota (różnice w wartościach współczynnika α) jak i z tym co dotychczas wiadomo było na temat związków między ciśnieniem okólnym a porowym zachodzących podczas testów klasycznego trójosiowego ściskania (brak znaczących różnic w postaciach równań ciśnienia efektywnego dla gazów sorbujących i niesorbujących).

Biorąc pod uwagę pionierski charakter przeprowadzonych w rozdz. 3.2. analiz należy stwierdzić, że nie ma na razie możliwości jednoznacznego wytłumaczenia zaistniałych sprzeczności. Obecny stan wiedzy pozwala jedynie domniemywać, że:

- c) przyczyną rozbieżności w wartościach współczynnika α mógłby być fakt, iż w teorii ośrodka Biota równanie ciśnienia efektywnego sformułowane jest dla zmiany objętości badanego materiału podczas gdy w omawianych wynikach eksperymentów analizowano równanie ciśnienia efektywnego na granicy liniowości; byłby to zatem ten sam stan naprężenia ale nie ta sama właściwość materiału,
- d) rozrzut wyników eksperymentów wynikający z niejednorodności badanego materiału mógł uniemożliwić wychwycenie różnic w równaniach ciśnienia efektywnego zagranicy liniowości dla azotu i dwutlenku węgla,
- e) dokładność pomiaru odkształceń podczas eksperymentu była zbyt mała, aby zarejestrować różnice w wartościach różnicowej granicy liniowości dla próbek nasączonych azotem i dwutlenkiem węgla,
- f) dokładność aproksymacji wyników eksperymentów krzywymi $p = \text{const.}$ (rys. 1, 3, 5 i 7) była niewystarczająca; w szczególności to musiało być przyczyną, dla której zapisane w związkach (8) równanie ciśnienia efektywnego dla ${}^L\sigma_1 - \sigma_3 = 210 \text{ MPa}$ miało postać wyraźnie różniącą się od innych równań zapisanych w związkach (8) i (9).

Wyniki przeprowadzonej w rozdz. 3.3. dla piaskowca „Tumlin” analizy kształtowania się równania ciśnienia efektywnego na granicy wytrzymałości wskazują, że równania ciśnienia efektywnego dane są w tym przypadku równaniami typu (3), przy czym współczynnik α jest większy od jedności niezależnie od rodzaju gazu porowego. Podważa to zasadność głoszonego dotychczas poglądu (por. m.in. Gustkiewicz i in., 2004, 2005), że jeżeli płyn porowy jest gazem niesorbującym i skała spełnia warunki Handina, to równanie ciśnienia efektywnego powinno być równaniem Terzagiego typu (1). Wydaje się, że możliwe są dwie odpowiedzi na pytanie o przyczynę zachodzącej sprzeczności:

- g) azotu nie można uznać dla piaskowca „Tumlin” za gaz niesorbujący, lub gaz użyty podczas eksperymentu nie był dostatecznie czysty (np. obecność pary wodnej),
- h) geometria przestrzeni porowej badanego piaskowca powoduje dodatkowe „wzmocnienie” znaczenia ciśnienia porowego dla zachowania badanej skały.

Natomiast porównanie wartości współczynników α w równaniach (10) i (11) potwierdza znany już fakt, że jeżeli gaz porowy jest gazem sorbującym to jego wpływ na różnicową granicę wytrzymałości jest większy niż w przypadku gazu niesorbującego.

Literatura

- Biot M.A., 1941: *General theory of three dimensional consolidation*. J. Appl. Phys. 12: 155-168.
- Brace W.F., 1972: *Pore pressure in geophysics*. In: "Flow and Fracture of Rocks. Geophys. Monogr. Series. Heard H.C., Borg I.Y., Carter N.L., Raleigh C.B. (eds.), AGU, Vol. 16, pp. 265-273, Washington DC.
- Fabre D., Gustkiewicz J., 1998: *Influence of rock porosity on the Biot's coefficient*. In: "Poromechanics – A Tribute to Maurice A. Biot", Proc. of the Biot Conf. on Poromech., Louvain-la-Neuve (Belgium), 14-16 Sept. 1998, Thismus et al. (eds.), Balkema, Rotterdam.
- Gustkiewicz J., 1989: *Objętościowe deformacje skały i jej porów*. Arch. Min. Sci., t. 34, cz. 3, s. 593-609.
- Gustkiewicz J., Nowakowski A., 2005: *Kształtowanie się ciśnienia efektywnego w skałach, na granicy wytrzymałości (w:) „Geotechnika w budownictwie i górnictwie”*, Mat. XXVIII Zimowej Szkoły Mechaniki Górniczej i Geoinżynierii, Szklarska Poręba 13-18 III 2005, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, s. 195-205.
- Gustkiewicz J., Nowakowski A., Nurkowski J., Stanisławski L., Lizak Z., 2004: *Kształtowanie się ciśnienia efektywnego w klasycznym, trójosiowym stanie naprężenia, na podstawie wyników pęknięcia i deformacji wybranych skał*. Prace IMG PAN, t. VI, s. 3-17.
- Gustkiewicz J., Nowakowski A., Lizak Z., 2003: *Zmiany niektórych właściwości mechanicznych piaskowca pod wpływem sorbujących i niesorbujących płynów porowych pod ciśnieniem*. Prace IMG PAN, t. V, s. 367-375.
- Nowakowski A., 2005: *Różne sposoby kształtowania się ciśnienia efektywnego w skale znajdującej się na granicy wytrzymałości*. Prace IMG PAN, t. 7, nr 3-4, s. 189-202.
- Nowakowski A., Młynarczuk M., Ratajczak T., Gustkiewicz J., 2003: *Wpływ warunków termicznych na zmianę niektórych właściwości fizycznych i strukturalnych wybranych skał*, Prace IMG PAN. Rozprawy, Monografie, nr 5, 104 s.
- Nur A., Byerlee J.D., 1971: *An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids*. J. Geophys. Res. 76(26): 6414-6419.
- Robin P.-Y.F., 1973: *Note on effective pressure*. J. Geophys. Res., 78, 2434-2437.
- Terzaghi von, K., 1923: *Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tonnes aus dem Verlauf der Spannungserscheinungen*. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien Math.-Naturwiss. Kl., Abt. 2A, 132, 105.
- Handin J., Hager R.V., Friedman M., Feather J.N., 1963: *Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: pore pressure effects*. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol. 47: 717-755.

Some different forms of the effective pressure law obtained for "Tumlin" sandstone on the base of laboratory tests results

Abstract

Some results of the triaxial individual tests of specimens cut from "Tumlin" sandstone were presented in the paper. During the test a specimen was saturated with pressurized inert (nitrogen) or non-inert (carbon dioxide) gas. Form of the effective pressure law was studied with special consideration to state of stress in a specimen and to kind of porous gas. The form of effective pressure law was determined according to the Biot consolidation theory, at the elasticity limit and at the strength limit. Some obtained results are inconsistent with results obtained in previous researches in the years 2003-2005. In the paper these inconsistencies were described as well as some possible reasons of the inconsistencies were indicated.

Keywords: effective pressure, effective pressure law, pore pressure, triaxial compression

Recenzent: Prof. dr hab. *Wacław Zuberek*, Uniwersytet Śląski