

Wpływ niektórych efektów fizycznych i fizykochemicznych na wartości parametrów prawa ciśnienia efektywnego

ANDRZEJ NOWAKOWSKI, JANUSZ NURKOWSKI, ZBIGNIEW LIZAK

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

Streszczenie

Wykonano kilka serii eksperymentów konwencjonalnego trójosiowego ściskania na próbkach wyciętych z różnego typu skał. Wyznaczono prawo ciśnienia efektywnego dla próbek skał, w których naprężenia osiągnęły różnicową granicę wytrzymałości. Pokazano, że dla tego stanu naprężenia postać prawa ciśnienia efektywnego silnie zależy od dwóch przeciwstawnych procesów: osłabienia próbki – będącego skutkiem zachodzących w skałe procesów fizykochemicznych (sorpcja, efekt Rebintera), oraz umocnienia próbki (tzw. umocnienia dylatacyjnego), – które jest konsekwencją spadku ciśnienia porowego wskutek zwiększenia objętości przestrzeni porowej, które zachodzi podczas niszczenia próbki.

Słowa kluczowe: trójosiowe ściskanie, różnicowa granica wytrzymałości, prawo ciśnienia efektywnego, sorpcja, efekt Rebintera, umocnienie dylatacyjne

1. Wstęp

Prowadzone w pracowni od lat 90-tych XX wieku badania nad zachowaniem się skał w warunkach konwencjonalnego trójosiowego stanu naprężenia doprowadziły do sformułowania tzw. **prawa ciśnienia efektywnego**. W przypadku próbki skalnej obciążonej ciśnieniem okólnym p , której przestrzeń porowa wypełniona jest płynem pod ciśnieniem p_p , prawo to definiuje pewne zastępcze ciśnienie p' , zwane ciśnieniem efektywnym, którego oddziaływanie na interesującą nas właściwość badanej skały jest identyczne jak pary ciśnień p i p_p .

Wprowadzenie takiego ciśnienia zastępczego 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. Biorąc pod uwagę, że opis taki 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 nie można się dziwić, że jego sporządzenie uznać należy za praktycznie niemożliwe. Wprowadzenie pojęcia ciśnienia efektywnego umożliwia „obejście” tych trudności.

Zarówno studia literaturowe (np. Nur i Byerlee, 1971; Brace, 1972; Robin, 1973) jak i przeprowadzone dotychczas badania laboratoryjne (np.: Gustkiewicz, 1990; Gustkiewicz i Orengo, 1991; Czapliński i Gustkiewicz, 1990) prowadzą do wniosku, że postać prawa ciśnienia efektywnego zależy m. in. od następujących czynników:

- i) rodzaju płynu porowego; przez co rozumie się zarówno różne stany skupienia tego płynu (ciecz bądź gaz) jak i jego właściwości fizykochemiczne (płyn sorbujący bądź też fizykochemicznie obojętny),
- ii) właściwości przestrzeni porowej skały; przez co rozumieć należy nie tylko wielkość udziału porów w objętości skały, ale także ich kształt oraz to, czy są one izolowane czy też tworzą sieć połączeń,
- iii) analizowanej właściwości skały; co oznacza, że dla różnych właściwości skały traktowanych jako funkcja ciśnień okólnego i porowego postacie prawa ciśnienia efektywnego mogą być różne,

- iv) stanu naprężenia w skale; czyli, że prawo ciśnienia efektywnego będzie prawdopodobnie inne dla skały, w której stan naprężenia i deformacji powiązany jest zmodyfikowanymi przez Biota (Biot, 1941) równaniami Hooke'a, niż dla skały, która osiągnęła granicę wytrzymałości.

Niniejsza praca poświęcona jest analizie wpływu jaki na postać prawa ciśnienia efektywnego mają niektóre zjawiska fizykochemiczne oraz zachodzące podczas obciążania zmian struktury skały.

2. Prawo ciśnienia efektywnego – definicje

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 zaprezentowano jedynie jego ogólną koncepcję.

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

na pobocznice 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 rys. 1. Należy podkreślić, że przy tak wykonywanym eksperymencie ciśnienie porowe w próbce może być co najwyżej równe ciśnieniu okólnemu, czyli że obowiązuje warunek:

$$p - p_p \geq 0 \quad (1)$$

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

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

Rozważmy teraz dowolną, charakteryzującą badaną skałę wielkość Q (np. granicę wytrzymałości na ściskanie, przepuszczalność, prędkość fali sejsmicznej), oraz przyjmijmy, że wielkość ta jest funkcją ciśnień okólnego i porowego, co można zapisać w formie:

$$Q = Q(p, p_p) \quad (3)$$

Rys. 1. Test konwencjonalnego trójosiowego ściskania – schemat obciążeń próbki (Nowakowski, 2012)

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

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

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:

$$f(p, p_p) = 0 \quad (5)$$

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

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:

$$p_p = 0 \quad (6)$$

otrzymujemy:

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

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 znalezionej wartości ciśnienia p' spełnione jest:

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

Powyższe rozumowanie pozwala na zdefiniowanie następujących wielkości efektywnych:

- 1) **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),
- 3) **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 opisanej związkiem (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 zestawień można w sposób pokazany w tab. 1. Oczywiście z uwagi na warunek (1) pola tabeli pozostające poniżej przekątnej głównej muszą pozostać niewypełnione.

Tab. 1. Sposób zestawienia wyników testów konwencjonalnego trójosiowego ściskania wykonanych w celu wyznaczenie wartości Q jako funkcji ciśnień p i p_p (Nowakowski, 2007)

	P_1 [MPa]	P_2 [MPa]	P_3 [MPa]	$P_{...}$ [MPa]	P_K [MPa]
P_{p1} [MPa]	Q_{11}	Q_{12}	Q_{13}	$Q_{1...}$	Q_{1K}
P_{p2} [MPa]		Q_{22}	Q_{23}	$Q_{2...}$	Q_{2K}
P_{p3} [MPa]			Q_{33}	$Q_{3...}$	Q_{3K}
$P_{p...}$ [MPa]				$Q_{.....}$	$Q_{...K}$
P_{pN} [MPa]					Q_{NK}

Celem wykorzystania zapisanych w tab. 1 wyników testów trójosiowych do wyznaczania 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 pokazuje rys. 2, na którym pokazane zostały trzy podstawowe elementy:

- A) wyniki eksperymentów, czyli uzyskane dla każdej pary ciśnień p_p i p wartości właściwości Q oznaczone punktami 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 interpolację tych wyników eksperymentów, dla których spełniony był warunek

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

wielomianami drugiego stopnia,

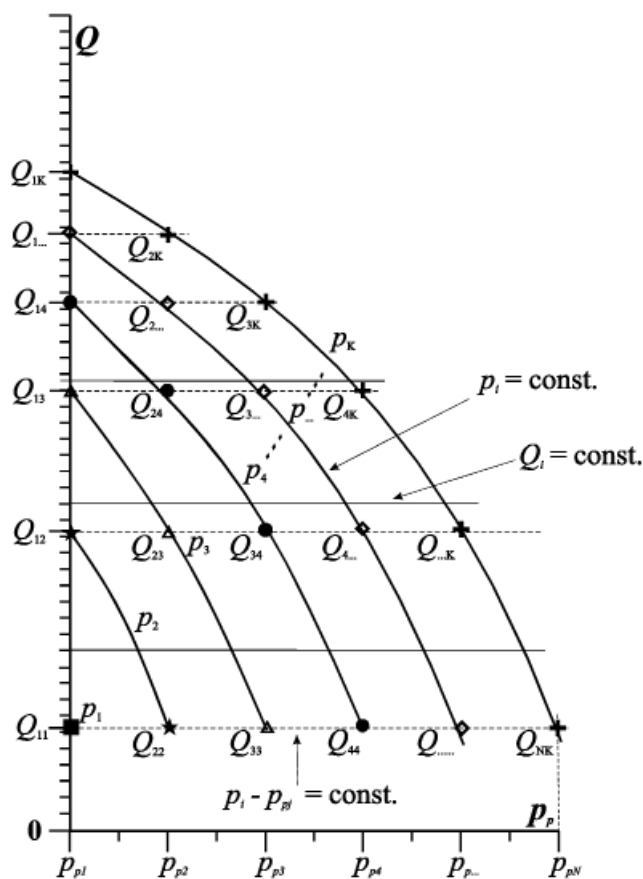
- C) linie stałej różnicy ciśnień okólnego i porowego (oznaczone linią przerywaną) czyli linie uzyskane poprzez interpolację metodą graficzną tych wyników eksperymentów, dla których spełniony był warunek

$$p - p_p = \text{const.} \quad (10)$$

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

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

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



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

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 odpowiednią krzywą. Szczegółowy opis odpowiednich procedur podał Nowakowski (2007).

4. Wyniki badań laboratoryjnych

Celem badań laboratoryjnych, których wyniki zaprezentowane i przedyskutowane zostaną poniżej było szczegółowe przeanalizowanie zależności między ciśnieniami okólnym i porowym zachodzących w trójosiowo ściskanej próbce skalnej, w której naprężenie różnicowe osiągnęło tzw. różnicową granicę wytrzymałości $^R\sigma_1-\sigma_3$. Zależności te analizowano dla różnych skał i różnych płynów porowych.

Piaskowiec „Tumlin” nasączony naftą

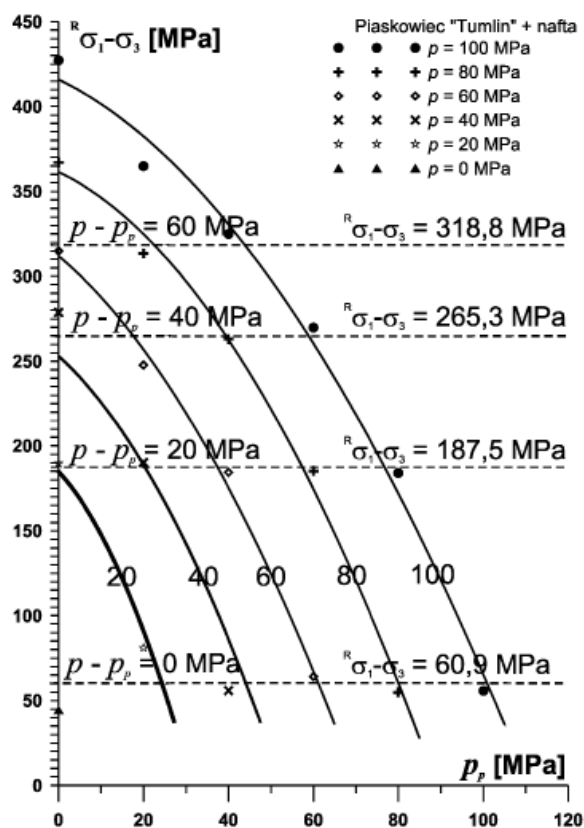
Uzyskaną dla nasączonych naftą próbek piaskowca „Tumlin” zależność między różnicową granicą wytrzymałości $^R\sigma_1-\sigma_3$ a ciśnieniem porowym p_p , przy ciśnieniu okólnym p jako parametrze pokazano na rys. 3.

Eksperymenty wykonano dla ciśnień okólnych i porowych równych 0, 20, 40, 60, 80 i 100 MPa (jak to pokazuje legenda w prawym górnym rogu rysunku).

Krzywe dzwonowe (patrz wyżej: rozdz. 3, pkt B)) wykreślono aproksymując wyniki eksperymentów dla tego samego ciśnienia okólnego wielomianem drugiego stopnia.

Linie stałej różnicy ciśnień (rozdz. 3, pkt. C); na rys. 3 linia przerywana) wykreślono dla wartości $p - p_p$ równych 0, 20, 40 i 60 MPa. Uznano, że pokazany na rys. 3 rozkład wyników eksperymentów pozwala na aproksymację odpowiednich wyników prostymi równoległymi do osi odciętych. Oznacza to, że dla stałej wartości różnicy ciśnień okólnego i porowego (10) różnicowa granica wytrzymałości $^R\sigma_1-\sigma_3$ ma również wartość stałą.

Linie $p - p_p = \text{const.}$ przecinają oś rzędnych w punktach o współrzędnych $^R\sigma_1-\sigma_3$ równych odpowiednio 60,9 MPa, 187,5 MPa, 265,3 MPa i 318,8 MPa. Postanowiono wyznaczać prawo ciśnienia efektywnego dla tych właśnie wartości różnicowej granicy wytrzymałości. Zatem proste $^R\sigma_1-\sigma_3 = \text{const.}$ (rozdz. 3, pkt. D)) pokrywają się w tym przypadku z prostymi $p - p_p = \text{const.}$ i na rys. 3 nie zaznaczano ich linią ciągłą wpisując jedynie nad linią przerywaną odpowiednie wartości $^R\sigma_1-\sigma_3$.



Rys. 3. Różnicowa granica wytrzymałości jako funkcja ciśnienia porowego przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; piaskowiec „Tumlin” nasączony naftą

Następnie, aby znaleźć składowe prawa ciśnienia efektywnego (patrz wyżej; rozdz. 2, pkt. 1) – 3)) posłużono się procedurą wzmiankowaną w zakończeniu rozdz. 3. Najpierw, w układzie współrzędnych

(p_p, p) zaznaczono współrzędne punktów przecięcia pokazanych na rys. 3 prostych $^R\sigma_1 - \sigma_3 = \text{const.}$ z odpowiednimi krzywymi dzwonowymi, a następnie poszukiwano równania linii aproksymującej. Wynik tych działań pokazuje rys. 4. Widać na nim, że odpowiednie linie aproksymujące są prostymi, których ogólne równanie zapisać można w postaci:

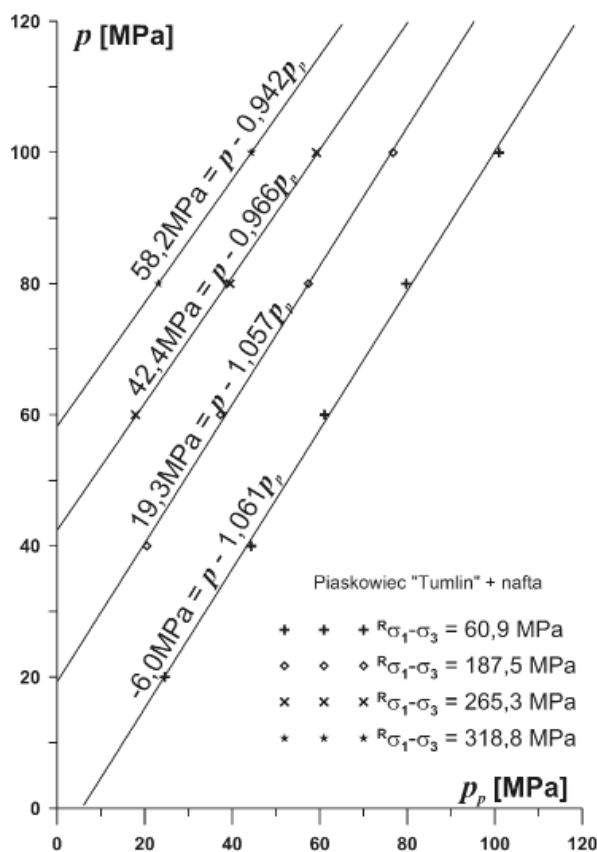
$$p' = p - \eta p_p \quad (12)$$

Równanie to jest poszukiwanym **równaniem ciśnienia efektywnego** zdefiniowanym związkiem (5). Jeżeli teraz w równaniu (12) położymy $p_p = 0$ MPa, to otrzymamy współrzędną p' punktu przecięcia prostej (12) z osią rzędnych p . Współrzędna ta jest dla równania ciśnienia efektywnego (12) **wartością ciśnienia efektywnego** (zdefiniowaną powyżej związkiem (7)).

Przeanalizowanie pokazanych na rys. 4 równań prostych wskazuje, że dla każdego z tych równań można przyjąć, że $\eta \approx 1$ i sprowadzić związek (12) do postaci:

$$p' = p - p_p \quad (13)$$

Jeżeli prawo ciśnienia efektywnego dane jest związkiem (13) to proponuje się aby – przez analogię do prawa naprężeń efektywnych Terzagiego – używać wobec równania (13) nazwy **równanie konwencjonalnego okólnego ciśnienia efektywnego** (por. Gustkiewicz, 1990).



Rys. 4. Równania i wartości ciśnienia efektywnego; piaskowiec „Tumlin” nasączony naftą

Interpretacja fizyczna powyższych rozważań jest taka, że jeżeli dla stałej różnicy ciśnień okólnego i porowego równej X ($p - p_p = \text{const.} = X$) wartość różnicowej granicy wytrzymałości pozostaje stała i równa Y ($^R\sigma_1 - \sigma_3 = \text{const.} = Y$), to prawo ciśnienia efektywnego dla linii $^R\sigma_1 - \sigma_3 = Y$ wygląda następująco:

– równanie ciśnienia efektywnego ma postać:

$$p - p_p = X \quad (14)$$

czyli jest równaniem konwencjonalnego ciśnienia efektywnego,

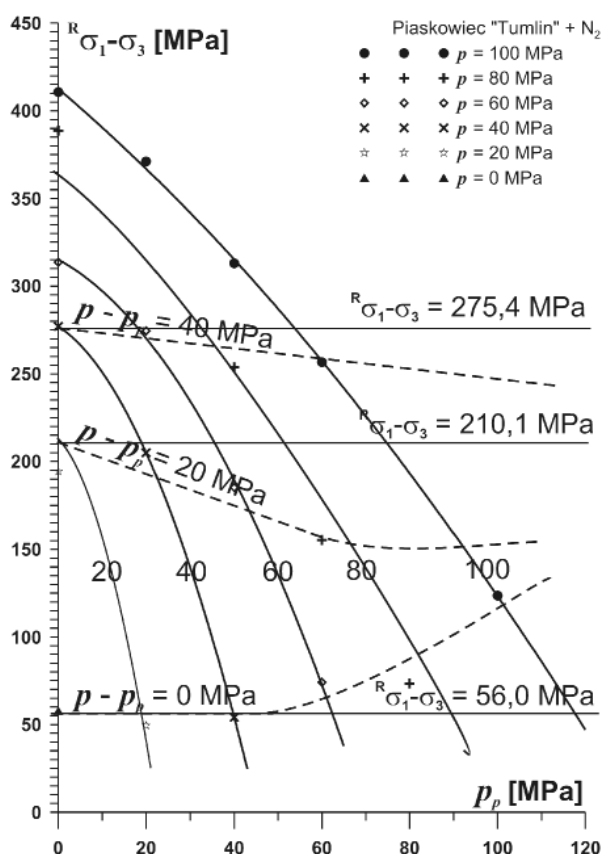
– wartość ciśnienia efektywnego wynosi:

$$p' = X \quad (15)$$

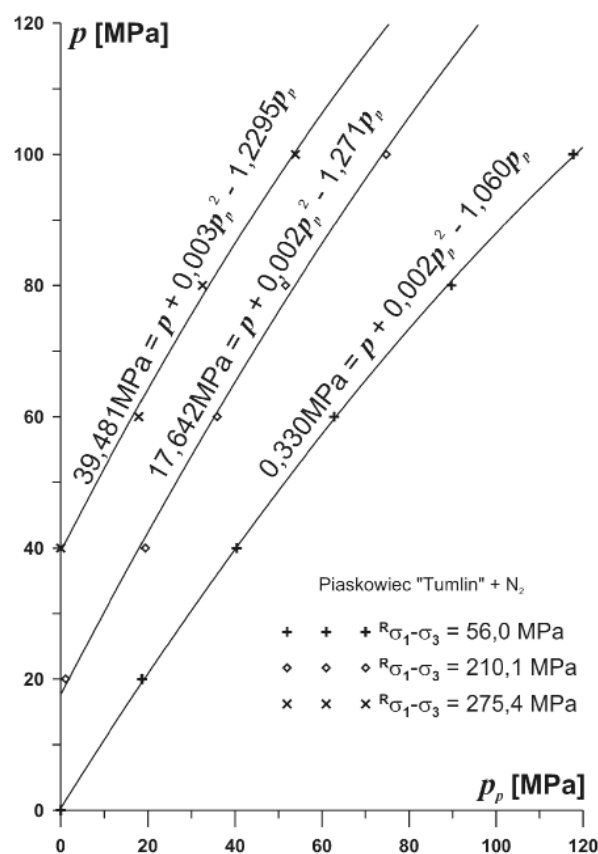
Oznacza to również, że dla tej pary skała – płyn porowy oddziaływanie między płynem porowym a skałą jest czysto mechaniczne a struktura i tekstura skały są tego rodzaju, że ciśnienie porowe pozostaje w niej stałe w czasie i przestrzeni niezależnie od zmian naprężenia, czyli, że spełnione są zdefiniowane przez Handina i in. (1963) warunki stosowania prawa naprężeń efektywnych Terzagiego.

Piaskowiec „Tumlin” nasączony azotem

Przedmiotem kolejnych rozważań będą wyniki uzyskane dla tego samego piaskowca „Tumlin” ale nasączonego nie cieczą lecz gazem, a konkretnie azotem. Uzyskane dla tego przypadku zależności między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze pokazuje rys. 5. Linie stałej różnicy ciśnień wykreślono dla $p - p_p$ równych 0 MPa, 20 MPa i 40 MPa, a linie $^R\sigma_1 - \sigma_3 = \text{const.}$ dla $^R\sigma_1 - \sigma_3$ równych 56,0 MPa, 210,1 MPa i 275,4 MPa. Te wartości różnicowej granicy wytrzymałości odpowiadają rzędnym punktów przecięcia linii $p - p_p = \text{const.}$ z osią $^R\sigma_1 - \sigma_3$. Prawo ciśnienia efektywnego wyznaczano dla wymienionych powyżej wartości różnicowej granicy wytrzymałości, a wyniki tego wyznaczania pokazano na rys. 6.



Rys. 5. Różnicowa granica wytrzymałości jako funkcja ciśnienia porowego przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; piaskowiec „Tumlin” nasączony azotem



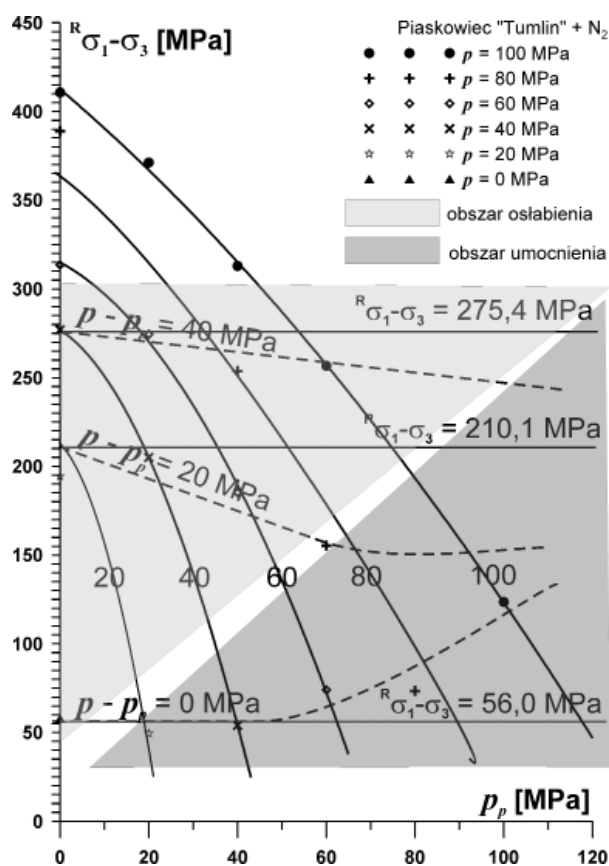
Rys. 6. Prawo ciśnienia efektywnego, estymacja nieliniowa; piaskowiec „Tumlin” nasączony azotem

Z aproksymacji pokazanych na rys. 6 wynika, że równanie ciśnienia efektywnego (5) jest w tym przypadku nieliniową funkcją ciśnienia porowego, choć przynajmniej wartości współczynników przy składniku p_p^2 są bardzo niewielkie. Jednakowoż aktualny stan wiedzy o procesach zachodzących w obciążanej w opisywany sposób próbce skalnej nie uzasadnia tej nieliniowości. Do wyznaczania prawa ciśnienia efektywnego należy zatem w tym przypadku podejść w sposób mniej zautomatyzowany.

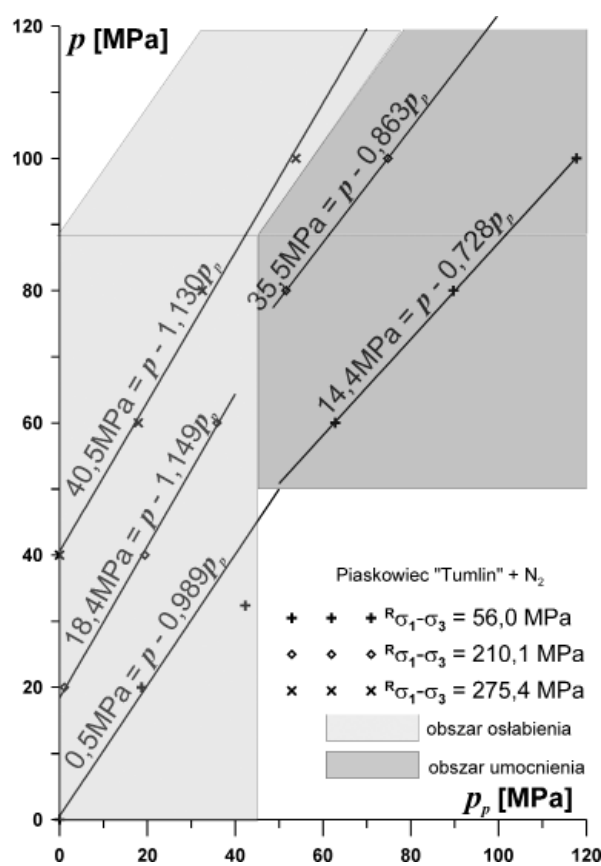
Na właściwy sposób wyznaczania prawa ciśnienia efektywnego naprowadza w tym przypadku analiza kształtu linii stałej różnicy ciśnień. Przeanalizujemy pokazane na rys. 5 przypadki takich linii:

- $p - p_p = 0$ MPa; kształt linii sugeruje iż początkowo (dla $p_p \leq 50$ MPa) stałym wartościom różnicy ciśnień okólnego i porowego towarzyszą stałe wartości różnicowej granicy wytrzymałości, czyli, że byłby to przypadek konwencjonalnego ciśnienia efektywnego. Natomiast dla $p_p > 50$ MPa stałej różnicy ciśnień $p - p_p$ towarzyszy wzrost wartości $^R\sigma_1 - \sigma_3$. Jest to więc w układzie współrzędnych (p_p , $^R\sigma_1 - \sigma_3$) obszar umocnienia.
- $p - p_p = 20$ MPa; dla $p_p \leq 60$ MPa stałej różnicy ciśnień $p - p_p$ towarzyszy spadek wartości $^R\sigma_1 - \sigma_3$. Zatem mamy tutaj do czynienia z obszarem osłabienia. Następnie, dla $p_p > 60$ MPa, stałej różnicy ciśnień $p - p_p$ towarzyszy stała wartość $^R\sigma_1 - \sigma_3$ (konwencjonalne ciśnienie efektywne), czyli – w stosunku do sytuacji dla niższych ciśnień porowych – próbka ulega umocnieniu. Jest to więc swego rodzaju obszar umocnienia.
- $p - p_p = 40$ MPa; w całym zakresie ciśnień porowych stałej różnicy ciśnień $p - p_p$ towarzyszy spadek wartości $^R\sigma_1 - \sigma_3$. Czyli znowu obszar osłabienia.

Oba te obszary schematycznie zaznaczono na rys. 7. Następnie prawo ciśnienia efektywnego wyznaczano oddzielnie dla punktów znajdujących się w obszarze osłabienia i umocnienia, co pokazano na rys. 8.



Rys. 7. Różnicowa granica wytrzymałości jako funkcja ciśnienia porowego przy ciśnieniu okólnym jako parametrze – strefy osłabienia i umocnienia; piaskowiec „Tumlin” nasączony azotem

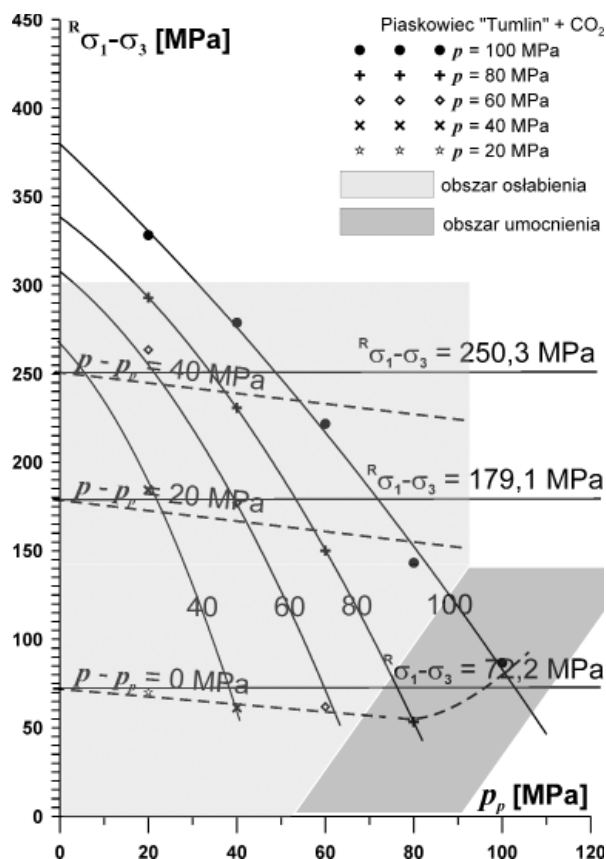


Rys. 8. Prawa ciśnienia efektywnego – strefy osłabienia i umocnienia; piaskowiec „Tumlin” nasączony azotem

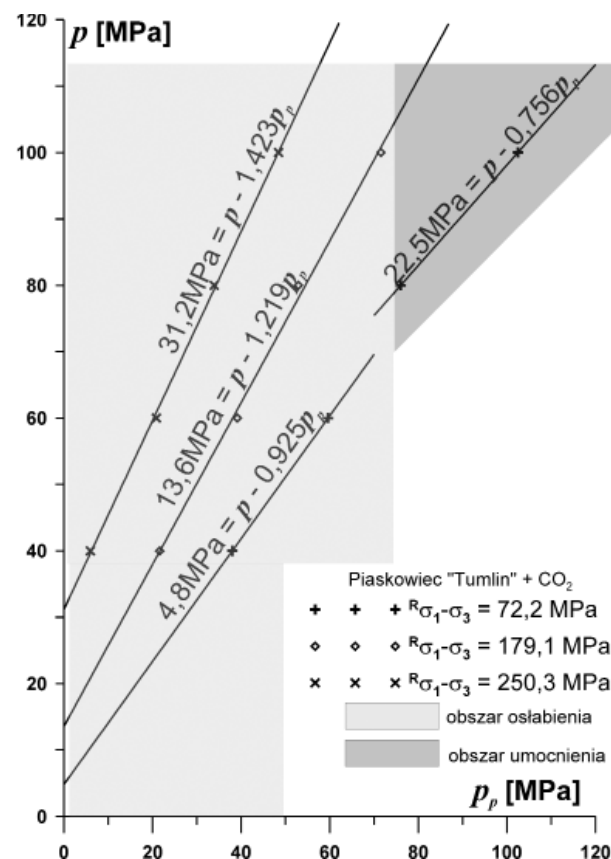
Pokazane na rys. 7 i 8 wyniki dowodzą, że jeżeli dla danej wartości różnicowej granicy wytrzymałości ze wzrostem ciśnienia następuje umocnienie skały to prawo ciśnienia efektywnego w postaci (12) zmienia się w taki sposób, że wartość współczynnika η maleje natomiast wielkość wartości ciśnienia efektywnego p' rośnie. Oznacza to, że umocnieniu skały towarzyszy wzrost znaczenia ciśnienia okólnego i spadek znaczenia ciśnienia porowego. Więcej o tym zjawisku napisano niżej, w rozdz. 5.

Piaskowiec „Tumlin” nasączony dwutlenkiem węgla

Uzyskane dla tego przypadku wyniki badań laboratoryjnych pokazuje rys. 9, na którym linie stałej różnicy ciśnień wykreślono (jak poprzednio) dla $p - p_p$ równych 0 MPa, 20 MPa i 40 MPa, a linie $^R\sigma_1 - \sigma_3 = \text{const.}$ dla $^R\sigma_1 - \sigma_3$ równych 72,2 MPa, 179,1 MPa i 230,3 MPa. Zależność między ciśnieniem porowym a różnicową granicą wytrzymałości przy ciśnieniu okólnym jako parametrze pokazano na rys. 9, a wyznaczone prawa ciśnienia efektywnego na rys. 10.



Rys. 9. Różnicowa granica wytrzymałości jako funkcja ciśnienia porowego przy ciśnieniu okólnym jako parametrze – strefy osłabienia i umocnienia; piaskowiec „Tumlin” nasączony dwutlenkiem węgla

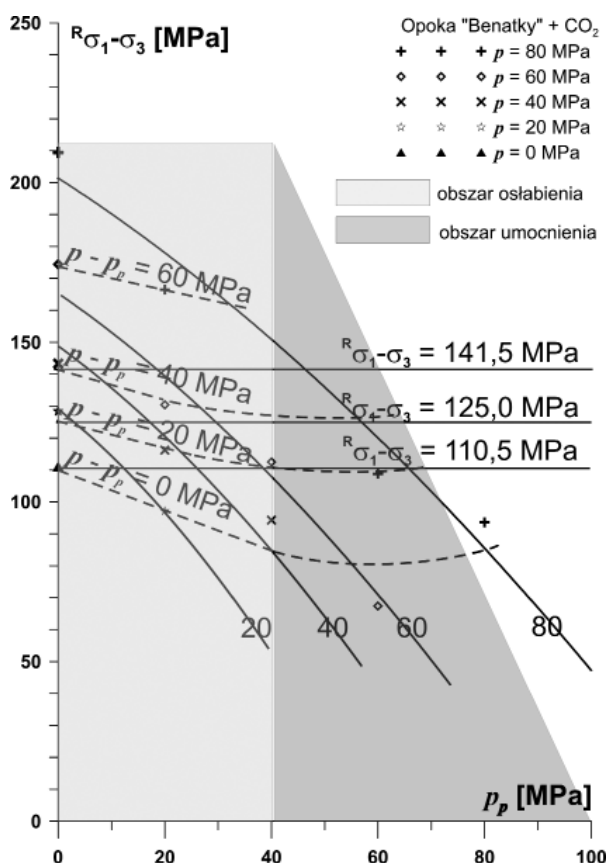


Rys. 10. Prawa ciśnienia efektywnego – strefy osłabienia i umocnienia; piaskowiec „Tumlin” nasączony dwutlenkiem węgla

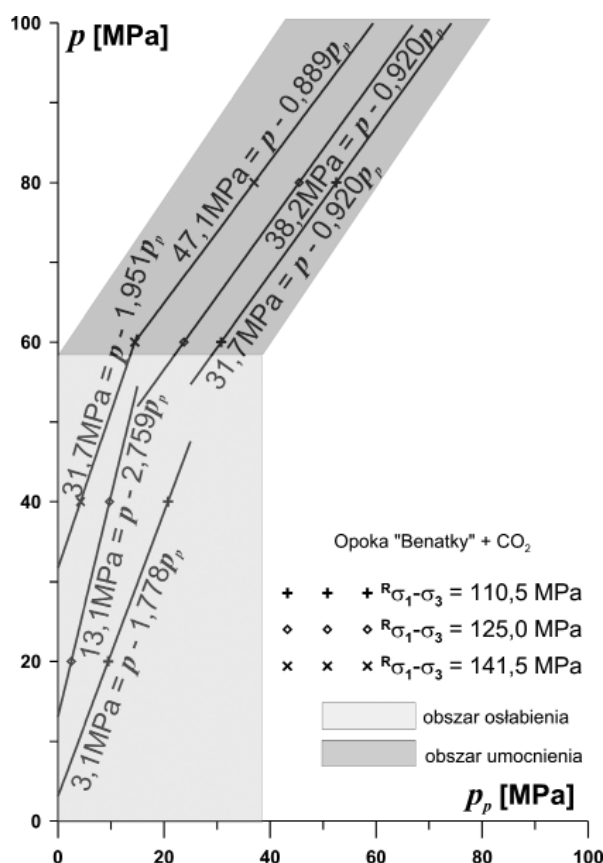
W pokazanych wyżej wynikach zwracają uwagę dwa fakty: pierwszy, że zamiana N₂ na CO₂ spowodowała znaczną redukcję obszaru umocnienia i drugi, że w sformułowanych dla obszaru osłabienia równaniach ciśnienia efektywnego współczynnik η zaczyna przyjmować wartości większe od 1,000. Wydaje się, że przyczyną są tutaj zachodzące na granicy między skałą a płynem porowym zjawiska fizykochemiczne, o których mowa będzie w dalszej części niniejszego opracowania.

Opoka „Benátky” nasączona dwutlenkiem węgla

Ostatnim analizowanym przypadkiem były wyniki uzyskane dla próbek wykonanych z opoki pochodzącej z miejscowości Benátky k. Litomyšľa w Republice Czeskiej. Odpowiednią zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze przedstawiono na rys. 11. Na rysunku tym wyróżniono linie $p - p_p = \{0 \text{ MPa}, 20 \text{ MPa}, 40 \text{ MPa}, 60 \text{ MPa}\}$ oraz $^R\sigma_1 - \sigma_3 = \{110,5 \text{ MPa}, 125,0 \text{ MPa}, 141,5 \text{ MPa}\}$. Analogicznie jak we wcześniej analizowanych przypadkach wyróżnione wartości różnicowej granicy wytrzymałości odpowiadają rzędnym punktów przecięcia linii $p - p_p = \text{const.}$ z osią $^R\sigma_1 - \sigma_3$. Prawo ciśnienia efektywnego wyznaczano dla wymienionych powyżej wartości różnicowej granicy wytrzymałości, a wyniki tego wyznaczania pokazano na rys. 12.



Rys. 11. Różnicowa granica wytrzymałości jako funkcja ciśnienia porowego przy ciśnieniu okólnym jako parametrze – strefy osłabienia i umocnienia; opoka „Benatky” nasączona dwutlenkiem węgla



Rys. 12. Prawa ciśnienia efektywnego – strefy osłabienia i umocnienia; opoka „Benatky” nasączona dwutlenkiem węgla

Wyniki uzyskane dla opoki nasączonej CO₂ są jakościowo podobne do wyników otrzymanych dla piaskowca nasączonego tym samym gazem. Natomiast w sensie ilościowym różnice są dość znaczące.

Przede wszystkim zwraca uwagę fakt, iż proporcje między obszarami osłabienia i umocnienia są dla opoki inne niż dla piaskowca. Porównanie rysunków 9 i 11 pokazuje, że w przypadku piaskowca osłabienie wyraźnie dominuje nad umocnieniem, podczas gdy w przypadku opoki oba te procesy wydają się mieć w miarę równorzędne znaczenie.

Drugie spostrzeżenie dotyczy wartości współczynnika η w strefie osłabienia. Wartości te – identycznie jak w przypadku piaskowca „Tumlin” – spełniają warunek $\eta > 1$, ale są one znacznie większe niż dla piaskowca, przy czym zarówno dla wartości minimalnej jak i maksymalnej różnica ta wynosi blisko 100%. Najprawdopodobniej jest ona konsekwencją różnic w składzie chemicznym obu badanych skał.

5. Interpretacja wyników badań

Interpretacja przedstawionych powyżej wyników badań obejmuje poszukiwanie odpowiedzi na następujące pytania:

1. Jakie są przyczyny obserwowanego osłabienia bądź umocnienia materiału?
2. Jaki jest wpływ procesów osłabienia bądź umocnienia materiału na postać prawa ciśnienia efektywnego?
3. Jak wyjaśnić pewne wątpliwości dotyczące interpretacji uzyskanych wyników badań?

5.1. Mechanizm fizyczny osłabienia bądź umocnienia skały

Istnieje uzasadnione przypuszczenie, że zaobserwowany dla stałych wartości różnicy ciśnień okólnego i porowego ($p - p_p = \text{const.}$) spadek wartości różnicowej granicy wytrzymałości skały $R\sigma_1 - \sigma_3$ wiązać należy

z zachodzącymi na granicy skały i płynu porowego procesami fizykochemicznymi. Gustkiewicz (1990) najpierw wspominał o tym w kontekście wyników pokazanych przez Murella (1965) a następnie rozwinął tę ideę pokazując własne wyniki badań (por. Gustkiewicz i in., 2004). Chodzi konkretnie o tzw. efekt Rebintera (Rehbinder i Lichtman, 1957), który polega na zmniejszeniu się gęstości energii powierzchniowej a co za tym idzie spadku sił napięcia powierzchniowego na brzegu fazy stałej (w tym przypadku skały) w wyniku adsorpcji substancji powierzchniowo czynnej (gazu porowego), co pociąga za sobą spadek wytrzymałości skały. Spadek ten jest tym większy, im wyższa jest ilość zasorbowanego gazu. Ponieważ ilość ta rośnie ze wzrostem ciśnienia porowego więc spadek wytrzymałości jest tym większy im wyższa jest wartość ciśnienia p_p i to pomimo faktu, że różnica $p - p_p$ pozostaje stała. Zauważmy, że jeżeli między skałą a płynem porowym nie zachodzą żadne oddziaływania fizykochemiczne to wspomniane osłabienie nie powinno zachodzić a równanie ciśnienia efektywnego powinno być wspomnianym wyżej (rozd. 4) równaniem konwencjonalnego okólnego ciśnienia efektywnego.

Pokazane wyżej umocnienie materiału wydaje się mieć – w przeciwieństwie do osłabienia – charakter czysto mechaniczny i związane jest ze zjawiskami zachodzącymi w próbce podczas jej niszczenia. Jakkolwiek podczas wykonywania omawianych tutaj testów obowiązuje zdefiniowany wyżej warunek stałości ciśnień okólnego i porowego (2) to jednak procesy zachodzące w materiale, gdy naprężenia zbliżają się bądź osiągają granicę wytrzymałości powodują, że warunek (2) może nie zostać w tym stanie naprężenia dotrzymany. Rzecz w tym, że gdy naprężenia w próbce zbliżają się do granicy wytrzymałości rozpoczyna się w niej szybki wzrost liczby spekań. W konsekwencji następuje znaczący przyrost objętości przestrzeni porowej, który może skutkować spadkiem wartości ciśnienia porowego. Dalej wszystko zależy od możliwości filtracyjnych nowo utworzonego układu próbka – płyn porowy. Jeśli filtracja płynu porowego jest na tyle szybka, że pozwala utrzymać stałą wartość różnicy $p - p_p$ to wartość różnicowej granicy wytrzymałości powinna utrzymywać się na stałym poziomie. Przy filtracji zbyt wolnej rzeczywista wartość wspomnianej różnicy rośnie, co pociąga za sobą wzrost wartości $^R\sigma_1 - \sigma_3$. Taki wzrost wartości wytrzymałości różnicowej granicy wytrzymałości wywołany spadkiem ciśnienia porowego został nazwany umocnieniem dylatacyjnym. Interesujące uwagi na ten temat znaleźć można w pracy Gustkiewicza (1990).

5.2. Wpływ osłabienia bądź umocnienia materiału na postać prawa ciśnienia efektywnego

W omawianych powyżej przypadkach analizowane prawo ciśnienia efektywnego jest liniową funkcją ciśnień okólnego p i porowego p_p postaci (12). Funkcja ta posiada dwa parametry: współczynnik kierunkowy η przy zmiennej p_p oraz wyraz wolny p' będący tzw. wartością ciśnienia efektywnego (zgodnie z definicjami podanymi wyżej w końcowej części rozdz. 2). Poniżej, w tab. 2-5 zestawiono wartości tych parametrów odpowiadające eksperymentom pokazanym na rys. 3-12.

Analiza w tab. 2-5 wartości wskazuje, że dla danej wartości różnicowej granicy wytrzymałości $^R\sigma_1 - \sigma_3$ można zaobserwować pewne prawidłowości, zgodnie z którymi zmieniają się wartości parametrów η i p' . I tak:

- w obszarze osłabienia materiału wartości współczynnika η są znacznie wyższe niż w obszarze umocnienia,
- w obszarze osłabienia materiału wartości ciśnienia efektywnego p' są znacznie niższe niż w obszarze umocnienia.

Tab. 2. Piaskowiec „Tumlin” nasączony naftą

$^R\sigma_1 - \sigma_3$ [MPa]	p' [MPa]		η []
	60,9	-6,0	
	187,5	19,3	1,057
	265,3	42,4	0,966
	318,8	58,2	0,942

Tab. 3. Piaskowiec „Tumlin” nasączony azotem

$^R\sigma_1 - \sigma_3$ [MPa]	strefa osłabienia		strefa umocnienia	
	p' [MPa]	η []	p' [MPa]	η []
	56,0	0,5	14,4	0,728
	210,1	18,4	35,5	0,863
	275,4	40,5	1,130	brak

Tab. 4. Piaskowiec „Tumlin” nasączony dwutlenkiem węgla

	$R_{\sigma_1-\sigma_3}$ [MPa]	strefa osłabienia		strefa umocnienia	
		p'	η	p'	η
		[MPa]	[]	[MPa]	[]
	56,0	0,5	0,989	14,4	0,728
	210,1	18,4	1,149	35,5	0,863
	275,4	40,5	1,130	brak	

Tab. 5. Opoka „Benatki” nasączona dwutlenkiem węgla

	$R_{\sigma_1-\sigma_3}$ [MPa]	strefa osłabienia		strefa umocnienia	
		p'	η	p'	η
		[MPa]	[]	[MPa]	[]
	110,5	3,1	1,778	31,7	0,920
	125,0	13,1	2,759	38,2	0,920
	141,5	31,7	1,951	41,7	0,889

Jeżeli przyjąć – jak to już sugerował Nowakowski (2007) – że współczynnik η pełni w równaniu (12) funkcję pewnej „wagi”, która określa jak duży jest wpływ wartości ciśnienia porowego na ostateczną wartość ciśnienia efektywnego, to od razu widać, że umocnieniu materiału towarzyszy znaczący spadek jego wartości, czyli spadek znaczenia obecności płynu porowego dla wartości różnicowej granicy wytrzymałości.

Odwrotny proces ma miejsce w przypadku wartości ciśnienia okólnego p' . Z chwilą, gdy dochodzi do umocnienia materiału wartość ta wzrasta. W świetle sformułowanych powyżej (rozdz. 2) definicji wielkości efektywnych jest to dość oczywiste, bowiem powszechnie wiadomo, iż wartość granicy wytrzymałości skały rośnie wraz ze wzrostem efektywnego ciśnienia okólnego.

Odrębnego skomentowania wymagają wyznaczone przez autorów wartości współczynników η . Informacje zawarte w tab. 3 i 4 pokazują, że dla jednej skały (w tym przypadku piaskowca „Tumlin”) o wartości η decyduje aktywność fizykochemiczna gazu. Im wyższa jest ta aktywność tym wyższe są wartości współczynnika η . Z kolei porównanie wartości zawartych w tab. 4 i 5 dowodzi, że liczy się nie tylko sorbat (którym w obu przypadkach jest CO_2) ale także sorbent. Niewątpliwie duża zawartość wapienia w opoce przesądza o oddziaływaniu tej skały z dwutlenkiem węgla znacznie silniejszym niż ma to miejsce w przypadku piaskowca, którego podstawowym składnikiem jest kwarc.

5.3. Wątpliwości interpretacyjne

Przedstawiona w pkt. 5.1 i 5.2 interpretacja zachodzących w skale zjawisk fizycznych choć wewnętrznie spójna, może jednak – w świetle przedstawionych powyżej wyników badań – budzić pewne wątpliwości. Otóż, skoro zarówno nafta jak i azot powinny być fizykochemicznie obojętne wobec piaskowca, to skąd tak duża różnica jakościowa w wynikach uzyskanych dla piaskowca nasączonego naftą (Rys. 3) oraz nasączonego azotem (Rys. 5)? Dlaczego prawo ciśnienia efektywnego dla piaskowca nasączonego fizykochemicznie obojętną cieczą (naftą) jest w całym zakresie stosowanych ciśnień okólnych i porowych prawem konwencjonalnego ciśnienia efektywnego typu Terzagiego, podczas gdy w zachowaniach piaskowca nasączonego fizykochemicznie obojętnym gazem (azotem) obserwujemy zarówno strefy osłabienia (jak przy efektach sorpcyjnych), jak i strefy umocnienia dylatacyjnego? Dlaczego wreszcie Gustkiewicz i in. (2003) przedstawione na rys. 5 wyniki dla piaskowca „Tumlin” nasączonego azotem zinterpretowali w taki sposób, że otrzymali prawo ciśnienia efektywnego w postaci (13)?

Zacznijmy od problemów interpretacyjnych wyników badań piaskowca „Tumlin” nasączonego azotem. Według stanu wiedzy, którym dysponował w 2003 r. zespół prof. Gustkiewicza (autor niniejszej pracy był wówczas członkiem tego zespołu), jeżeli płyn porowy (obojętne, ciecz lub gaz) był płynem fizykochemicznie obojętnym, to równanie ciśnienia efektywnego miało postać (13). Istniała wówczas tendencja, aby wyniki badań nie pasujące do tej hipotezy traktować jako konsekwencje niejednorodności badanego materiału (por. Gustkiewicz i in., 2003). Tymczasem autor trzy lata później, pracując już samodzielnie, powtórzył badania dla piaskowca „Tumlin” nasączonego azotem i otrzymał wyniki wskazujące na możliwość pojawienia się w takiej sytuacji efektu osłabienia. Za przyczynę tego efektu uznano zanieczyszczenie użytego w eksperymencie azotu parą wodną. Za przyjęciem takiej interpretacji przemawiał także fakt, że wspomniany piaskowiec zawiera domieszki materiałów ilastych, które z wodą reagują bardzo silnie (szczegóły patrz: Nowakowski i in., 2006). Stąd decyzja o reinterpretacji wyników z 2003 r. w sposób pokazany na rys. 5.

Znacznie trudniej wyjaśnić dlaczego w przypadku piaskowca nasączonego gazem (gazem) pojawia się efekt umocnienia dylatacyjnego, którego raczej można by oczekiwać dla skały nasączonej cieczą (naftą). Na chwilę obecną jedynym wytłumaczeniem jest zjawisko opisane przez Brace’a & Martina (1968), którzy pokazali w swojej pracy, że dla danej skały istnieje krytyczna prędkość deformacji, której przekroczeniu

towarzyszy pojawienie się umocnienia dylatacyjnego. Ponieważ w 2003 r. zespół badawczy nie dysponował jeszcze układem stabilizującym prędkość deformacji próbki podczas eksperymentu trójosiowego ściskania można zatem przyjąć, że eksperymenty dla próbek piaskowca nasączonych naftą wykonano z prędkością niższą niż owa prędkość krytyczna.

Praca została wykonana w roku 2015 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Biot M.A., 1941: *General Theory of Three-Dimensional Consolidation*. J. Appl. Phys., Vol. 12, pp. 155-164.
- 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.
- Brace W.F., Martin R.J., 1968: *A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity*. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 5, 415-426.
- Czapliński A., Gustkiewicz J., 1990: *Sorpcyjne naprężenia i odkształcenia w węglu*. W: „Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe. Tom II”, praca zbiorowa, J. Litwiniszyn (red.), Wyd. AGH, Kraków, str. 455-468
- 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., Orengo Y., 1991: *Zmiany zachowania węgla pod działaniem wody*. W: „Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe. Tom III Supplement”, praca zbiorowa, J. Litwiniszyn (red.), Wyd. AGH, Kraków, str. 763-781.
- Gustkiewicz J., Nowakowski A., Lizak Z., 2003: *Zmiany niektórych właściwości piaskowca pod wpływem sorbujących i niesorbujących płynów porowych pod ciśnieniem*. Prace IMG PAN, t. 5, nr 3-4, str.367-375.
- 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.
- Handin J., Hager R.V., Friedman M., Feather J.N., 1963: *Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: pore pressure tests*. Bull. Am. Assoc. Petr. Geol., Vol. 47, pp. 717-755.
- Handin J., Hager R.V., Friedman M., Feather J.N., 1963: *Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: pore pressure tests*. Bull. Am. Assoc. Petr. Geol., Vol. 47, pp. 717-755.
- 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.
- 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., 2006: *Różne postacie równania ciśnienia efektywnego uzyskane podczas badań laboratoryjnych piaskowca „Tumlin”*. Prace IMG PAN, t. 8, nr 1-4, s. 193-201.
- Nowakowski A., 2007: *On certain determinantal 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.
- Nur A., Byerlee J.D., 1971: *An Exact Effective Stress Law for Elastic Deformation of Rock with Fluids*. J. Geophys. Res., Vol. 76, No. 26, pp. 6414-6419.
- Rehbinder P., Lichtman V., 1957: *Effect of surface active media on strains and rupture in soils*. In: "Electrical Phenomena and Soil/Liquid Interface", J.H. Schulman (ed.), Proc. 2nd Int. Congr. Surface Activity, Vol. III, London, Butterworths, 563-582.
- Robin P.-Y.F., 1973: *Note on effective pressure*. J. Geophys. Res., 78, 2434-2437.

The impact of some physical and physico-chemical effects on the values of some parameters of the effective pressure law

Abstract

Some series of triaxial compression tests/individual tests were made on specimens cut from different types of rocks. Form of an effective pressure law for rock samples where the stress reached differential strength limit was determined. It was shown, that, for this state of stress, form of an effective pressure law strongly depends on the two opposing processes: the weakening of the specimen – arising from occurring in the rock physico-chemical processes (sorption, the Rebinder effect) and mechanical strengthening of the sample, the so-called dilatant strengthening – which is a consequence of the rapid drop of the pore pressure due to the volume increase of the pore space that occurs during the destruction of the specimen.

Keywords: triaxial compression, differential strength limit, the effective pressure law, sorption, Rebinder effect, dilatant strengthening