Zależność postaci prawa ciśnienia efektywnego od prędkości obciążania próbki dla piaskowca nasączonego gazem inertnym

Andrzej Nowakowski, Janusz Nurkowski, Zbigniew Lizak

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

Streszczenie

Artykuł zawiera omówienie wyników badań, których celem było określenie wpływu prędkości deformacji na postać prawa ciśnienia efektywnego. Wykonano dwie serie testów konwencjonalnego trójosiowego ściskana próbek piaskowca, których przestrzeń porowa wypełniona była sprężonym inertnym płynem porowym (azotem). Serie różniły się prędkością deformacji próbki, która wynosiła odpowiednio 5 μ m×s⁻¹ i 50 μ m×s⁻¹. Ciśnienia okólne (*p*) i porowe (*p_p*) zmieniane były w zakresie od 0 do 300 MPa.

Badania wykazały, że zmiana prędkości deformacji ma znaczący wpływ na sposób zachowania próbki przedmiotowego piaskowca podczas testu konwencjonalnego trójosiowego ściskania. Wyniki testów dowodzą, że ze wzrostem prędkości deformacji zwiększa się zakres ciśnień okólnych, przy których próbka pęka krucho oraz rośnie zakres umocnienia dylatacyjnego badanego materiału.

Wykazano również, że wzrost prędkości deformacji próbki skutkuje znaczącymi zmianami wartości parametrów prawa ciśnienia efektywnego, przy czym kierunek tych zmian potwierdza istnienie zależności między prędkością deformacji a umocnieniem dylatacyjnym materiału.

Slowa kluczowe: konwencjonalne trójosiowe ściskanie, różnicowa granica wytrzymałości, prawo ciśnienia efektywnego, umocnienie dylatancyjne

1. Wstęp

Sformułowane w ubiegłych latach w Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN *prawo ciśnienia efek-tywnego* okazuje się być – przy całej swojej matematycznej prostocie – zależnością bardzo "rozwojową". Wykonane w roku 2015 studia nad wynikami wcześniejszych badań laboratoryjnych pozwoliły określić wpływ, jaki na zachowanie skały w konwencjonalnym trójosiowym stanie naprężenia wywierają takie zjawiska fizyczne jak sorpcja płynów, efekt Rebindera czy też umocnienie dylatancyjne (patrz: Nowakowski i in., 2015). Przypomnijmy w tym miejscu, że prawo to definiuje – dla próbki skalnej obciążonej ciśnieniem okólnym *p*, której przestrzeń porowa wypełniona jest płynem pod ciśnieniem porowym p_p – pewne zastępcze ciśnienie *p*', zwane ciśnieniem efektywnym, którego oddziaływanie na interesującą nas właściwość badanej skały jest identyczne jak pary ciśnień *p* i p_p . Przyjęty w niniejszej pracy sposób wyznaczania prawa ciśnienia efektywnego na podstawie wyników badań laboratoryjnych został już szczegółowo opisany w pracach Nowakowskiego (2007, 2012). Dlatego też poniżej przypomniano jedynie jego ogólną koncepcję.

2. Prawo ciśnienia efektywnego – definicje

Przedmiotem rozważań będą procesy zachodzące w cylindrycznej próbce skalnej umieszczonej w komorze typu Kármána i obciążonej osiowosymetrycznymi naprężeniami ściskającymi¹ spełniającymi warunek $\sigma_1 \ge \sigma_2 = \sigma_3 = p$. Zgodnie z klasyfikacją zaproponowana prze Kovariego i in. (1983) jest to tzw. test konwencjonalnego trójosiowego ściskania² (ang. *individual test*). Ciśnienie okólne $\sigma_2 = \sigma_3 = p$ zadawane jest

¹ W niniejszej pracy przyjęto umowę, że ściskaniu odpowiada znak "plus" a znak "minus" oznacza rozciąganie.

² Używa się także terminu "test klasycznego trójosiowego ściskania". Autorzy stosują w niniejszej pracy zamiennie terminy "klasyczne trójosiowe ściskanie" i "konwencjonalne trójosiowe ściskanie".



Rys. 1. Test konwencjonalnego trójosiowego ściskania w obecności sprężonego płynu porowego – schemat obciążeń próbki (Nowakowski, 2012)

na pobocznicę próbki cieczą, a naprężenie osiowe σ_1 tłokiem prasy naciskającym na czoło próbki. Próbka oddzielona jest od medium zadającego ciśnienie okólne odkształcalną osłoną. Przestrzeń porowa rozważanej próbki wypełniona jest płynem porowym (cieczą lub gazem) pozostającym pod stałym ciśnieniem o wartości p_p . Schemat obciążeń działających na próbkę podczas eksperymentu przedstawia rysunek 1. Należy podkreślić, że przy tak wykonywanym eksperymencie ciśnienie porowe w próbce może być co najwyżej równe ciśnieniu okólnemu, czyli że obowiązuje warunek:

$$p - p_p \ge 0 \tag{1}$$

Zakłada się także, iż wartości ciśnień okólnego i porowego nie zależą od siebie oraz, że ich rozkłady są jednorodne i stacjonarne w czasie, czyli że w każdym punkcie górotworu oraz dla każdej chwili czasu spełniony jest warunek:

$$p = \text{const.} \land p_p = \text{const.}$$
 (2)

Rozważmy teraz dowolną, charakteryzującą badaną skałę wielkość Q (np. granicę wytrzymałości na ściskanie, przepuszczalność, prędkość fali sejsmicznej). Przyjmując, że wielkość ta jest funkcją ciśnień okólnego i porowego, możemy zapisać, że:

$$Q = Q(p, p_p) \tag{3}$$

W powyższym związku zmienne p i p_p są zmiennymi niezależnymi, a wielkość Q zmienną zależną. Związek (3) definiuje w przestrzeni zmiennych (Q, p, p_p) pewną powierzchnię, na której wyróżnić można krzywą spełniającą równanie:

$$Q(p, p_p) = Q' = \text{const.}$$
(4)

Tak zdefiniowana krzywa (4) jest linią, wzdłuż której interesująca nas wielkość Q ma wartość stałą. Jeżeli teraz dokonamy rzutowania krzywej danej równaniem (4) na płaszczyznę (p_p , p), to otrzymujemy na tej płaszczyźnie zbiór punktów spełniających równanie:

$$f(p, p_p) = 0 \tag{5}$$

Równanie (5) definiujące zbiór par punktów p i p_p , dla których analizowana wielkość Q ma wartość stałą będzie dalej nazywane *równaniem ciśnienia efektywnego* (Robin, 1973). Z kolei dokonując w równaniu (5) podstawienia:

$$p_p = 0 \tag{6}$$

otrzymujemy:

$$f(p',0) = \text{const.} \tag{7}$$

Zdefiniowane wzorem (7) ciśnienie *p'* nazywane będzie *wartością ciśnienia efektywnego* dla *równania ciśnienia efektywnego* (5) i wielkości *Q* spełniającej warunek (4). W konsekwencji dla tak znalezionego ciśnienia *p'* spełnione jest:

$$Q(p', 0) = Q(p') = Q' = \text{const.}$$
 (8)

Powyższe rozumowanie pozwala na zdefiniowanie następujących wielkości efektywnych:

równania ciśnienia efektywnego (5), które definiuje zbiór takich par ciśnień okólnego (p) i porowego (p_p), dla których analizowana wielkość Q pozostaje stała,

- 2) *wartości ciśnienia efektywnego* (7), która może być traktowana jako pewne zastępcze ciśnienie okólne, które zastosowane do skały dla $p_p = 0$ wywiera na badaną wielkość Q taki sam wpływ jak para niezerowych ciśnień p i p_p spełniających zależności (4) i (5),
- prawa ciśnienia efektywnego, którego składowymi są wymienione wyżej równanie ciśnienia efektywnego (5) oraz wartość ciśnienia efektywnego (7); prawo to zdefiniowane jest dla danej, charakteryzującej górotwór wielkości Q spełniającej równanie (4).

Warto podkreślić, iż aczkolwiek związkiem definicyjnym dla równania ciśnienia efektywnego jest związek (5) to jednak najczęściej używa się równania (5) niejako "w odwrotnym kierunku" tzn. określając wartość wielkości Q dla znanych wartości ciśnień p i p_p .

3. Sposób wykorzystania wyników badań laboratoryjnych do wyznaczania prawa ciśnienia efektywnego

Przyjmijmy teraz, że dla wyznaczenia dla badanej wielkości *Q* powierzchni (3) wykonamy testy konwencjonalnego trójosiowego ściskania dla K ciśnień okólnych i N ciśnień porowych, w wyniku których otrzymamy L wartości wielkości *Q*. Wyniki tych testów zestawić można w sposób pokazany w tabeli 1. Oczywiście z uwagi na warunek (1) pola tabeli pozostające poniżej przekątnej głównej muszą pozostać niewypełnione.

Tab. 1. Sposób zestawienia	wyników testów kor	wencjonalnego	trójosiowego	ściskania	wykonanych	w celu	wyznaczenie
	wartości Q jako f	funkcji ciśnień p	o i p _p (Nowako	owski, 200	7)		

	<i>p</i> ₁ , [MPa]	<i>p</i> ₂ , [MPa]	<i>p</i> ₃ , [MPa]	<i>p</i> , [MPa]	<i>p</i> _K , [MPa]
<i>pp</i> 1 , [MPa]	Q_{11}	Q_{12}	Q_{13}	$Q_{1\dots}$	$Q_{1\mathrm{K}}$
p_{p2} , [MPa]		Q_{22}	Q_{23}	Q ₂	$Q_{2\mathrm{K}}$
<i>p</i> _{<i>p</i>3} , [MPa]			Q_{33}	Q ₃	$Q_{3\mathrm{K}}$
<i>p</i> _{<i>p</i>} , [MPa]				<i>Q</i>	<i>Q</i> K
p_{pN} , [MPa]					$Q_{ m NK}$

Celem wykorzystania zapisanych w tabeli 1 wyników testów trójosiowych do wyznaczenia prawa ciśnienia efektywnego należy posłużyć się zaproponowaną przez Murrella (1965) graficzną reprezentacją tych wyników, przedstawiającą zależność wyznaczanej podczas eksperymentów wielkości fizycznej od ciśnienia porowego, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze. Przykład takiej reprezentacji znajduje się na rysunku 2, na którym pokazano:

- A) wyniki eksperymentów, czyli uzyskane dla każdej pary ciśnień p_p i p wartości właściwości Q oznaczone symbolami w taki sposób, że punkty o identycznym kształcie odpowiadają wartościom Q uzyskanym dla tej samej wartości ciśnienia okólnego p,
- B) tzw. krzywe dzwonowe (oznaczone linią ciągłą) uzyskane poprzez odpowiednią aproksymację tych wyników eksperymentów, dla których spełniony był warunek

$$p = \text{const.}$$
 (9)

C) linie stałej różnicy ciśnień okólnego i porowego (oznaczone linią przerywaną), czyli



Rys. 2. Test konwencjonalnego trójosiowego ściskania – sposób graficznej prezentacji wyników (Nowakowski, 2007)

linie uzyskane poprzez aproksymację metodą graficzną tych wyników eksperymentów, dla których spełniony był warunek

$$p - p_p = \text{const.} \tag{10}$$

 D) proste stałej wartości właściwości Q (oznaczone linią ciągłą, równoległą do osi odciętych), czyli linie, dla których spełniony był warunek

$$Q = \text{const.}$$
 (11)

będące odpowiednikami linii (4), wzdłuż których wyznaczano równanie ciśnienia efektywnego (5).

Prawo ciśnienia efektywnego dla analizowanej wielkości Q uzyskuje się poprzez zaznaczenie w układzie współrzędnych (p_p , p) punktów przecięcia prostej (11) z krzywymi dzwonowymi (9), a następnie aproksymację tych punktów odpowiednia krzywą. Szczegółowy opis odpowiednich procedur podał Nowakowski (2007).

Wprowadzenie w opisany powyżej sposób prawa ciśnienia efektywnego znacznie upraszcza formułowanie dla skały związków określających pewne jej właściwości fizyczne. Jeżeli bowiem zauważymy, iż skała jest ośrodkiem porowatym, którego przestrzeń porowa wypełniona może być pozostającym pod ciśnieniem płynem porowym, to oczywistym jest, że uwzględnienie wpływu ciśnienia porowego na właściwości mechaniczne skały wymaga sporządzenia matematycznego opisu przestrzeni porowej, który musiałby zawierać informacje o wielkości i kształcie porów, ich rozmieszczeniu wewnątrz analizowanej przestrzeni a także uwzględniać to, czy tworzą one sieć połączeń czy też są pustkami izolowanymi. Wprowadzenie pojęcia prawa ciśnienia efektywnego umożliwia "obejście" tych trudności.

4. Sformułowanie problemu badawczego

Przedstawiony problem badawczy wywodzi się z powszechnie znanego faktu, że właściwości mechaniczne skały w trójosiowym stanie naprężenia zależą nie tylko od wartości ciśnień okólnego i porowego, ale od wielu innych czynników (np. Nowakowski i in., 2011; Paterson i Wong, 2005; Vutukuri i in., 1974), a w tym od tzw. prędkości obciążania, przez którą w analizowanym poniżej przypadku rozumieć będziemy prędkość zmiany deformacji.

Autorzy niniejszej pracy postanowili sprawdzić jak prędkość deformacji próbki wpływa na postać prawa ciśnienia efektywnego. W tym celu wykonano dla jednej skały dwie serie testów konwencjonalnego trójosiowego ściskania próbek, których przestrzeń porowa wypełniona była gazem inertnym (azotem) pod ciśnieniem. Badania wykonywano dla dwóch prędkości przesuwu tłoka prasy: mniejszej 5 μ m×s⁻¹ i większej 50 μ m×s⁻¹ (założono, że są one tożsame z prędkościami deformacji próbki) oraz dla następujących wartości ciśnień okólnego (*p*) i porowego (*p_p*): 0 MPa, 25 MPa, 50 MPa, 75 MPa, 100 MPa, 150 MPa, 200 MPa, 250 MPa i 300 MPa.

Przedmiotem badań był piaskowiec pochodzący z kamieniołomu znajdującego się w miejscowości Tumlin w woj. Świętokrzyskim dalej zwany piaskowcem "Tumlin". Jest to skała osadowa o teksturze zbitej i bezładnej i średnicy ziaren od 0,1 do 0,3 mm. Rzadziej spotyka się ziarna drobniejsze (0,05÷0,1 mm). Spoiwo jest kontaktowo-porowe, kwarcowo-żelaziste i stanowi do 15% objętości skały. Szczegółowy opis jej składu mineralnego oraz struktury i tekstury podali Nowakowski i in. (2003).

5. Wyniki badań – prezentacja

Prezentacje uzyskanych wyników badań otwiera tabela 2, w której zestawiono wartości różnicowej granicy wytrzymałości (${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3}) uzyskane dla poszczególnych par ciśnienie okólne (*p*), ciśnienie porowe (*p_p*), przy czym w części a) tabeli 2 zapisano wyniki uzyskane dla eksperymentów wykonywanych z prędkością przesuwu tłoka równą 5 µm×s⁻¹, a w jej części b) wyniki dla eksperymentów wykonywanych z prędkością przesuwu tłoka równą 50 µm×s⁻¹. Sama tab. 2 jest praktyczną realizacją sposobu zapisu wyników pokazanego wyżej w tabeli 1.

Graficzną prezentację powyższych danych, zgodną ze schematem pokazanym na rysunku 2, pokazano poniżej na rysunkach 3a i 3b. Na rysunkach tych krzywe dzwonowe uzyskano aproksymując zbiory punktów

spełniających warunek p = const. wielomianem 2-go stopnia. Punkty ujęte w nawias kwadratowy [] nie były uwzględniane przy aproksymacji.

Tab. 2. Zestawienie wartości różnicowej granicy wytrzymałości (${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3}) uzyskanych w wyniku eksperymentów trójosiowego ściskania dla różnych ciśnień okólnych (*p*) i porowych (*p_p*): **a**) – prędkość deformacji próbki 5 µm×s⁻¹, b) – prędkość deformacji próbki 50 µm×s⁻¹; piaskowiec "Tumlin" nasączony azotem

a)		p [MPa]								
		0	25	50	75	100	150	200	250	300
	0	68	197	272	377	425	511	572	615	665
	25		79	216	271	372	469	532	602	631
	50			89	216	326	444	508	526	550
oa]	75				79	233	371	458	479	557
M	100					91	285	398	454	539
<i>^a</i> ^{<i>a</i>}	150						90	348	370	480
I	200							100	275	406
	250								116	346
	300									150

b)		p [MPa]								
		0	25	50	75	100	150	200	250	300
	0	49	205	293	374	414	552	607	639	719
	25		71	222	290	380	509	567	648	680
	50			88	214	319	454	509	575	625
a]	75				93	233	393	487	557	627
[MF	100					107	328	451	529	589
p_p	150						142	308	438	511
	200							199	316	438
	250								217	322
	300									218



Rys. 3a. Naprężenie różnicowe (${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3}) jako funkcja ciśnienia porowego (p_{p}) przy ciśnieniu okólnym (p) jako parametrze; piaskowiec "Tumlin" nasączony azotem, prędkość deformacji próbki równa 5 µm×s⁻¹





Wyniki badań – analiza

Analiza zaprezentowanych powyżej wyników badań objęła trzy etapy:

- określenie dla badanej skały charakteru zniszczenia próbki (kruche/ciągliwe) w zależności od zastosowanego w eksperymencie ciśnienia okólnego oraz prędkości przesuwu tłoka,
- 2) określenie zależności różnicowej granicy wytrzymałości od różnicy ciśnień okólnego i porowego
- wyznaczenie wartości parametrów ciśnienia efektywnego dla wybranych wartości różnicowej granicy wytrzymałości próbki.

6.1. Wyniki badań – charakter zniszczenia próbki

Już pierwsze badania skał w konwencjonalnym trójosiowym stanie naprężenia (Heard, 1960; Mogi, 1966) udowodniły, że dla skały ściskanej trójosiowo w stałych warunkach termodynamicznych istnieje takie ciśnienie okólne p_T – zwane ciśnieniem przejścia między kruchym pękaniem a ciągliwym płynięciem skały – poniżej którego skała pęka krucho, natomiast po przekroczeniu którego zniszczenie ma charakter ciągli-



wy. W niniejszej pracy do wyznaczenia wartości p_T wykorzystano, sformułowane przez Gustkiewicza (1983), kryterium bazujące na kształcie zależności między ciśnieniem okólnym *p* a odkształceniem na granicy wytrzymałości ^{*R*} ε_1 . Kształt odpowiednich zależności przedstawia rysunek 4.

Pokazane na rysunku 4 wyniki eksperymentów dowodzą, że dla próbek ściskanych trójosiowo z przestrzenią porową wypełnioną gazem inertnym prędkość deformacji ma w dużym zakresie ciśnień okólnych bardzo niewielki wpływ na wielkość deformacji podłużnej na granicy wytrzymałości. Z rysunku wynika, że wartości ${}^{R}\varepsilon_{1}$ wyznaczone dla prędkości 5 µm×s⁻¹ i 50 µm×s⁻¹ pozostają bardzo zbliżone do ciśnienia okólnego p = 250 MPa.

Analiza krzywych ciągłych $R_{\varepsilon_1}(p)$ – będących aproksymacjami wyników eksperymentów – pokazuje, że obszar zachowań kruchych jest różny, dla różnych prędkości deformacji. W przypadku próbek ściskanych z prędkością 5 µm×s⁻¹ ciśnienie przejścia między kruchym pękaniem próbki a jej ciągliwym płynięciem (p_{T-5}) ma wartość w przybliżeniu równą 160 MPa, podczas gdy dla prędkości deformacji próbki 50 µm×s⁻¹ można uznać, że wartość

przejścia ciśnienia (p_{T-50}) wynosi 190 MPa. Wynika z tego, iż istnieją podstawy by przypuszczać, że wzrost prędkości deformacji próbki skutkuje wzrostem wartości ciśnienia przejścia między kruchym pękaniem a ciągliwym płynięciem próbki *ergo*, że wyższej prędkości deformacji towarzyszy większy zakres ciśnień okólnych, przy których próbka pęka krucho.

6.2. Wyniki badań – określenie zależności różnicowej granicy wytrzymałości od różnicy ciśnień okólnego i porowego

Prezentując wyniki badań z roku 2015 autorzy niniejszego artykułu sygnalizowali, że dla właściwej oceny procesów zachodzących na granicy wytrzymałości w próbce testowanej wg schematu pokazanego na rysunku 1 niezbędnym jest określenie, jak zmienia się różnicowa granica wytrzymałości próbki dla stałej różnicy ciśnień okólnego i porowego (por. Nowakowski i in., 2015). W tym celu na rysunkach pokazujących zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym przy ciśnieniu okólnym jako parametrze (Rys. 2a i 2b) należy wykreślić krzywe łączące te wartości $R_{\sigma_1-\sigma_3}$, które spełniają warunek

$$\Delta p = p - p_p = \text{const.} \tag{12}$$

Wyniki tej operacji pokazano na rysunkach 5a i 5b. Analiza krzywych spełniających warunek (12) pokazanych na tych rysunkach prowadzi do następujących wniosków:

i) Dla danej wartości różnicy (12) istnieje możliwość wyodrębnienia na płaszczyźnie (p_p , ${}^R\sigma_1$ - σ_3) dwóch zakresów wyników: zakresu umocnienia – w którym dla stałej różnicy ciśnień okólnego i porowego różnicowa granica wytrzymałości rośnie, oraz zakresu stabilizacja/osłabienie – w którym różnicowa granica wytrzymałości dla $p - p_p$ = const. pozostaje stała, lub nawet maleje.



Rys. 5a. Naprężenie różnicowe (${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3}) jako funkcja ciśnienia porowego (p_{p}) przy ciśnieniu okólnym (p) jako parametrze; piaskowiec "Tumlin" nasączony azotem, prędkość deformacji próbki równa 5 µm×s⁻¹



Rys. 5b. Naprężenie różnicowe (${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3}) jako funkcja ciśnienia porowego (p_{p}) przy ciśnieniu okólnym (p) jako parametrze; piaskowiec "Tumlin" nasączony azotem, prędkość deformacji próbki równa 50 µm×s⁻¹

- *ii)* Z układu krzywych pokazanych na rysunkach 5a i 5b wynika, że w zasięg strefy umocnienia wydaje się być większy dla próbek ściskanych z większą prędkością. Dla dalszych rozważań przyjęto, że zasięg ten obejmuje na rysunku 5a obszar dla ${}^{R}\sigma_{1}$ - $\sigma_{3} \le 325$ MPa, a na rysunku 5b obszar dla ${}^{R}\sigma_{1}$ - $\sigma_{3} \le 425$ MPa.
- *iii)* Dla danej wartości różnicy (12) zakres wspomnianego wyżej umocnienia materiału wydaje się być wyższy dla próbek ściskanych z wyższą prędkością deformacji. Przykładowo dla $p p_p = 0$ MPa (eksperyment odpowiadający jednoosiowemu ściskaniu) zakresy te wyglądają następująco: dla prędkości deformacji równej 5 µm×s⁻¹ od 75 MPa do 150 MPa, a dla prędkości 50 µm×s⁻¹ od 50 MPa do 225 MPa.

6.3. Wyniki badań – wyznaczenie wartości parametrów prawa ciśnienia efektywnego

Parametry prawa ciśnienia efektywnego wyznaczano zgodnie z procedurą, która była już wielokrotnie opisywana m. in. w pracach Nowakowskiego (2007, 2012) i Nowakowskiego i in. (2015). Parametrami tymi były: współczynnik η w spełniającym warunek (5) równaniu ciśnienia efektywnego oraz wartość ciśnienia efektywnego spełniająca warunek (7). Zakładano, że równanie (5) ma postać:

$$p' = p - \eta \times p_p \tag{12}$$

w którym p' jest poszukiwaną wartością ciśnienia efektywnego a η pewną wagą informującą, jak ciśnienie porowe wpływa na zmianę wartości ciśnienia efektywnego. Wartości p' i η wyznaczano dla ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} = {75 MPa, 175 MPa, 275 MPa, 375 MPa}. Poniżej (Tab. 3) zestawiono prawa ciśnienia efektywnego uzyskane dla wybranych wartości różnicowej granicy wytrzymałości dla mniejszej i większej prędkości deformacji próbki. Na rysunku 6 pokazano równania z tabeli 3 wykreślone w układzie współrzędnych (p_{p} , p), a na rysunku 7 zależności wartości parametrów p' i η od wartości ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} .

		$5 \ \mu m \times s^{-1}$	50 μm×s ⁻¹
1	2	3	4
	75 [MPa]	$3,007 \text{ MPa} = p - 0,927 p_p$	$10,029 \text{ MPa} = p - 0,800 p_p$
$^{R}\sigma_{1}-\sigma_{3}$	175 [MPa]	17,313 MPa = $p - 0,991 p_p$	20,206 MPa = $p - 0,877 p_p$
	275 [MPa]	$37,740 \text{ MPa} = p - 1,057 p_p$	$40,713 \text{ MPa} = p - 0,954 p_p$
	375 [MPa]	58,758 MPa = $p - 1,185 p_p$	72,756 MPa = $p - 0,989 p_p$

Tab. 3. Równania i wartości ciśnienia efektywnego uzyskane dla różnych wartości różnicowej granicy wytrzymałości (${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3}) i prędkości przesuwu tłoka 5 μ m×s⁻¹ oraz 50 μ m×s⁻¹; piaskowiec "Tumlin" nasączony azotem



Rys. 6. Linie praw ciśnienia efektywnego; piaskowiec "Tumlin" nasączony azotem



Rys. 7. Zależność parametrów ciśnienia efektywnego p' i η od wartości ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} ; piaskowiec "Tumlin" nasączony azotem

7. Interpretacja uzyskanych wyników badań

W jednej ze swoich poprzednich prac poświeconych problematyce określania postaci prawa ciśnienia efektywnego i jej związków z zachodzącymi w obciążanej próbce procesami fizycznymi autorzy artykułu pokazali, że umocnieniu materiału towarzyszy spadek wartości współczynnika η i wzrost wartości stałej p', natomiast przy osłabieniu zachodzi proces odwrotny: η rośnie, a p' maleje (por. Nowakowski i in., 2015). Poszukując związków między wartościami p' i η a prędkością deformacji próbki należy zaprezentowane powyżej w rozdz. 5 i 6 wyniki przeanalizować w taki sposób, aby uzyskać odpowiedź na następujące pytania:

- a) W jaki sposób wartości p' i η zależą od ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} w przypadku próbek ściskanych ze stałą prędkością deformacji?
- b) Jakie są zależności miedzy wartościami *p*' i η wyznaczonymi dla tej samej wartości ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} przy różnych wartościach prędkości deformacji?

7.1. Zależność między wielkością $R_{\sigma_1-\sigma_3}$ a wartościami *p*' i η

W przypadku eksperymentów wykonywanych z prędkością 5 μ m×s⁻¹ równania zestawione w tabeli 3 oraz krzywe pokazane na rysunkach 6 i 7 sugerują, że o ile dla ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} = {75 MPa, 175 MPa} próbka badanego piaskowca ulega umocnieniu (η < 1), o tyle dla ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} = {275 MPa i 375 MPa} mamy najpierw do czynienia z przypadkiem konwencjonalnego ciśnienia efektywnego ($\eta \approx 1$), a następnie efektem osłabienia ($\eta > 1$). Należy jeszcze zauważyć, że w rozważanym zakresie naprężeń różnicowych umocnienie próbki konsekwentnie słabnie wraz ze wzrostem ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} (wartości η rosną) by następnie przejść do stanu osłabienia.

Dla eksperymentów wykonywanych z prędkością 50 μ m × s⁻¹ rozkład wartości *p*' i η w zależności od ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} (Rys. 7) oraz wartości z tabeli 3 sugerują, że w rozważanym zakresie naprężeń różnicowych cały czas mamy do czynienia z umocnieniem próbki (konsekwentnie $\eta < 1$) aczkolwiek stopień umocnienia maleje (wartość η przez cały czas rośnie).

7.2. Zależność wartości p' i η od prędkości deformacji próbki

Pokazane w tabeli 3 i na rysunkach 6 i 7 zależności jednoznacznie wskazują, że wzrost prędkości deformacji próbki zmienia znacząco wartości parametrów ciśnienia efektywnego wyznaczane dla danej wartości różnicowej granicy wytrzymałości. Dla wszystkich rozważanych wartości $R\sigma_1$ - σ_3 zależności między parametrami prawa ciśnienia efektywnego były takie same i wyglądały następująco:

- dla tej samej wartości ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} wartości ciśnienia efektywnego p' były zawsze wyższe dla prędkości większej,
- dla tej samej wartości ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} wartości współczynnika η były zawsze dla prędkości większej niższe.

8. Podsumowanie

Podsumowanie powyższych wyników należy rozpocząć od skorygowania wniosków wyciągniętych ze wstępnych analiz wyników eksperymentów. Otóż w rozdz. 6.2, pkt *ii*) stwierdzono, że zakres wartości ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} , w którym ulegają umocnieniu próbki ściskane z prędkością mniejszą, sięga 325 MPa. Tymczasem przeprowadzona dla tej prędkości deformacji w rozdziale 7.1 analiza parametrów prawa ciśnienia efektywnego pokazuje, że zakres ten należy obniżyć do wartości ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} < 275 MPa. Jest to znacząca korekta ilościowa, choć dla wyników analizy jakościowej nie ma ona większego znaczenia.

Wyniki badań pokazały, iż zmiana prędkości deformacji ma znaczący wpływ na sposób zachowania podczas testu konwencjonalnego trójosiowego ściskania próbki przedmiotowego piaskowca, której przestrzeń porowa wypełniona jest sprężonym gazem inertnym. W szczególności wykazano, że ze wzrostem prędkości deformacji rośnie zakres ciśnień okólnych, dla których próbka pęka krucho, czego dowodzi zależność $p_{T-50} > p_{T-5}$. Widać także, że dla wyższych prędkości deformacji zakres wartości ${}^{R}\sigma_{1}$ - σ_{3} dla których skała ulega umocnieniu jest znacząco większy. Rośnie także w tym przypadku stopień tego umocnienia, co przejawia się spadkiem – ze wzrostem prędkości deformacji – wartości współczynnika η .

Zjawiska te znajdują wytłumaczenie w mechanizmie tzw. umocnienia dylatacyjnego, które polega na tym, że gdy dla danej pary ciśnień (p, p_p) ściskana trójosiowo próbka wchodzi w zakres niszczących naprężeń różnicowych $(\sigma_1 - \sigma_3 \approx^R \sigma_1 - \sigma_3)$ następuje w niej znaczący przyrost objętości jej przestrzeni porowej, co skutkuje spadkiem wartości ciśnienia porowego i wzrostem wartości różnicy $\Delta p = p - p_p$, czyli wzrostem rzeczywistej wartości działającego na próbkę ciśnienia okólnego (szczegółowe rozważania na ten temat por. Gustkiewicz, 1990; Gustkiewicz i in., 2004). Wprawdzie z warunków eksperymentu wynika, że przestrzeń porowa próbki podłączona jest do niezależnego akumulatora ciśnienia, ale wyrównanie ciśnienia płynu porowego uzależnione jest od prędkości filtracji tegoż płynu, która w oczywisty sposób nie jest nieskończona. W efekcie im większa prędkość deformacji próbki tym trudniej akumulatorowi ciśnienia "nadążyć" za spadkiem p_p wywołanym wzrostem objętości przestrzeni porowej.

Zastosowana do omówionych powyżej wyników eksperymentów procedura wyznaczania prawa ciśnienia efektywnego wykazała, że wzrost prędkości deformacji próbki skutkuje znaczącymi zmianami wartości parametrów prawa ciśnienia efektywnego. Kierunek tych zmian potwierdza to, co do tej pory wiadomo o procesach zachodzących podczas konwencjonalnego trójosiowego ściskania próbek, których przestrzeń porowa wypełniona jest sprężonym gazem inertnym.

Na zakończenie należy jeszcze zwrócić uwagę, że w omówionych wyżej badaniach używano inertnego płynu porowego, którego oddziaływanie ze skałą powinno być wyłącznie mechaniczne. Zakłada się, iż udało się w ten sposób wyeliminować ewentualne efekty sorpcyjne, których wpływ na wyniki badań może być bardzo poważny (por. Nowakowski, 2005; Gustkiewicz i in., 2004, 2003).

Praca została wykonana w roku 2016 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Gustkiewicz J., 1985: *Transition of rocks from the brittle to ductile state: strain at failure as a function of confining pressure*. Acta Geophys. Pol. Vol. XXXIII, No. 2, pp. 169-181.
- Gustkiewicz J., 1990: *Deformacje i wytrzymałość skał w trójosiowym stanie naprężenia z uwzględnieniem płynów porowych.* W: "Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe. Tom I", praca zbiorowa, J. Litwiniszyn (red.), Wyd. AGH, str. 96-136.
- Gustkiewicz J., Nowakowski A., Lizak Z., 2003: Zmiany niektórych właściwości fizycznych piaskowca pod wpływem sorbujących i niesorbujących płynów porowych pod cisnieniem. Prace IMG PAN, t. 5, nr 3-4, str. 364-375.
- Gustkiewicz J., Nowakowski A., Nurkowski J., Stanisławski L., Lizak Z., 2004: *Kształtowanie się ciśnienia efektywnego w klasycznym trójosiowym stanie naprężenia na podstawie wyników pękania i deformacji wybranych skał*. Prace IMG PAN, t. 6, nr 1-2, str. 3-17.
- Heard H. C., 1960: Transition from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure and interstitial fluid pressure. In: Rock Deformation, D. Griggs & J. Handin (eds), Geol. Soc. Am., Memoir 79, pp. 193-226.
- Kovári K., Tisa A., Einstein H. H., Franklin J. A., 1983: Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, No. 6, pp. 283-290.
- Mogi K., 1966: *Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow*. Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo University, Vol. 44, pp. 215-232.
- Murrell S. A. F., 1965: *The effect of triaxial stress systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures*. Geophys. J. Roy. Soc., Vol. 10, pp. 231-281.
- Nowakowski A., 2005: Różne sposoby kształtowania się ciśnienia efektywnego w skale znajdującej się na granicy wytrzymałości. Prace IMG PAN, t. 7, nr 3-4, str. 189-202.
- Nowakowski A., 2007: On certain determinantial method of equation and effective pressure evaluation on the basis of laboratory researches. Arch. Min. Sci., V. 52, No. 4, pp. 587-610.
- Nowakowski A., 2012: *The law of effective stress for rocks in the light of results of laboratory experiments*. Arch. Min. Sci., V. 57, No. 4, pp. 1027-1044.
- 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 str.
- Nowakowski A., Nurkowski J, Lizak Z., 2011: Wpływ prędkości obciążania na wartości pewnych stałych materiałowych uzyskiwanych w teście konwencjonalnego trójosiowego ściskania. Prace IMG PAN, t. 13, nr 1-4, str. 45-60
- Nowakowski A., Nurkowski J, Lizak Z., 2015: Wpływ niektórych efektów fizycznych i fizykochemicznych na wartości parametrów prawa ciśnienia efektywnego. Prace IMG PAN, t. 17, nr 3-4, str. 77-90.
- Paterson M. S., Wong T-f, 2005: *Experimental Rock Deformation The Brittle Field*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 347 pages.

Robin, P.-Y. F., 1973: Note on effective pressure. J. Geophys. Res., 78, 2434-2437.

Vutukuri V. S., Lama R. D., Saluja S. S., 1974: Handbook on Mechanical Properties of Rocks – Testing Techniques and Results – Vol. I. Trans Tech Publications, Claustahl, Germany, 280 pages.

The dependence of the form of the effective pressure law on the sample deformation rate for sandstone saturated with an inert gas

Abstract

The article contains a discussion of the results of researches, which aim was to determine the influence of deformation rate on the shape of the effective pressure law. Two series of tests of conventional triaxial compression test were made, when pore space of tested rock sample was filled with pressurized inert fluid (nitrogen). Samples were tested with two different deformation rates: $5 \,\mu\text{m}\times\text{s}^{-1}$ and $50 \,\mu\text{m}\times\text{s}^{-1}$. Confining pressure *p* and pores *p*_p were varied in the range of 0 to 300 MPa.

Results of laboratory tests have shown that a change in deformation rate has a significant impact on the sandstone sample behaviour during the conventional triaxial compression test. The results prove that increase of sample deformation rate increases the confining pressure range at which the sample cracks in a brittle way as well as the range of dilatantial strengthening of tested material.

It was also shown that the increase in sample deformation rate results in significant changes in values of parameters of effective pressure law. The observed changes confirmed the existence of a relationship between the deformation rate and dilatantial strengthening of tested material.

Keywords: conventional triaxial compression, differential strength, effective pressure law, dilatantial strengthening