

Różne sposoby kształtowania się ciśnienia efektywnego w skale znajdującej się na granicy wytrzymałości

ANDRZEJ NOWAKOWSKI

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

Streszczenie

Artykuł zawiera wyniki badań nad kształtowaniem się ciśnienia efektywnego w skale, w której naprężenia osiągnęły granicę wytrzymałości. Studiowano wyniki eksperymentów klasycznego trójosiowego ściskania z płynem porowym pod ciśnieniem wykonanych dla dwóch: piaskowca „Tumlin” i opoki „Benatki”. Stosowano sorbujące (CO_2 i H_2O) i niesorbujące (nafta, azot) płyny porowe. Prace te były kontynuacją badań prowadzonych w latach 2003 i 2004.

Badania próbek opoki nasączonych CO_2 potwierdziły wyrażane już przypuszczenia (Gustkiewicz i in., 2004), że równanie ciśnienia efektywnego może być nieliniowa funkcją ciśnienia porowego. Z kolei wyniki testów piaskowca nasączonego H_2O pozwoliły zweryfikować dotychczasowe poglądy (Gustkiewicz i in., 2003, 2004) na temat wpływu wody pod ciśnieniem, jako płynu porowy, wywierania na właściwości skały.

Słowa kluczowe: trójosiowe ściskanie, różnicowa granica wytrzymałości, ciśnienie okólne, ciśnienie porowe, ciśnienie efektywne, równanie ciśnienia efektywnego, wartość ciśnienia efektywnego

1. Wstęp

Badania wpływu, jaki na właściwości fizyczne skały wywiera obecność w jej porach płynu (tj. cieczy lub gazu) pod ciśnieniem rozpoczęto w Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN przeszło 25 lat temu¹. Pomimo wielu lat pracy i bardzo wielu wykonanych eksperymentów temat ten pozostaje nadal naukowo nośnym i atrakcyjnym, a uzyskiwane wyniki znacząco wzbogacają dostępny zasób wiedzy o skale jako materiale wielofazowym. Ostatnie badania, prowadzone w latach 2003 i 2004, koncentrowały się na poszukiwaniu różnic w sposobie oddziaływania na właściwości mechaniczne skały niesorbujących (azot, nafta) i sorbujących (dwutlenek węgla, woda destylowana) płynów porowych pod ciśnieniem. Ich wyniki, zawarte w pracach Gustkiewicza i in. (2003, 2004), znacząco poszerzyły i pogłębiły zasób wiedzy badaczy w zakresie wpływu efektów sorpcyjnych na właściwości mechaniczne skał.

Prace, których wyniki prezentuje niniejszy artykuł, były kontynuacją badań z lat 2003 i 2004. Ich podstawowym celem była próba udzielenia odpowiedzi na pewne pytania i wątpliwości, które sformułowane przez Gustkiewicza i in. (2004) oraz Gustkiewicza i Nowakowskiego (2005). W szczególności zajęto się zależnością matematycznej postaci związków opisujących ciśnienie efektywne w próce skalnej, która osiągnęła granicę wytrzymałości od rodzaju płynu porowego oraz wpływem, jaki wywiera na właściwości mechaniczne skały woda pod ciśnieniem jako płyn porowy.

2. Funkcja ciśnienia efektywnego i wartość ciśnienia efektywnego

Przedmiotem zawartych w niniejszej pracy rozważań są zjawiska zachodzące w walcowej próbce skalnej obciążonej ciśnieniem okólnym (σ_3) oraz ciśnieniem porowym (q), poddanej działaniu osiowego

¹ Patrz: opis badań prowadzonych w Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN zawarty w pracy Gustkiewicza i Nowakowskiego (2004).

naprężenia różnicowego ($\sigma_1 - \sigma_3$). Z warunków eksperymentu wynika, że ciśnienia σ_3 i q muszą spełniać następujący warunek² (por. Gustkiewicz i in., 2004):

$$\sigma_3 - q \geq 0 \quad (1)$$

Dla tak obciążonej próbki rozważamy dowolną właściwość skały Q , która również jest funkcją ciśnień σ_3 i q . Funkcja ta tworzy w przestrzeni zmiennych (Q, σ_3, q) pewną powierzchnię. Na powierzchni tej wyróżnimy krzywą spełniającą równanie:

$$Q(\sigma_3, q) = \text{const} \quad (2)$$

czyli linię, wzdłuż której interesująca nas właściwość Q ma wartość stałą. Jeżeli teraz dokonamy rzutowania krzywej danej równaniem (2) na płaszczyznę (σ_3, q) to otrzymamy na tej płaszczyźnie związek typu:

$$f(\sigma_3, q) = 0 \quad (3)$$

Związek ten, definiujący zbiór par punktów σ_3 i q , dla których analizowana właściwość Q ma wartość stałą, nazywać będziemy **równaniem ciśnienia efektywnego**³. Jeżeli teraz dokonamy w funkcji (3) podstawienia:

$$q = 0 \quad (4)$$

to otrzymamy:

$$f(\sigma_3, 0) = \sigma_3 = \text{const} \quad (5)$$

Ciśnienie σ_3 jest **wartością ciśnienia efektywnego** dla równania ciśnienia efektywnego (3) i właściwości skały Q spełniającej warunek (2). W konsekwencji dla tak znalezionej wartości σ_3 spełnione jest:

$$Q(\sigma_3, 0) = Q(\sigma_3) = Q = \text{const} \quad (6)$$

Tak zdefiniowana wartość ciśnienia efektywnego może być traktowana jako pewna stała materiałowa, a konkretnie jako pewne zastępcze ciśnienie okólne, które – zastosowane dla $q = 0$ – wywiera na badaną właściwość Q taki sam wpływ jak para niezerowych ciśnień σ_3 i q spełniających równanie (3).

Więcej informacji na temat zależności między właściwościami mechanicznymi materiału a ciśnieniami okólnym i porowym znaleźć można np. w pracach Nura i Byerlee (1971), Brace'a (1972) czy Robina (1973). Z ich rozważań wynika, że postać równania ciśnienia efektywnego (3) zależy będzie m.in. od:

- właściwości przestrzeni porowej skały,
- analizowanej właściwości Q ,
- stanu naprężenia w skale.

W praktyce znalezienie dla skał postaci tego równania wymaga zazwyczaj wykonania trudnych i żmudnych badań laboratoryjnych, których wyniki niekoniecznie prowadzą do jednoznacznych wniosków. Przykłady znajdzie czytelnik w dalszej części niniejszej pracy.

3. Przykłady równań ciśnienia efektywnego

Pierwsze konkretne wzory opisujące zależności między ciśnieniami okólnym i porowym biorą swój początek rozważań nad związkami między właściwościami podłoża gruntowego a głębokością posadowienia budowli i ciśnieniem płynu wypełniającego pory gruntu. Z tych właśnie rozważań wzięła się propozycja Karla von Terzaghi (Terzaghi, 1923) aby wprowadzić równanie ciśnienia efektywnego postaci:

$$\sigma_3' = \sigma_3 - q \quad (7)$$

Tak zdefiniowane ciśnienie efektywne nazwano później **konwencjonalnym ciśnieniem efektywnym**.

² Wszystkie rozważania prowadzone są przy założeniu, że ścisłaniu odpowiada znak „plus” a znak „minus” oznacza rozciąganie.

³ W języku angielskim stosowany jest termin: *effective pressure law* (por. Robin, 1973).

Wzór (7) został następnie zmodyfikowany i w mechanice gruntów od lat przyjmuje się (za takimi autorami jak np. Geertsma (1957) czy Skempton (1960)), że ma on postać:

$$\sigma_3 = \sigma_3 - \alpha q \quad \wedge \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (8)$$

Przyjmując za punkt wyjścia równania opracowanej przez Biota (Biot, 1941) dla gruntów teorii konsolidacji Nura i Byerlee (1971) przeanalizowali związki opisujące zmianę objętości gruntu oraz zmianę objętości jego porów. Przyjmując, że K – to moduł ściśliwości objętościowej gruntu, K_s – moduł ściśliwości jego szkieletu a n – jego porowatość, otrzymali oni następujące wzory na wartość współczynnika α :

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \quad (9)$$

gdy przedmiotem analizy jest zmiana objętości gruntu, oraz

$$\alpha = 1 - \frac{nK}{K_s - K} \quad (10)$$

gdy przedmiotem analizy jest zmiana objętości porów w gruncie. Warto w tym momencie dodać, że równania teorii konsolidacji Biota są w istocie odpowiednio zmodyfikowanymi równaniami Hooke'a (por. np. Gustkiewicz, 1989) a zatem można uznać, że związki (8) i (9) oraz (8) i (10) są równaniami ciśnienia efektywnego dla odpowiednio: zmiany objętości gruntu oraz zmiany objętości porów w gruncie w zakresie stosowalności prawa Hooke'a do opisu właściwości danego gruntu. Więcej informacji na temat możliwości dawanych przez opis Biota znajdzie czytelnik we wspomnianych już pracach Nura i Byerlee (1971) oraz Gustkiewicza (1989).

Powyższe rozważania dotyczą ośrodka gruntowego. Okazuje się jednak, że przy spełnieniu pewnych warunków rozważania te mogą zachować ważność również dla skał. Warunki takie podali np. Handin i in. (1963), w formie następującej:

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

Jeżeli warunki a) ÷ c) są spełnione to związek typu (7) może być uznany dla skały za równanie konwencjonalnego ciśnienia efektywnego.

Zwróćmy uwagę, że warunki b) i c) są ściśle związane ze strukturą skały oraz kształtem i rozkładem jej porów. W szczególności przestrzeń porowa musi w tym przypadku zapewniać swobodę filtracji płynu porowego. A zatem, biorąc pod uwagę postulaty Lasonia (1988), musielibyśmy mieć do czynienia z rozbudowaną siecią połączonych ze sobą makroporów wypełnionych wolnym płynem porowym. Z kolei patrząc z punktu widzenia teorii Biota niezbędnym by było aby $\alpha \approx 1$ czyli, biorąc pod uwagę (9), aby $K \approx K_s$. Autor nie jest w tej chwili w stanie jednoznacznie odpowiedzieć na pytanie czy istnieje skała, która w zakresie stosowalności prawa Hooke'a spełniałaby oba te warunki równocześnie, choć niektóre wyniki uzyskane przez Gustkiewicza (1989) sugerują taką możliwość.

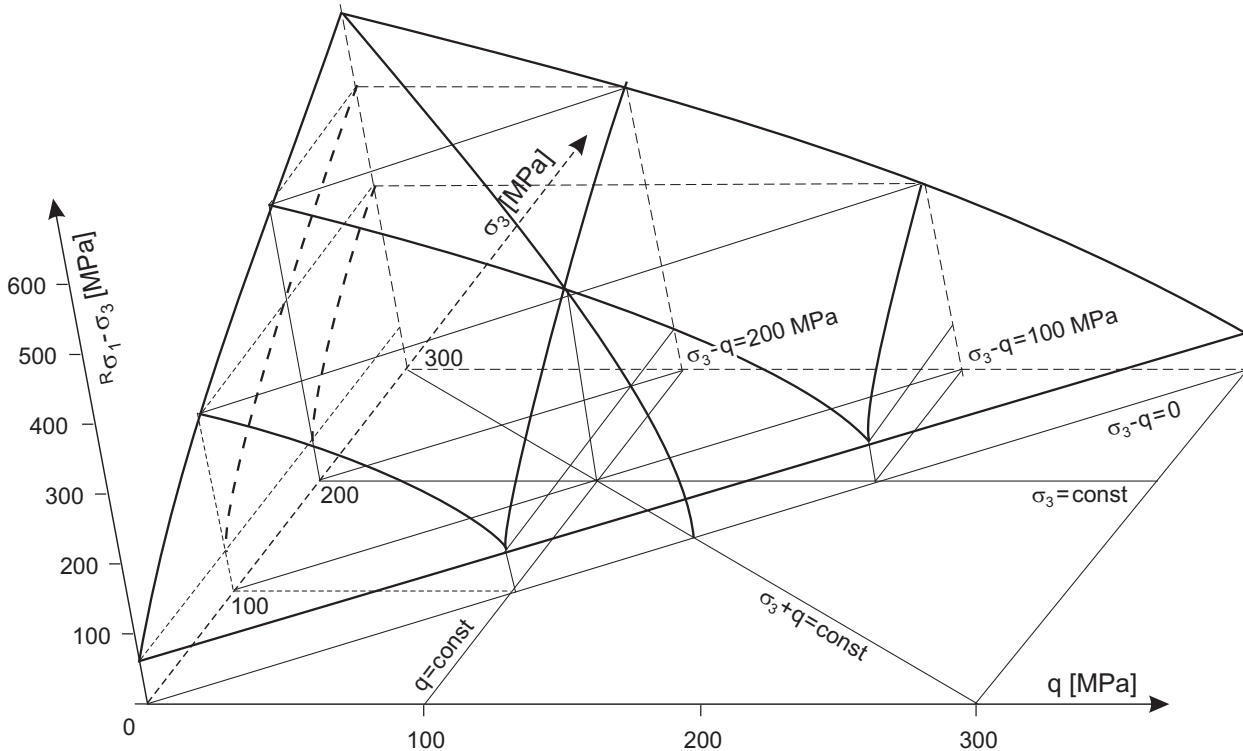
Z drugiej strony spełnienie warunków b) i c) wydaje się nie nastęrczać większych problemów, gdy struktura skały jest zniszczona. Stan ten odpowiada najczęściej sytuacji, gdy skała osiągnęła swoją granicę wytrzymałości. Badania prowadzone w Pracowni Odkształceń Skał nad zachowaniem różnicowej granicy wytrzymałości próbki (${}^R\sigma_1 - \sigma_3$) jako funkcji ciśnień okólnego i porowego dowiodły przydatności koncepcji konwencjonalnego ciśnienia efektywnego do opisu zachodzących wówczas w skale zjawisk a także dostarczyły wielu innych interesujących informacji dotyczących różnych postaci funkcji ciśnienia efektywnego.

4. Różnicowa granica wytrzymałości skały a ciśnienie efektywne

Jak już wspomniano wyżej przedmiotem prowadzonych w Pracowni badań było kształtowanie się ciśnienia efektywnego w nasączonej pozostającym pod ciśnieniem porowym płynem próbce skalnej, która podczas testu klasycznego, trójosiowego ściskania⁴ osiągnęła różnicową granicę wytrzymałości (${}^R\sigma_1 - \sigma_3$).

⁴ Ang. *individual test*; por. Kovári i in. (1983).

W takim przypadku różnicowa granica wytrzymałości jest pewną funkcją ciśnień porowego i okólnego ${}^R\sigma_1 - \sigma_3 = g(q, \sigma_3)$ – a jej obraz graficzny powierzchnią w przestrzeni $({}^R\sigma_1 - \sigma_3, q, \sigma_3)$, czego przykład pokazuje rys. 1.



Rys. 1. Różnicowa granica wytrzymałości jako funkcja ciśnień okólnego i porowego; piaskowiec „Nowa Ruda” nasączony azotem (Gustkiewicz, 1985)

Dalej, zgodnie ze sformułowanymi w rozdz. 2 rozważaniami, związek (2) definiuje na powierzchni ${}^R\sigma_1 - \sigma_3 = g(q, \sigma_3)$ krzywą, wzdłuż której spełnione jest równanie:

$${}^R\sigma_1 - \sigma_3 = \text{const} \quad (11)$$

Rzut tej krzywej na płaszczyznę (q, σ_3) daje poszukiwane równanie ciśnienia efektywnego dla danej wartości różnicowej granicy wytrzymałości. Równanie to przyjmuje dla $q = 0$ wartość $'\sigma_3$, która jest dla tejże wartości ${}^R\sigma_1 - \sigma_3$ wartością ciśnienia efektywnego.

Dotychczasowe badania nad postacią równania (3) dowiodły, że jeżeli płyn porowy jest płynem inertnym to równanie ciśnienia efektywnego w skale na granicy wytrzymałości dane jest wzorem (7), czyli, że jest to przypadek konwencjonalnego ciśnienia efektywnego. Warto podkreślić, że to czy płynem porowym jest ciecz (nafta) czy też gaz (azot) nie miało znaczenia dla postaci funkcji ciśnienia efektywnego. Szczegółowe rozważania na ten temat zawierają przede wszystkim prace Gustkiewicza (1985, 1990), a także Gustkiewicza i in. (2003, 2004, 2005).

Badania prowadzone w Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN w latach 2003 i 2004 wykazały ponad to, że jeśli płynem porowym jest gaz sorbujący (badania prowadzono dla CO_2) to wzór (7) nie ma zastosowania i równanie ciśnienia efektywnego dane jest wzorem typu (8) z tym wszakże zastrzeżeniem, że warunek $0 \leq \alpha \leq 1$ nie jest spełniony. Wręcz przeciwnie, wskutek występowania efektów sorpcyjnych zachodzi $\alpha \geq 1$ (patrz: Gustkiewicz i in., 2004 i Gustkiewicz i Nowakowski, 2005), a wzór (8) przyjmuje postać:

$$' \sigma_3 = \sigma_3 - \alpha q \quad \wedge \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{\sigma_3}{q} \quad (12)$$

Ograniczenie „od góry” na wartość współczynnika α wynika z faktu, że warunki eksperymentu nie pozwalają aby σ_3 przyjmowało wartości ujemne (por. początek rozdz. 2 – wzór (1) i jego uzasadnienie).

Należy w tym miejscu dodać, że wśród wyników badań laboratoryjnych, na podstawie których zaproponowano wzór (12), znalazły się i takie, których analiza sugerowała, że opisujące ciśnienie efektywne równanie (3) może być równaniem nieliniowym z uwagi na ciśnienie okólne lub porowe. Weryfikacja tego spostrzeżenia była jednym z celów badań prowadzonych w roku 2005.

5. Przedmiot badań

Przedmiotem analiz były wyniki uzyskane na podstawie badań dwóch skał: piaskowca z kamieniołomu w Tumlinie w Górach Świętokrzyskich (dalej zwanego piaskowcem „Tumlin”) oraz opoki z miejscowości Benatky k. miasta Litomyšl w Republice Czeskiej, która w dalszej części opracowania nazywana będzie opoką „Benatky”. Opisy petrograficzne tych skał znaleźć można odpowiednio m.in. w pracach Nowakowskiego i in. (2003) i Gustkiewicza i in. (2004). Ponieważ dla rozważań nad ciśnieniem efektywnym objętość i struktura porów w badanych skałach nie są rzeczą obojętną, skały te poddano testom porozymetrycznym, które wykonano w Zakładzie Surowców Energetycznych Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie przy pomocy porozymetru rtęciowego AutoPore II 9220 firmy Micromeritics. Wyniki tych badań dostarczyły informacji o gęstościach (objętościowej – ρ_O i szkieletu – ρ_S) testowanego materiału, oraz o rozkładzie średnic porów. Wyznaczone na porozymetrze gęstości ρ_S i ρ_O wynosiły: dla piaskowca „Tumlin” odpowiednio 2,6401 g/ml i 2,4329 g/ml i dla opoki „Benatky” 2,5854 g/ml i 2,1653 g/ml. Wartości te pozwoliły następnie wyznaczyć, korzystając z powszechnie znanego wzoru, porowatości (n) badanych skał

$$n = \frac{\rho_S - \rho_O}{\rho_S} \quad (13)$$

które wyniosły odpowiednio: dla piaskowca $n_T = 7,85\%$ oraz dla opoki $n_B = 16,25\%$.

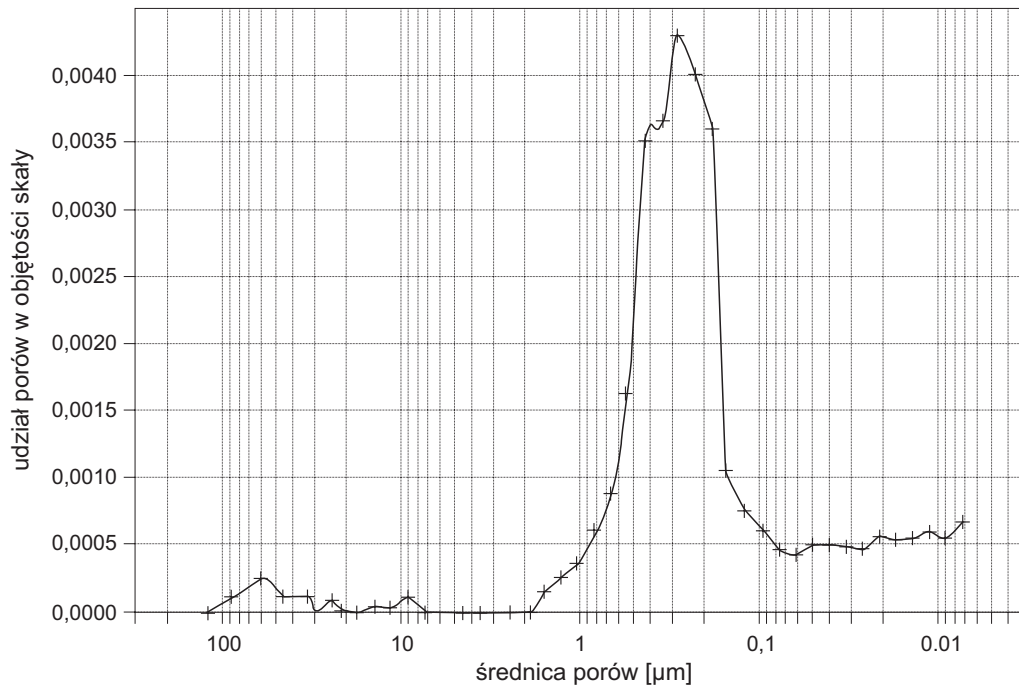
Z punktu widzenia prowadzonych badań interesujące były również wyznaczone dla badanych skał krzywe rozkładu średnicy porów, które pokazano na rys. 2 i 3. Na ich podstawie można stwierdzić, że w badanych skałach dominują pory o następujących średnicach:

- piaskowiec „Tumlin”: pory o średnicy 0,1 – 0,6 μm ,
- opoka „Benatky”: pory o średnicy 0,1 – 1,0 μm .

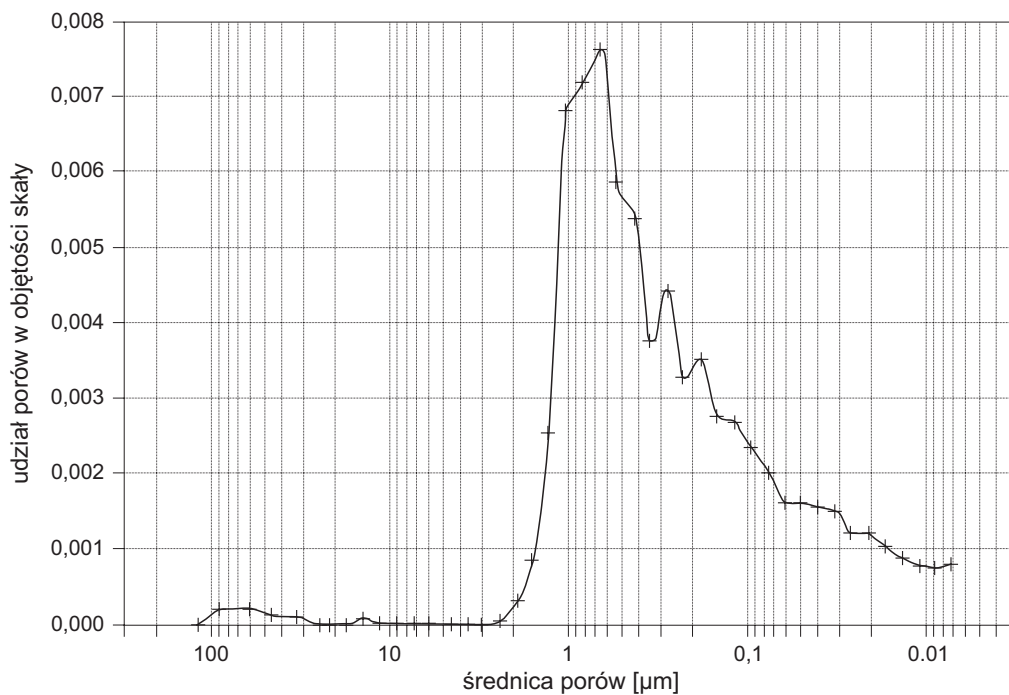
Wynika z tego, że w obu skałach dominują pory o zbliżonych wymiarach. Biorąc pod uwagę klasyfikację porów z uwagi na ich rozmiary zaproponowaną przez Lasonia (1988) należy stwierdzić, że we wszystkich badanych skałach dominują makropory, czyli pory o średnicach większych niż 100 nm (czyli 0,1 μm). Przy takich wymiarach porów dominującym procesem fizykochemicznym zachodzącym na powierzchni porów jest adsorpcja mono- i polimolekularna a w przestrzeni porowej znajduje się płyn wolny.

6. Wyniki badań laboratoryjnych

Punktem wyjścia do badań nad kształtowaniem się ciśnienia efektywnego na granicy wytrzymałości skały były zależności między różnicową granicą wytrzymałości skały a ciśnieniem porowym przy ciśnieniu okólnym jako parametrze. Na odpowiednich krzywych znajdowano punkty o równej wytrzymałości, następnie wyznaczano dla nich odpowiadające wartości ciśnienia okólnego i porowego i na tej podstawie wykreślano na płaszczyźnie (σ_3 , q) zależności pozwalające na wyznaczenie równania i wartości ciśnienia efektywnego. Analizy prowadzono dla sorbujących płynów porowych tj. dwutlenku węgla i wody destylowanej.



Rys. 2. Rozkład średnicy porów dla piaskowca „Tumlin”



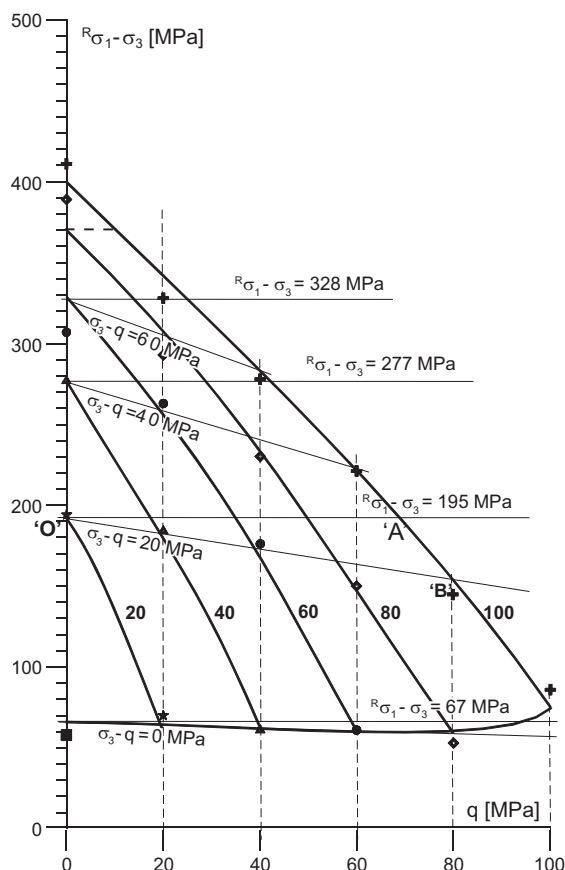
Rys. 3. Rozkład średnicy porów dla opoki „Benatki”

6.1. Wyniki badań skał nasączonych dwutlenkiem węgla

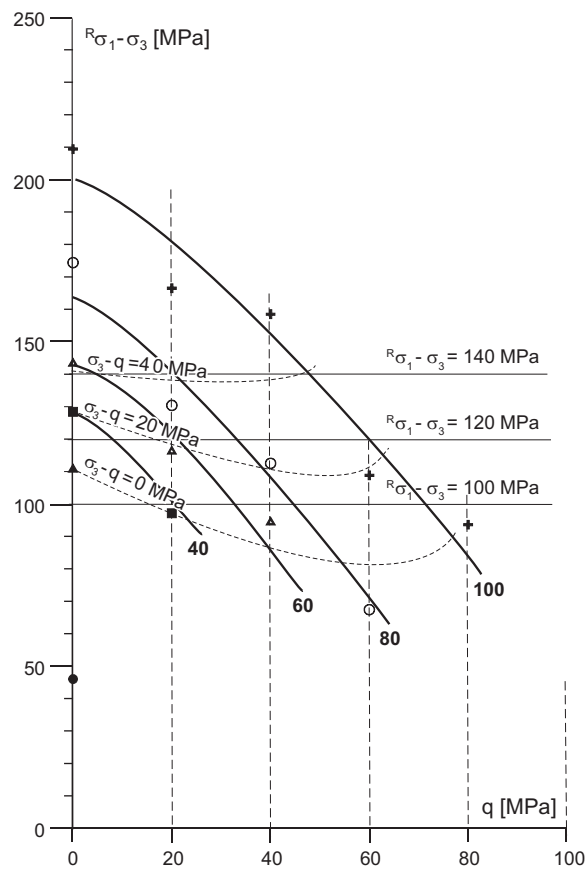
Krzywe zależności między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze pokazano odpowiednio: dla piaskowca „Tumlin” na rys. 4 i dla opoki „Benatki” na rys. 5. Analizując krzywe znajdujące się na tych rysunkach należy zwrócić uwagę na fakt, że linie łączące punkty, spełniają równanie:

$$\sigma_3 - q = \text{const} \quad (14)$$

są dla piaskowca prostymi, natomiast dla opoki mają kształt krzywych. Oznacza to, że w przypadku piaskowca, dla stałej różnicy między ciśnieniem okólnym a porowym, różnicowa granica wytrzymałości maleje ze wzrostem ciśnienia porowego, natomiast dla opoki granica ta początkowo maleje a później zaczyna rosnąć. Dodatkowo w przypadku opoki stwierdzić można, że krzywe spełniające warunek (14) ulegają „spłaszczeniu” ze wzrostem zapisanej tym wzorem różnicy. Ewentualne przyczyny takiego zjawiska zostaną przedyskutowane w dalszej części niniejszej pracy.



Rys. 4. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; piaskowiec „Tumlin” nasączony CO₂.



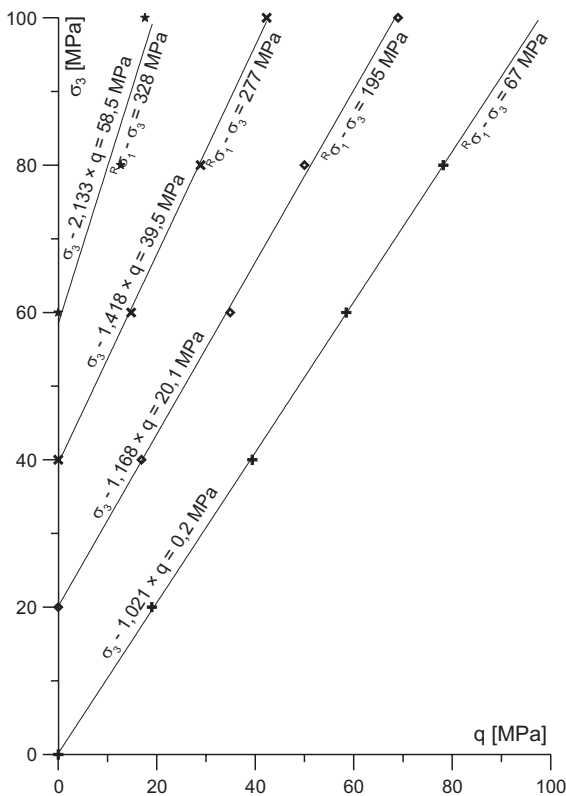
Rys. 5. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; opoka „Benatki” nasączona CO₂.

Równania i wartości ciśnienia efektywnego wyznaczono na podstawie krzywych pokazanych na rys. 4 i 5 z wykorzystaniem procedury opisanej przez Gustkiewicza i in. (2004) oraz Gustkiewicza i Nowakowskiego (2005). Dla piaskowca analizowano kształtowanie się ciśnienia σ_3 wzdłuż czterech linii stałej różnicowej granicy wytrzymałości, dla $R_{\sigma_1-\sigma_3}$ równego 67, 195, 277 i 328 MPa. Dla opoki wspomniane analizy wykonano dla trzech linii, odpowiadających różnicowej granicy wytrzymałości równej 100, 120 i 140 MPa. Wyniki pokazano na rys. 6 i 7.

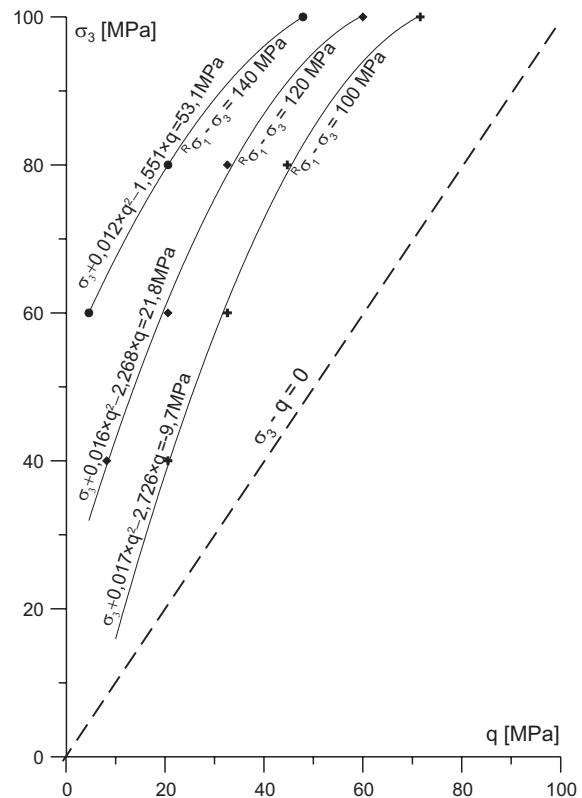
Uzyskane związki opisujące zależności między ciśnieniami okólnym i porowym miały postać następującą:

– dla piaskowca „Tumlin”:

$$\begin{aligned}
 R_{\sigma_1-\sigma_3} = 67 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 - 1,021 \times q = 0,2 \text{ MPa} \\
 R_{\sigma_1-\sigma_3} = 195 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 - 1,168 \times q = 20,1 \text{ MPa} \\
 R_{\sigma_1-\sigma_3} = 277 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 - 1,418 \times q = 39,5 \text{ MPa} \\
 R_{\sigma_1-\sigma_3} = 328 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 - 2,133 \times q = 58,6 \text{ MPa}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$



Rys. 6. Zależność między ciśnieniami okólnym i porowym, dla $R_{\sigma_1-\sigma_3} = 67, 195, 277$ i 328 MPa; piaskowiec „Tumlin” nasączone CO₂



Rys. 7. Zależność między ciśnieniami okólnym i porowym, dla $R_{\sigma_1-\sigma_3} = 100, 120$ i 140 MPa; opoka „Benatky” nasączone CO₂

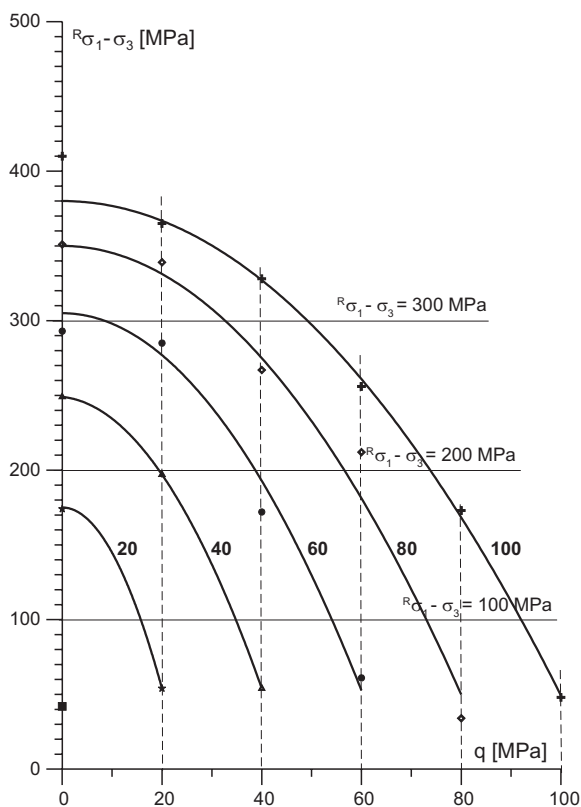
– dla opoki „Benatky”:

$$\begin{aligned}
 R_{\sigma_1-\sigma_3} = 100 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 + 0,017 \times q^2 - 2,726 \times q = -9,7 \text{ MPa} \\
 R_{\sigma_1-\sigma_3} = 120 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 + 0,016 \times q^2 - 2,268 \times q = 21,8 \text{ MPa} \\
 R_{\sigma_1-\sigma_3} = 140 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 + 0,012 \times q^2 - 1,551 \times q = 53,1 \text{ MPa}
 \end{aligned} \tag{16}$$

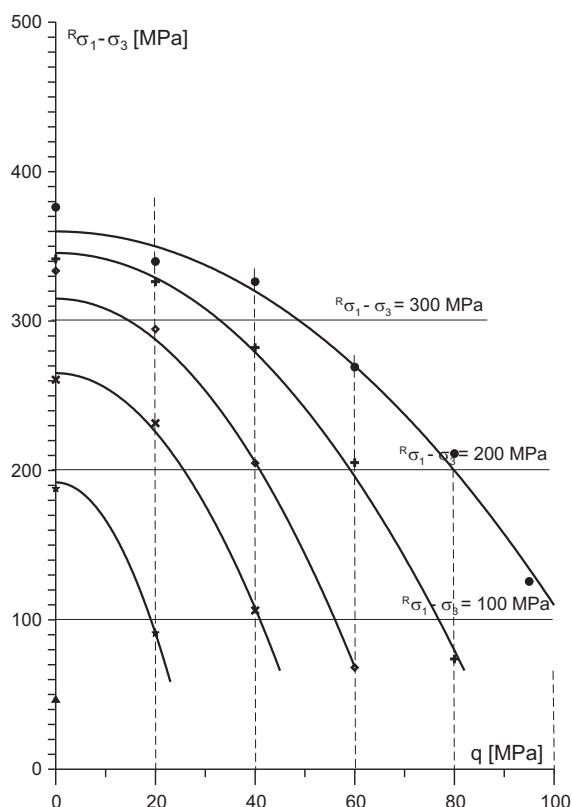
Związki (15) są związkami liniowymi typu (12), natomiast równania (16) mają charakter nieliniowy z uwagi na ciśnienie porowe. Przyjęta w omawianym przypadku postać funkcji aproksymującej (wielomian drugiego stopnia) nie ma żadnego uzasadnienia fizycznego i ma jedynie podkreślać fakt nieliniowości funkcji (3).

6.2. Wyniki badań skał nasączonych wodą destylowaną

Wyniki dotychczasowych badań skał nasączonych wodą nastroczały największych trudności interpretacyjnych. Gustkiewicz i in. (2003) oraz Gustkiewicz i Nowakowski (2005) traktują ten przypadek jako przypadek konwencjonalnego ciśnienia efektywnego wydaje się jednak, że nie jest to jedyna możliwa interpretacja. Poniżej przedstawiono wyniki badań nad postacią równania ciśnienia efektywnego dla dwóch serii próbek piaskowca „Tumlin”. Badania dla pierwszej serii (oznaczonej: piaskowiec „Tumlin 2003”) były już wstępnie omawiane przez Gustkiewicza i in. (2003) oraz Gustkiewicza i Nowakowskiego (2005) natomiast druga seria eksperymentów (oznaczona: piaskowiec „Tumlin 2005”) wykonana została w celu weryfikacji wyników wcześniejszych. Poniżej (rys. 8 i 9) pokazano, uzyskane dla obu serii eksperymentów, krzywe zależności między różnicą granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze.



Rys. 8. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; piaskowiec „Tumlin 2003”, nasączony H₂O



Rys. 9. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; piaskowiec „Tumlin 2005”, nasączony H₂O

Równania ciśnienia efektywnego wyznaczano dla wartości $R_{\sigma_1-\sigma_3}$ równych 100, 200 i 300 MPa (patrz rys. 8 i 9). Uzyskane krzywe pokazano na rys. 10 i 11 przy czym odpowiednie związki między σ_3 i q mają postać:

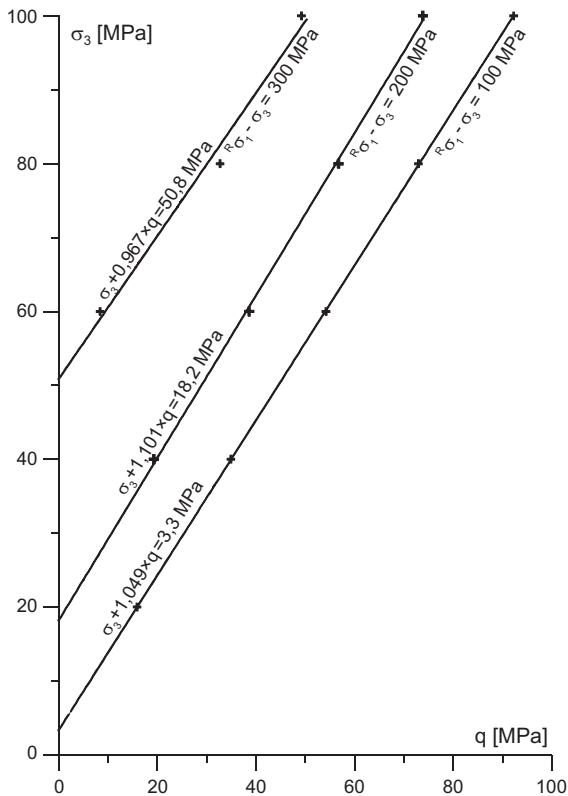
– dla piaskowca „Tumlin 2003”:

$$\begin{aligned} R_{\sigma_1-\sigma_3} = 100 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 - 1,049 \times q = 3,3 \text{ MPa} \\ R_{\sigma_1-\sigma_3} = 200 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 - 1,101 \times q = 18,2 \text{ MPa} \\ R_{\sigma_1-\sigma_3} = 300 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 - 0,967 \times q = 50,8 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (17)$$

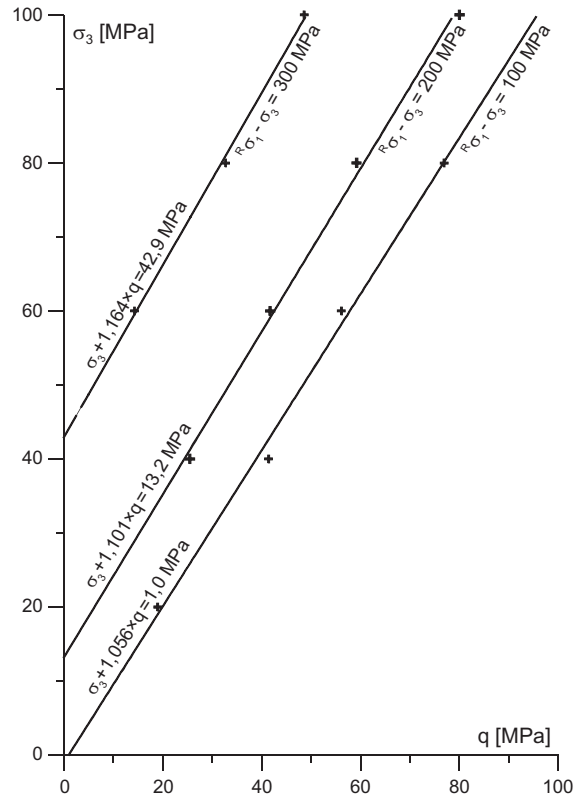
– dla piaskowca „Tumlin 2005”:

$$\begin{aligned} R_{\sigma_1-\sigma_3} = 100 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 - 1,056 \times q = -1,0 \text{ MPa} \\ R_{\sigma_1-\sigma_3} = 200 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 - 1,101 \times q = 13,2 \text{ MPa} \\ R_{\sigma_1-\sigma_3} = 300 \text{ MPa} &\Rightarrow \sigma_3 - 1,164 \times q = 42,9 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (18)$$

Biorąc pod uwagę rozrzut wyników badań wynikający z naturalnej niejednorodności badanego materiału wyniki uzyskane dla obu testowanych serii próbek można uznać za identyczne.



Rys. 10. Zależność między ciśnieniami okólnym i porowym, dla $R\sigma_1 - \sigma_3 = 100, 200$ i 300 MPa; piaskowiec „Tumlin 2003” nasączony H_2O



Rys. 11. Zależność między ciśnieniami okólnym i porowym, dla $R\sigma_1 - \sigma_3 = 100, 200$ i 300 MPa; piaskowiec „Tumlin 2005” nasączony H_2O

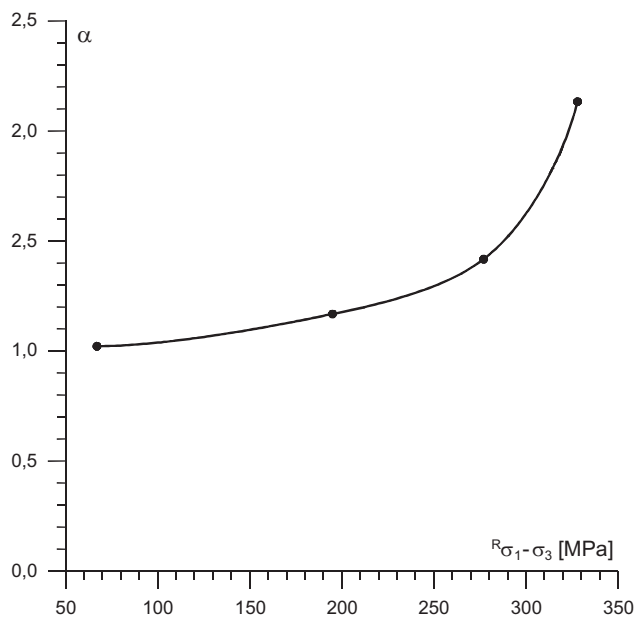
7. Podsumowanie i wnioski

Celem badań, których wyniki są przedmiotem analizy i dyskusji w niniejszej pracy, było szczegółowe przeanalizowanie zależności między ciśnieniami okólnym a porowym w skale znajdującej się na granicy wytrzymałości w sytuacji, gdy płynem porowym jest gaz lub ciecz fizykochemicznie nieobojętna wobec skały (w tym przypadku CO_2 oraz H_2O). Przeprowadzone badania pokazały, że wpływ obecności CO_2 na kształtowanie się granicy wytrzymałości był inny w przypadku piaskowca i w przypadku opoki.

Analiza wyników badań pokazanych na rys. 4 pokazuje, że w przypadku piaskowca „Tumlin” linie łączące punkty, dla których różnica między ciśnieniem okólnym a porowym jest stała (spełniające równanie (14)) są prostymi, których nachylenie rośnie wraz ze wzrostem różnicowej granicy wytrzymałości ($R\sigma_1 - \sigma_3$). Oznacza to że dla $\sigma_3 - q = \text{const}$ spadek wartości różnicowej granicy wytrzymałości jest tym większy im większe jest ciśnienie porowe q . Zjawisko to było już sygnalizowane we wcześniejszych badaniach (Gustkiewicz i in., 2004, Gustkiewicz i Nowakowski, 2005) i wiązać je należy z tzw. efektem Rebintera (Rehbinder i Lichtman, 1957), który polega na obniżeniu napięcia powierzchniowego, a co za tym idzie i wytrzymałości skały, wskutek adsorpcji gazu porowego, przy czym spadek wytrzymałości jest tym większy, im wyższa jest ilość zasorbowanego gazu (por. także Hołda, 1990). Biorąc pod uwagę, że ilość ta rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia porowego, spadek $R\sigma_1 - \sigma_3$ ze wzrostem ciśnienia q (dla $p - q = \text{const}$) jest oczywisty.

Patrząc na rys. 4 można zauważyć coś jeszcze. Otóż ze wzrostem $R\sigma_1 - \sigma_3$ nachylenie prostych $p - q = \text{const}$ do osi „q” także rośnie co oznacza, że im wyższa wartość różnicowej granicy wytrzymałości tym silniej manifestuje się wpływ wzrostu ciśnienia porowego. Ma to także swoje przełożenie na zmiany wartości współczynnika α w liniowej funkcji ciśnienia efektywnego postaci (12) (por. rys. 6), co pokazano na rys. 12.

Przyczyn takiego zjawiska należy prawdopodobnie upatrywać w sposobie pękania badanego materiału. Jak wiadomo różnicowa granica wytrzymałości rośnie ze wzrostem ciśnienia okólnego oraz ze wzrostem różnicy $\sigma_3 - q$. Wzrostowi temu towarzyszy stopniowa zmiana sposobu pękania skały od kruche go pękania do ciągłego płynięcia. W próbce pękającej krucho wytwarza się zazwyczaj jedna płaszczyzna pęknięcia,

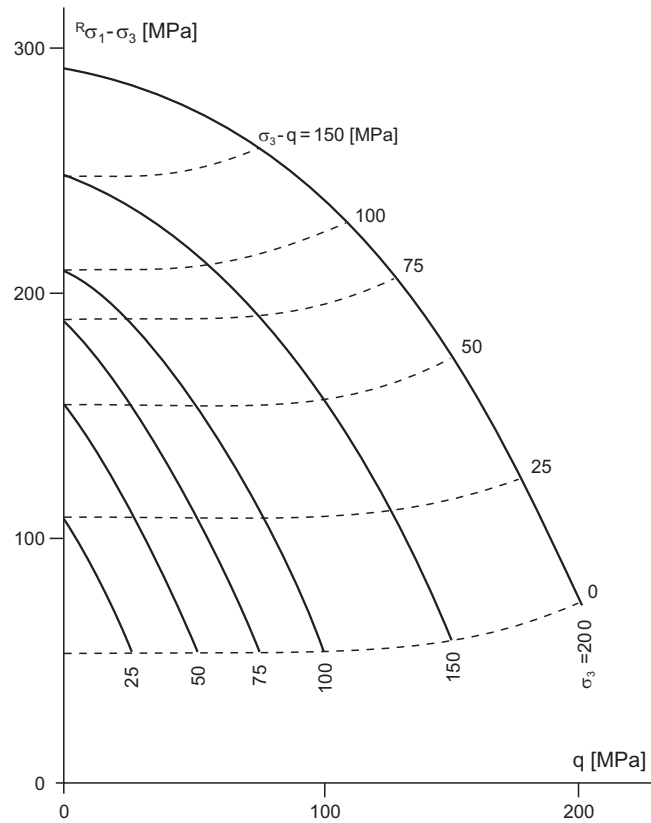


Rys. 12. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a współczynnikiem α w równaniu (12); piaskowiec „Tumlin” nasączony CO_2

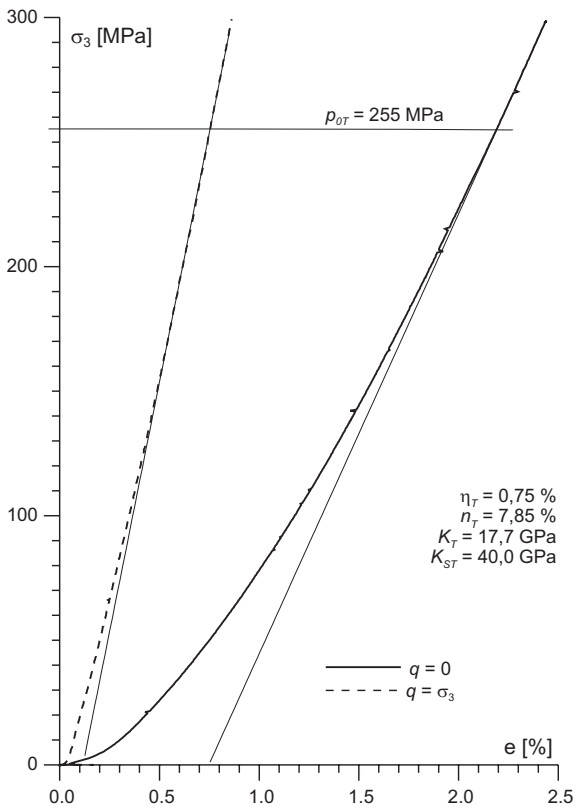
wzdłuż której następuje zniszczenie próbki. Natomiast w próbce pękającej w sposób ciągły powstaje wiele równoległych do siebie płaszczyzn zniszczenia. Oznacza to, że sumaryczna powierzchnia nowych spękań powstających podczas zniszczenia ciągłego jest prawdopodobnie znacznie większa niż podczas kruchego pęknięcia. Jeśli eksperyment jest drenowany (a tak było w tym przypadku) pęknięcia te zostają wypełnione pozostającym pod stałym ciśnieniem płynem porowym, a to z kolei oznacza, że wzrost powierzchni fizykochemicznie czynnej, na której mogą zachodzić procesy sorpcyjne, będzie przy zniszczeniu ciągłym znacząco większy niż przy kruchym. A zatem i wpływ efektów sorpcyjnych powinien się okazać dla wyższych wartości $R\sigma_1 - \sigma_3$ znacząco większy.

Nieco trudniej wyjaśnić zachowanie opoki. Na rys. 5 widać, że linia $\sigma_3 - q = \text{const}$ nie jest prostą a jej kształt sugeruje, że dla stałej wartości tej różnicy wartość $R\sigma_1 - \sigma_3$ początkowo maleje a następnie zaczyna rosnąć. Geneza początkowego spadku różnicowej granicy wytrzymałości jest zapewne taka sama jak w opisywanym wyżej przypadku piaskowca – oddziaływania sorpcyjne i efekt Rebintera – natomiast późniejszy wzrost $R\sigma_1 - \sigma_3$ jest najprawdopodobniej konsekwencją tzw. umocnienia dylatancyjnego. Polega on na tym, że gdy próbka skalna osiąga swoją granicę wytrzymałości zaczynają się w niej rozwijać nowe spękania, które często są od siebie izolowane (por. Zoback i Byerlee, 1975). Spękania takie mogą wywoływać spadek ciśnienia wewnątrz próbki (wzrost objętości porów), który nie zostaje wyrównany przez filtrujący z zewnątrz gaz. W efekcie w rzeczywistości różnica $\sigma_3 - q$ rośnie, choć z warunków prowadzenia eksperymentu wynika, że powinna ona być stała. Im większe jest ciśnienie okólne tym obserwowany efekt jest silniejszy. Przykładem takiego zachowania skały może być, opisany przez Gustkiewicza (1990), łupek z kopalni węgla „Nowa Ruda” (rys. 13).

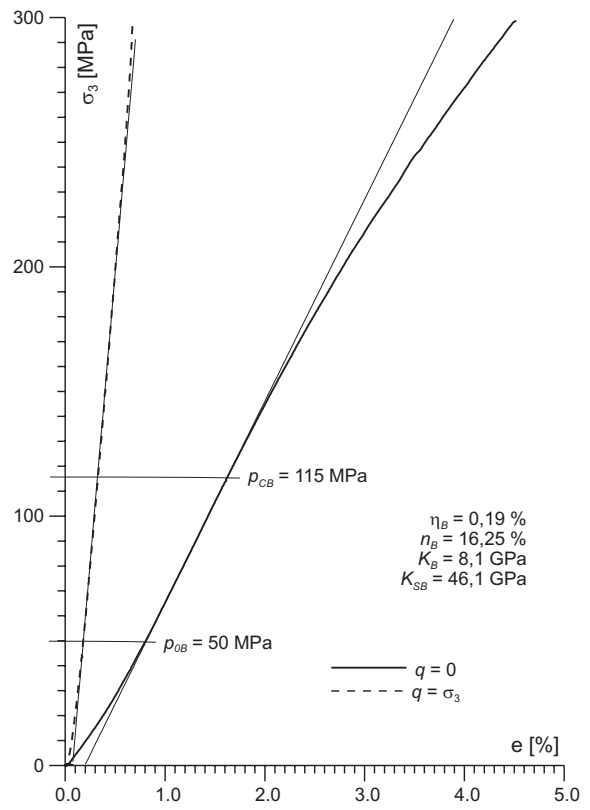
Powstaje naturalnie pytanie, dlaczego efekt umocnienia dylatancyjnego, nie pojawia się w przypadku piaskowca „Tumlin”. Odpowiedzi udzielają tutaj eksperymenty ściśliwości, których wyniki (tylko części wznoszące odpowiednich krzywych) pokazano na rys. 14 i 15. Wynika z nich, że ciśnienia zamykania spękań piaskowca i opoki (p_{0T} i p_{0B}) wynoszą odpowiednio 255 MPa i 50 MPa, co oznacza, że podczas wszystkich eksperymentów wykonywanych na piaskowcu sieć spękań była otwarta a filtracja gazu ułatwiona. W przypadku opoki spękania ulegają zamknięciu stosunkowo wcześniej i od tej chwili mamy do czynienia ze skałą, w której znajdują się przede wszystkim izolowane pory izometryczne a takie warunki są dla filtracji bardzo niekorzystne. Dodatkowo wartości porowatości spękań (η_T, η_B) wynoszące odpowiednio: dla piaskowca 0,75% i dla opoki 0,19 %, co po porównaniu ich z otrzymanymi z badań porozymetrycznych wartościami porowatości całkowitej ($n_T = 7,85\%$, $n_B = 16,25\%$) wskazują, że w przypadku opoki spękania stanowią bardzo niewielką część objętości wszystkich porów tej skały (rzędu 1,2%) co dodatkowo stwarza niekorzystne warunki dla filtracji i sprzyja wystąpieniu umocnienia dylatancyjnego.



Rys. 13. Efekt umocnienia dylatacyjnego; łupek „Nowa Ruda” nasączony azotem (Gustkiewicz 1990)



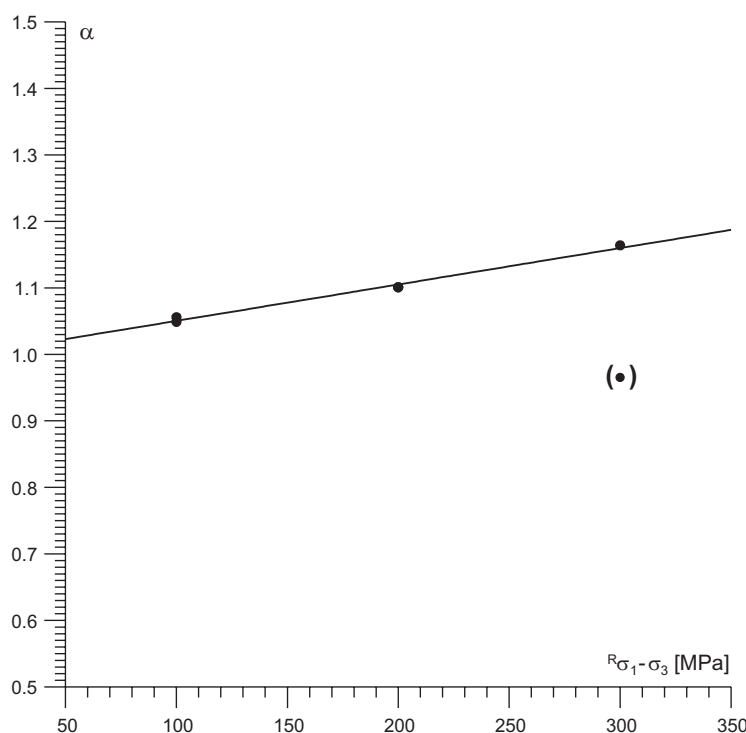
Rys. 14. Krzywa ściśliwości dla piaskowca „Tumlin”



Rys. 15. Krzywa ściśliwości dla opoki „Benatky”

Ostatnia część niniejszych rozważań poświęcona jest wynikom badań piaskowca nasączonego wodą destylowaną. Ponieważ wyniki takich badań wykonane w roku 2003 wzbudziły wątpliwości, więc zdecydowano się je powtórzyć. Zestawienie wyników obu serii badań pokazuje rozdz. 5.1. Widać, że w przypadku obu badanych próbek są one praktycznie identyczne.

Analiza wyników tych badań pozwoliła na wyciągnięcie wniosków nieco innych niż opublikowane wcześniej przez Gustkiewicza i in. (2003, 2004) oraz Gustkiewicza i Nowakowskiego (2005). W szczególności wyznaczenie równań ciśnienia efektywnego poprzez wykorzystanie współrzędnych punktów przecięcia prostych ${}^R\sigma_1 - \sigma_3 = \text{const}$ z krzywymi $\sigma_3 = \text{const}$ (procedura opisana przez Gustkiewicza i Nowakowskiego, 2005) pozwoliło stwierdzić, że równania te dla badanego piaskowca znajdującego się na granicy wytrzymałości mają postać równań typu (12) z wartościami współczynnika α tylko nieznacznie większymi od jedności i słabo rosnącymi ze wzrostem ${}^R\sigma_1 - \sigma_3$ (patrz rys. 16).



Rys. 16. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a współczynnikiem α w równaniu (12); piaskowiec „Tumlin” nasączony H_2O

Wynik ten zgadza się z tym, co wiadomo o właściwościach sorpcyjnych wody, która jako substancja fizykochemicznie czynna z pewnością obniża wytrzymałość skały w stosunku do skały suchej (dla piaskowca „Tumlin” efekt ten opisali Gustkiewicz i in., 2003). Z drugiej jednak strony zmiany wytrzymałości skały silnie zależą od ilości zasorbowanego płynu a ta, w przypadku wody, słabo zależy od ciśnienia porowego. Stąd niewielki wpływ wzrostu ciśnienia wody porowej na różnicową granicę wytrzymałości, manifestujący się bliskimi jedności wartościami współczynnika α i ich nieznacznym wzrostem ze wzrostem ciśnienia q .

Powyższe rozważania nie uwzględniają wpływu procesów chemicznych, jakie mogą zachodzić w skale pod wpływem wody. Na przykład Hołda (1990) zwraca uwagę, że jeżeli w węglu znajdują się minerały ilaste to usunięcie zeń wody powoduje obniżenie jego wytrzymałości mechanicznej, co wiązać należy z usunięciem z minerałów ilastych wody międzypakietowej niezbędnej do utrzymania równowagi międzypakietowej. Powstaje w tym momencie pytanie czy proces odwrotny – to znaczy dostarczanie wody minerałom ilastym – spowodowałby wzrost wytrzymałości mechanicznej oraz, czy taki proces mógłby zachodzić w piaskowcu? Jeżeli tak, to ewentualne osłabienie piaskowca „Tumlin” wskutek sorpcji wody mogłoby być w jakim stopniu równoważone jego wzmocnieniem wskutek nasączenia wodą części ilastej spoiwa (por. opis budowy piaskowca „Tumlin”: Nowakowski i in., 2003). Potwierdzenie lub zaprzeczenie tej hipotezy wymaga jednak badań wykraczających poza możliwości Pracowni.

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.
- Geertsma J., 1957: *The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks*. Trans. AIME. 210: 331-340.
- Gustkiewicz J., 1990: *Deformacje i wytrzymałość skał w trójosiowym stanie naprężenia z uwzględnieniem płynów porowych*. W: Górotwór jako ośrodek wielofazowy. J. Litwiniszyn (red.). AGH, Kraków, 97-136,
- Gustkiewicz J., 1989: *Objętościowe deformacje skały i jej porów*. Arch. Min. Sci., t. 34, cz. 3, s. 593-609.
- Gustkiewicz J., 1985: *Deformation and failure of the Nowa Ruda sandstone in a three-axial state of stress, with gas under pressure in the pores*. Archiwum Górnictwa, Vol. XXX, p. 401-424.
- 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 Górotworu i Geoinżynierii, Szklarska Poręba 13-18 III 2005, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, str. 195-205.
- Gustkiewicz J., Nowakowski, A., 2004: *Deformacje i pękanie skał w warunkach laboratoryjnych*. Arch. Min. Sci., Vol. 49, Special Issue, s. 5-50.
- 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. VI, s. 3-17.
- 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, s. 367-375.
- 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.
- Hołda S., 1990: *Wpływ sorpcji gazów, par i cieczy na wytrzymałość skał*. W: Górotwór jako ośrodek wielofazowy. J. Litwiniszyn (red.). AGH, Kraków, 443-453.
- 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, p. 283-290.
- Lasoń M., 1988: *Specific surface of porous material*. Arch. Min. Sci., 33, 475-497.
- 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.
- 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.
- Skempton A.W., 1960: *Effective stress in soils, concrete and rocks*. Proc. Conf. on Pore Pres. Sustion in Soils. London, Butterworths, 4-6.
- Terzaghi von K., 1923: *Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der Spannungs-erscheinungen*. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien Math.-Naturwiss. Kl., Abt. 2A, 132, 105.
- Zoback M.D., Byerlee J.D., 1975: *The effect of microcrack dilatancy on the permeability of Westerly granite*. J. Geophys. Res., 80, 752-755.

Some different forms of the effective pressure law evaluated at the rock strength border

Abstract

The article contains research results on shaping of the effective pressure law in rock specimen, in which stresses achieved the differential strength border. Some results of individual triaxial compression tests with pressurized pore fluids made for two rocks: sandstone "Jumlin" and gaize "Benatky" were studied. The carbon dioxide and distilled water were used as pore fluids. These works were a continuation of researches conducted in years 2003 and 2004.

Examinations of specimens of the gaize saturated with CO₂ confirmed conjectures expressed already (Gustkiewicz at all, 2004), that the effective pressure law can be in this case a non-linear function of the pore pressure. The test results obtained for saturated H₂O sandstone permitted to modify current views (Gustkiewicz at all, 2003, 2004) about the influence which water under the pressure, as pore liquid, is exerting on rocks' properties.

Keywords: triaxial compression, differential strength, confining pressure, pore pressure, effective pressure, effective pressure law, effective pressure value