

Kształtowanie się ciśnienia efektywnego w klasycznym, trójosiowym stanie naprężenia, na podstawie wyników pękania i deformacji wybranych skał

JERZY GUSTKIEWICZ, ANDRZEJ NOWAKOWSKI, JANUSZ NURKOWSKI, LESZEK STANISŁAWSKI, ZBIGNIEW LIZAK

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

Streszczenie

Artykuł zawiera podsumowanie prowadzonych w latach 2003 i 2004 badań nad kształtowaniem się ciśnienia efektywnego w skale, w której naprężenia osiągnęły granicę wytrzymałości. W ramach badań laboratoryjnych wykonano eksperymenty klasycznego trójosiowego ściskania z płynem porowym pod ciśnieniem dla trzech skał: piaskowca „Tumlin”, wapienia „Pińczów” i opoki „Benatky”. Stosowano sorbujące (CO_2 i H_2O) i niesorbujące (nafta, azot) płyny porowe.

Studiowano sposób zachowania ciśnienia efektywnego na granicy wytrzymałości w zależności od zastosowanego płynu porowego. Wyodrębniono trzy różne sposoby kształtowania się ciśnienia efektywnego na granicy wytrzymałości skały: dla obojętnych płynów porowych (nafta, azot), dla nieobojętnego gazu (CO_2) i dla nieobojętniej cieczy (H_2O). Podano prawdopodobne przyczyny zachodzących różnic. Uzyskane wyniki wykorzystane zostaną do dalszych badań nad kształtowaniem się w skałach ciśnienia efektywnego.

Słowa kluczowe: trójosiowe ściskanie, różnicowa granica wytrzymałości, ciśnienie okólne, ciśnienie porowe, ciśnienie efektywne, konwencjonalne ciśnienie efektywne

1. Wprowadzenie

Analiza właściwości mechanicznych skały zazwyczaj prowadzona jest przy założeniu, że jest ona ośrodkiem jednofazowym. Oznacza to, że jest ona traktowana jako ośrodek ciągły, składający się wyłącznie z fazy stałej, natomiast ignoruje w pewnym sensie fakt, że w rzeczywistości skała jest materiałem nieciągłym, zawierającym oprócz tworzących ją stałych składników także obszary pustek o różnym kształcie i wymiarach.

Zagadnienie komplikuje dodatkowo fakt, że pustki te, objęte wspólną nazwą przestrzeni porowej, mogą być wypełnione płynem, który może oddziaływać na skałę mechanicznie, wpływając, poprzez zmiany swojego ciśnienia na stan naprężenia w skale, fizykochemicznie a nawet chemicznie, zmieniając właściwości materii skalnej wskutek interakcji zachodzących między płynem a szkieletem skały (np. procesy sorpcyjne, reakcje chemiczne), bądź też w sposób będący kombinacją powyższych czynników.

Pierwszą próbą uwzględnienia wypełnionej płynem pod ciśnieniem przestrzeni porowej w opisie właściwości mechanicznych ośrodka podjął, na potrzeby mechaniki gruntów Karl von Terzaghi [Terzaghi 1923] wprowadzając pojęcie ciśnienia efektywnego. Kolejnym był Maurice Biot, publikując w 1941 r. [Biot 1941] swoją teorię konsolidacji, przy czym zaproponowane przez niego podejście polegało na uzupełnieniu układu równań Hooke'a o składniki uwzględniające sprężystą, objętościową deformację gruntu oraz dodanie równania konstytutywnego dla porów, uwzględniającego obecność ciśnienia porowego. Teoria Biota była później modyfikowana przez wielu autorów [np.: Rice & Cleary 1976, Zienkiewicz & Shiomi 1984, Detournay & Cheng 1993] i nadal jest bardzo użyteczna przy rozwiązywaniu różnych problemów mechaniki gruntów i skał [por. uwagi Roegiersa & al. 1998] z tym wszakże zastrzeżeniem, iż przeznaczona jest ona do opisu zachowań materiału tylko w zakresie sprężystym. Niektóre jej elementy można natomiast wykorzystać przy opisie zachowań skały za pomocą tzw. efektywnego ciśnienia okólnego.

2. Koncepcja efektywnego ciśnienia okólnego

Efektywne ciśnienie okólne σ_3 to, według Robina [1973], pewna funkcja ciśnienia okólnego σ_3 i porowego q

$$\sigma_3 = \sigma_3(\sigma_3, q) \quad (1)$$

mająca taką właściwość, że jeżeli spełniony jest warunek:

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

to wielkość analizowana jako funkcja ciśnienia efektywnego (np. różnicowa granica wytrzymałości) także ma wartość stałą. W szczególności dla tak zdefiniowanego efektywnego ciśnienia okólnego spełnione jest:

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

Zazwyczaj przyjmuje się, za takimi autorami jak Terzaghi [1923], Geertsma [1957] czy Skempton [1960], że funkcja (1) ma formę:

$$\sigma_3 = \sigma_3 - \alpha q \quad \wedge \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4)$$

Jeżeli teraz $\alpha = 1$, to związek (4) redukuje się do znanej postaci Terzaghiego:

$$\sigma_3 = \sigma_3 - q \quad (5)$$

W tym przypadku ciśnienie σ_3 nosi nazwę konwencjonalnego ciśnienia efektywnego.

Kończąc tę część rozważań dodajmy, iż Nur & Byerlee [1971] pokazali, bazując na wspomnianej już koncepcji Biota, że jeśli badany ośrodek znajduje się w zakresie swoich deformacji sprężystych pod ciśnieniem hydrostatycznym, to wymieniony w związkach (4) współczynnik α można wyznaczyć eksperymentalnie za pomocą pewnych stałych sprężystości. Dla skały odpowiedni związek wygląda następująco:

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \quad (6)$$

gdzie:

K – moduł ściśliwości skały (łącznie z porami),

K_s – moduł ściśliwości fazy stałej skały (szkieletu),

natomiast dla przestrzeni porowej związek (6) ma postać bardziej złożoną [por. Paterson 1978, s. 75] i wymagającą uwzględnienia także wartości porowatości skały. Wzór (6) prawdziwy jest także dla uogólnionych przez Biota równań Hooke'a [por. Paterson 1978, s. 75].

Należy zaznaczyć, że aby jakaś właściwość skały mogła być uznana za funkcję konwencjonalnego ciśnienia okólnego, muszą zostać spełnione pewne warunki, które jako pierwsi podali Handin et al. [1963] w następującej formie:

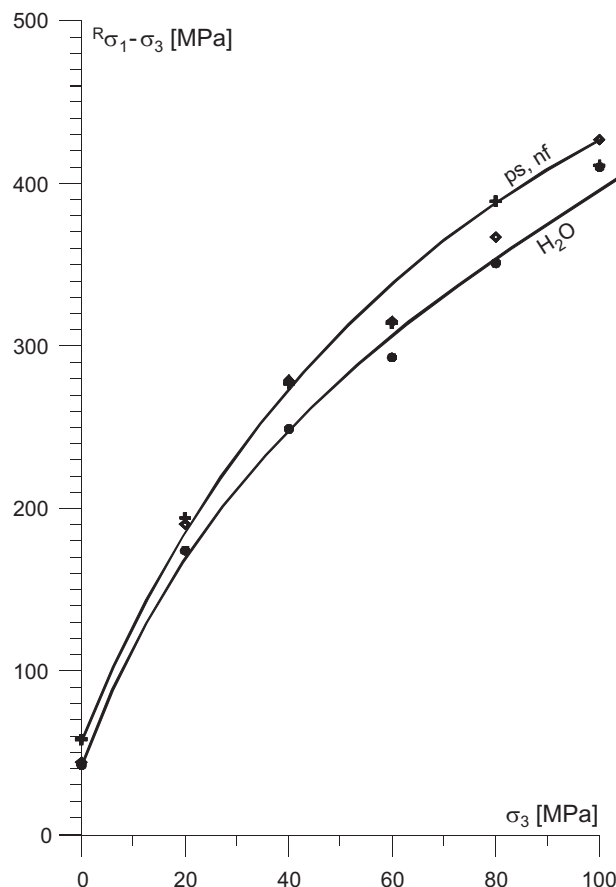
- płyn porowy jest obojętny wobec składników skały (ciśnienie porowe działa wyłącznie mechanicznie),
- przepuszczalność skały pozwala na takie przenikanie płynu porowego, że ciśnienie porowe pozostaje stałe i równomierne podczas deformacji skały,
- skała jest agregatem podobnym do piasku z porami, których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

Ze względu na pojawiające się w dużej ilości spękania, powyższe warunki może na przykład spełniać skała, która osiągnęła naprężenie równe swojej granicy wytrzymałości.

Niespełnienie któregośkolwiek spośród wymienionych wyżej warunków może powodować, że znajdujący się we wzorze (4) współczynnik α jest różny od jedności. W szczególności może to mieć miejsce, gdy płyn porowy nie jest obojętny wobec składników skały. Takimi nieobojętnymi płynami są m.in. woda czy dwutlenek węgla. Badanie skał z porami wypełnionymi tego typu medium pozostaje od szeregu lat przedmiotem zainteresowania Pracowni Odształceń Skał IMG PAN.

3. Różnicowa granica wytrzymałości skały a ciśnienie efektywne

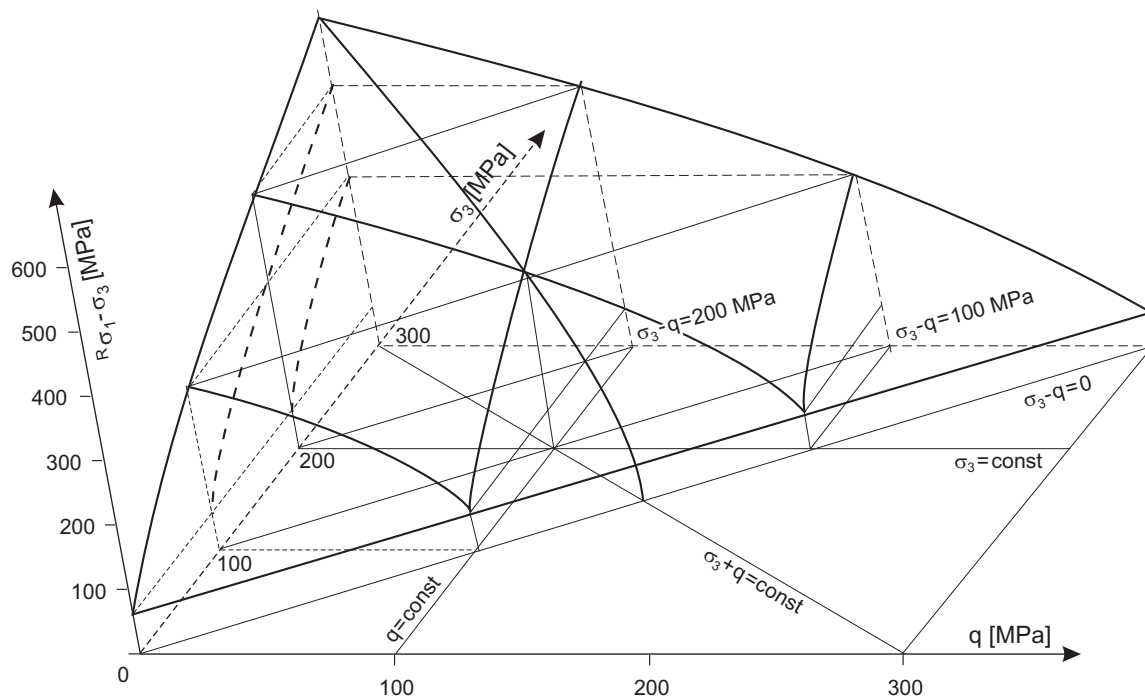
Różnicowa granica wytrzymałości skały ($^R\sigma_1 - \sigma_3$) często wyznaczana jest na podstawie tzw. klasycznego testu trójosiowego ściskania polegającego na tym, że próbka ściskana jest najpierw hydrostatycznie do pewnego ciśnienia σ_3 (zwanego dalej ciśnieniem okólnym) a następnie, po ustabilizowaniu się warunków w komorze trójosiowej (temperatura, ciśnienie), uruchamiane jest obciążanie próbki siłą osiową. Jako wynik otrzymuje się krzywe zależności między naprężeniem różnicowym a odpowiednimi odkształceniami próbki do przekroczenia granicy wytrzymałości. Różnicową granicę wytrzymałości $^R\sigma_1 - \sigma_3$ wyznacza się następnie jako funkcję ciśnienia okólnego σ_3 . Przykład odpowiedniej zależności pokazano na rys. 1.



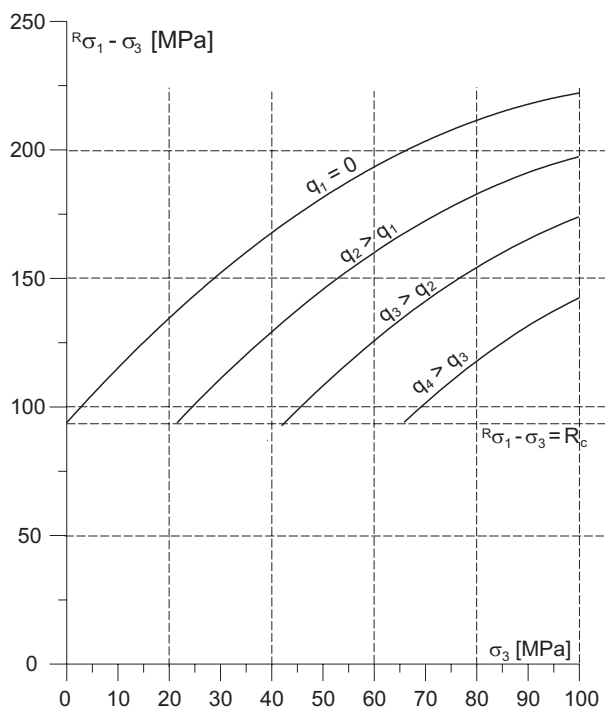
Rys. 1. Różnicowa granica wytrzymałości jako funkcja ciśnienia okólnego; piaskowiec „Tumlin” [Gustkiewicz et al. 2003]

Jeżeli podczas testu trójosiowego ściskania przestrzeń porowa skały wypełniona jest płynem pozo-
stającym pod ciśnieniem q , to różnicowa granica wytrzymałości jest funkcją dwóch parametrów, tj. σ_3 i q . Jej obraz graficzny staje się wówczas powierzchnią w przestrzeni ($^R\sigma_1 - \sigma_3, \sigma_3, q$), czego przykład pokazuje rys. 2.

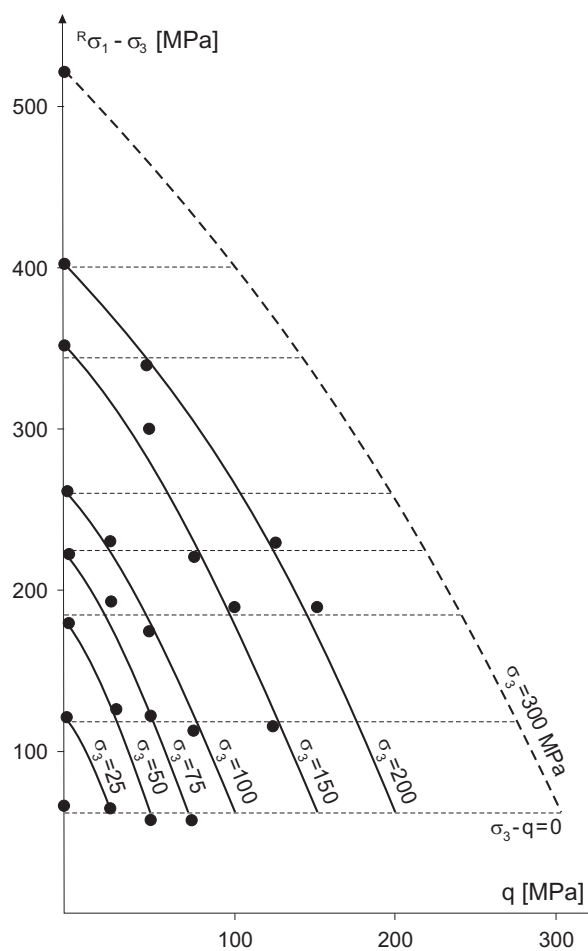
W praktyce do analizy zmian różnicowej granicy wytrzymałości jako funkcji ciśnień okólnego i porowego wykorzystuje się rzuty powierzchni $^R\sigma_1 - \sigma_3 = f(\sigma_3, q)$ na odpowiednie płaszczyzny układu współrzędnych. I tak, rzutując rozpatrywaną powierzchnię na płaszczyznę ($^R\sigma_1 - \sigma_3, \sigma_3$) otrzymujemy zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem okólnym przy ciśnieniu porowym q jako parametrze (rys. 3). Pokazana na rys. 1 krzywa otrzymana w wyniku klasycznego testu trójosiowego ściskania jest w istocie jedną z takich zależności, uzyskaną dla $q = 0$. Z kolei rzut interesującej nas powierzchni na płaszczyznę ($^R\sigma_1 - \sigma_3, q$) daje nam zależności między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze (rys. 4). Obie te reprezentacje powierzchni $f(\sigma_3, q)$ bardzo dobrze charakteryzują różnicową granicę wytrzymałości jako funkcję ciśnienia okólnego i porowego mają natomiast



Rys. 2. Różnicowa granica wytrzymałości jako funkcja ciśnień: okólnego i porowego; piasek „Nowa Ruda” nasączony azotem [Gustkiewicz 1985]



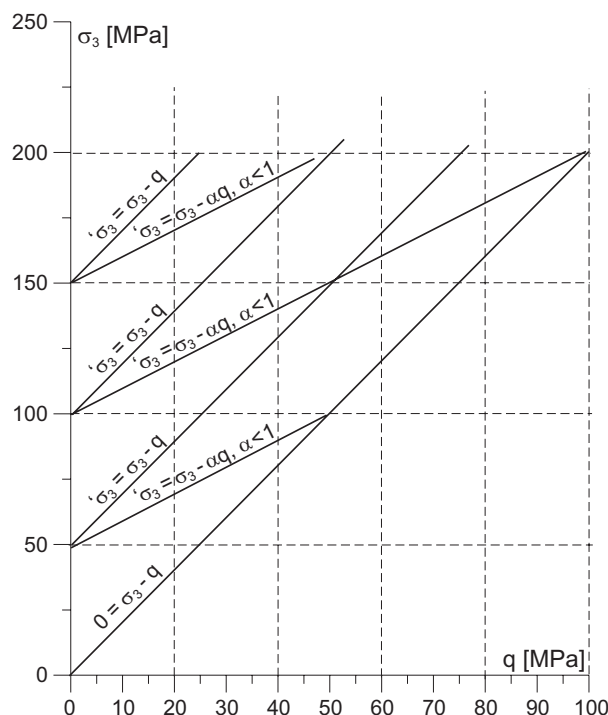
Rys. 3. Zależność między różnicą granicą wytrzymałości a ciśnieniem okólnym, przy ciśnieniu porowym jako parametrze; schemat



Rys. 4. Zależność między różnicą granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; piasek „Nowa Ruda” nasączony azotem [Gustkiewicz 1985]

ten mankament, że trudno na ich podstawie wnioskować cokolwiek o wartościach odpowiadającego $^R\sigma_1 - \sigma_3$ ciśnienia efektywnego. Informacji na ten temat dostarcza dopiero rzut powierzchni $f(\sigma_3, q)$ na płaszczyznę (σ_3, q) . Schemat takiego rzutu pokazuje rys. 5. Rysunek ten pokazuje zbiory punktów analizowanej płaszczyzny, które spełniają warunek:

$$^R\sigma_1 - \sigma_3 = \text{const} \quad (7)$$



Rys. 5. Ciśnienie okólne jako funkcja ciśnienia porowego przy różnicowej granicy wytrzymałości jako parametrze; schemat

W przypadku konwencjonalnego ciśnienia efektywnego (tj. gdy $\alpha = 1$) punkty takie wyznaczają na płaszczyźnie (σ_3, q) zbiór prostych spełniających równanie (5). Jeżeli natomiast $\alpha \neq 1$, to proste te spełniają równanie (4), przy czym w obu przypadkach mamy do czynienia ze zbiorem prostych równoległych uzyskanych dla ciśnienia efektywnego σ_3 jako parametru. Należy zwrócić uwagę, że zbiór punktów spełniających warunek (7) może na płaszczyźnie (σ_3, q) w ogólności być dowolną funkcją uwikłaną zmiennych σ_3 i q , natomiast σ_3 pewną stałą spełniającą warunek (3).

Omówione powyżej sposoby analizy wyników testu trójosiowego ściskania dotyczą eksperymentu, podczas którego zarówno ciśnienie okólne (σ_3) jak i ciśnienie porowe (q) mają wartość stałą. W warunkach laboratoryjnych wymaga to, w odniesieniu do ciśnienia σ_3 , posiadania układu kompensującego zmiany ciśnienia płynu w komorze wynikające ze zmian objętości próbki, oraz zagwarantowania w komorze stałości temperatury. Natomiast rozważając ciśnienie q należy pamiętać, że pękaniu próbki towarzyszy wzrost objętości przestrzeni porowej, który może skutkować spadkiem ciśnienia płynu porowego. Zatem aby dotrzymać warunku $q = \text{const}$. wykonywany eksperyment powinien być testem „drenowanym”, tzn. takim, w którym wewnątrz próbki podłączone jest na stałe do akumulatora ciśnienia. Należy jeszcze wspomnieć, że podczas eksperymentu klasycznego trójosiowego ściskania między ciśnieniem okólnym a porowym w każdej chwili zachodzi zależność:

$$\sigma_3 \geq q \quad (8)$$

co jest konsekwencją faktu, że próbka oddzielona jest od medium w komorze odkształcalną, elastyczną osłoną. W takiej sytuacji każda próba podniesienia wartości q powyżej σ_3 skutkuje „wydęciem” osłony i natychmiastowym wyrównaniem obu ciśnień.

Kończąc zawarte w tym rozdziale rozważania należy wspomnieć o jeszcze jednym czynniku mającym wpływ na wartość ciśnienia porowego, a co za tym idzie także i ciśnienia efektywnego. Chodzi o prędkość deformacji próbki podczas eksperymentu. Zdarza się bowiem, że pomimo zagwarantowania drenażu próbki nie zachodzi równowaga między szybkością deformacji próbki a filtracją przez nią płynu porowego. W takiej sytuacji proces deformacji i pęknięcia próbki, połączony ze zwiększeniem objętości przestrzeni porowej, może zachodzić zbyt szybko, aby wynikający ze wzrostu objętości przestrzeni porowej spadek ciśnienia porowego został wyrównany przez dopływ płynu z akumulatora ciśnienia. Otrzymana w takich warunkach wartość różnicowej granicy wytrzymałości może być wyższa niż wynikałoby to z wyliczonej wartości różnicy między ciśnieniem okólnym a porowym. Mamy wówczas do czynienia z tzw. umocnieniem dylatacyjnym. Brace & Martin [1968] pokazali w swojej pracy, że dla danej skały istnieje krytyczna prędkość deformacji, której przekroczeniu towarzyszy pojawienie się umocnienia dylatacyjnego.

4. Przedmiot badań

Studia nad związkami zachodzącymi w klasycznym, trójosiowym stanie naprężenia między różnicową granicą wytrzymałości, ciśnieniem efektywnym i ciśnieniem porowym prowadzone są w Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN od wielu lat, a ich wyniki były wielokrotnie publikowane m. in. przez Gustkiewicza [1990, 1998], Gustkiewicza & Orenge [1990] oraz Czaplińskiego & Gustkiewicza [1990]. Rozważania zawarte na ten temat niniejszej pracy opierać się będą na wynikach badań laboratoryjnych uzyskanych w latach 2003 i 2004. W roku 2003 przedmiotem badań był piaskowiec z kamieniołomu w Tumlinie (dalej zwany piaskowcem „Tumlin”), którego opis petrograficzny publikowany był już wielokrotnie i w związku z tym zrezygnowano z jego powtarzania w niniejszej publikacji. Najpełniejszą wersję tego opisu znaleźć można w pracy Nowakowskiego et al. [2003].

W roku 2004 prowadzone w Pracowni badania skoncentrowały się na dwóch skałach: wapieniu z kamieniołomu w Pińczowie (zwanym dalej wapieniem „Pińczów”) oraz pochodzącej z miejscowości Benatki k. miasta Litomyśl w Republice Czeskiej opoki, która w dalszej części opracowania nazywana będzie opoką „Benatki”.

Wapień pińczowski, z którego wykonano próbki do badań wytrzymałościowych, zawiera kilkuprocentową domieszką ziaren piasku kwarcowego o średnicy nie przekraczającej 0,1 mm. Pod mikroskopem optycznym, na wykonanym szlifie cienkim, widoczne były, oprócz głównej substancji węglanowej, fragmenty mniej lub bardziej pokruszonych, różnorodnych organizmów o szkielecie wapiennym. Według informacji uzyskanych od pracowników kamieniołomu otrzymany blok wapienia leżakowany był przez okres ok. dwóch lat. Jest to informacja o tyle istotna, że wapień pińczowski jest typowym przykładem skały, która po wydobywaniu ze złoża zmienia swoje właściwości mechaniczne. Wysychając, traci bowiem swoją pierwotną wilgotność (nawet 17%), a wówczas następuje proces wytrącania i krystalizacji rozpuszczonego w niej węglanu wapnia [por. Rajchel 2004].

Dostarczony przez kolegów z Instytutu Geoniki AN RCz opis opoki „Benatki” mówi, że jej część detrytyczna jest utworzona z delikatnych, hydratyzowanych, łuskowatych łuszczyków (prawdopodobnie muskowitu), a nawet bardzo małej ilości (rzędu jednostki procent) silitu i kaolinitu. Krzemowe ziarna detrytyczne są silnie skorodowane i ostrokrawędziste (angularne przeważają nad subangularnymi) i nie stykają się ze sobą, ale są w całości rozprzestrzenione w masie podstawowej. Detrytyczne ziarna skaleni (plagioklaz) lub ułamki skał (kwarcyty) nie są liczne. W skale występują liczne wkładki resztek pancerzy *Protokallianassa antiqua* (Roemer) utworzonych z kalcytu, z rezydualnymi resztkami materii organicznej. Spoiwem jest mikrytowy kalcyt rozmieszczony w przestrzeniach międzyziarnowych. Część krzemionki ma postać amorficznego SiO_2 w rekrytalizowanym spoiwie.

Z punktu widzenia objętości i struktury porów w badanych skałach zachodzą dość istotne różnice. Badania porozymetryczne 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. Porowatość (n) badanego materiału wyznaczano wykorzystując powszechnie znany wzór:

$$n = \frac{\rho_s - \rho_o}{\rho_s} \quad (9)$$

w którym ρ_s – gęstość szkieletu badanej skały a ρ_o – jej gęstość objętościowa.

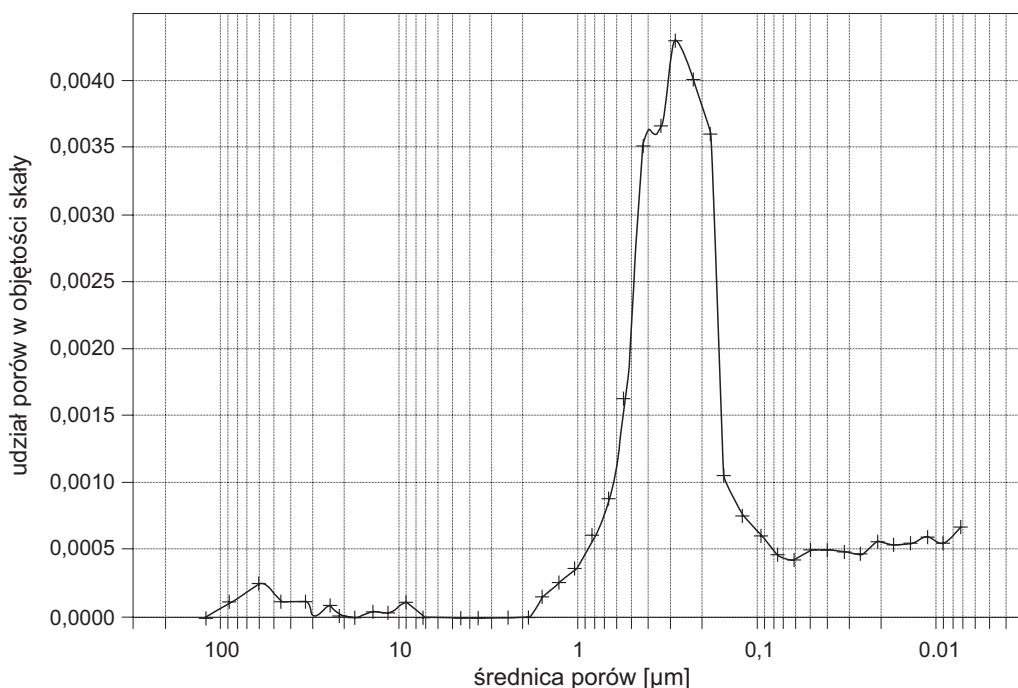
Wyznaczone w porozymetrze wartości ρ_s i ρ_o wynosiły: dla piaskowca „Tumlin” odpowiednio 2,6401 g/mL i 2,4329 g/mL, dla wapienia „Pińczów” 2,4910 g/mL i 2,0207 g/mL a dla opoki „Benatky” 2,5854 g/mL i 2,1653 g/mL. Wstawienie tych wartości do wzoru (7) dało następujące wartości porowatości: dla piaskowca $n_T = 7,85\%$, dla wapienia $n_P = 18,88\%$, oraz dla opoki $n_B = 16,25\%$. Dla wapienia i opoki są to wartości dość wysokie aczkolwiek dla wapienia „Pińczów” literatura podaje wartości jeszcze wyższe. Według wspomnianego wyżej Rajchla [2004] $n_P = 29-37\%$, ale z tekstu nie wynika, czy jest to wartość dla skały świeżo wydobytej czy dla skały leżakowanej.

Z punktu widzenia prowadzonych badań interesujące były również wyznaczone dla badanych skał krzywe rozkładu średnicy porów, które widać na rys. 6-8. Krzywe te pokazują, że w poszczególnych skałach dominują pory o następujących wymiarach:

- piaskowiec „Tumlin”: pory o średnicy 0,1-0,6 μm ,
- wapień „Pińczów”: pory o średnicy 1,0- 3,0 oraz 6,0-11,0 μm ,
- opoka „Benatky”: pory o średnicy 0,1-1,0 μm .

Wynika z tego, że dominujące w wapieniu „Pińczów” wymiary porów są mniej więcej o rząd wielkości wyższe niż dla piaskowca „Tumlin” i opoki „Benatky”.

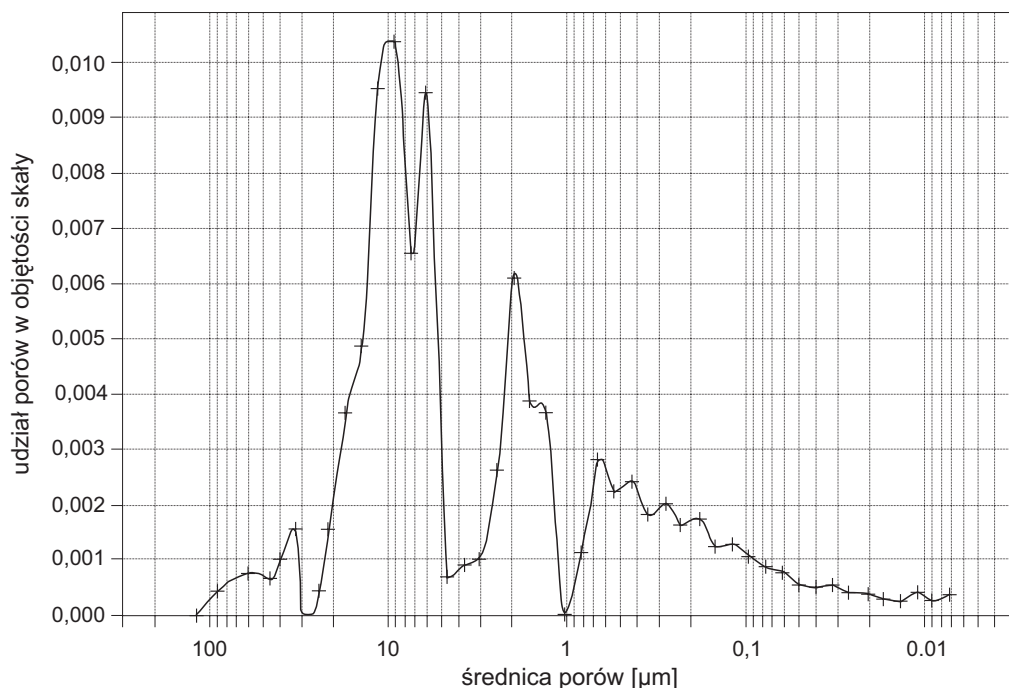
Warto w tym momencie odwołać się do klasyfikacji rozmiarów porów podanej przez Lasonia [1988], który pogrupował pory przyjmując za kryterium podziału sposób, w jaki osadza się w nich dwutlenek węgla. Według tej klasyfikacji we wszystkich badanych skałach dominują makropory, czyli pory o średnicach większych 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.



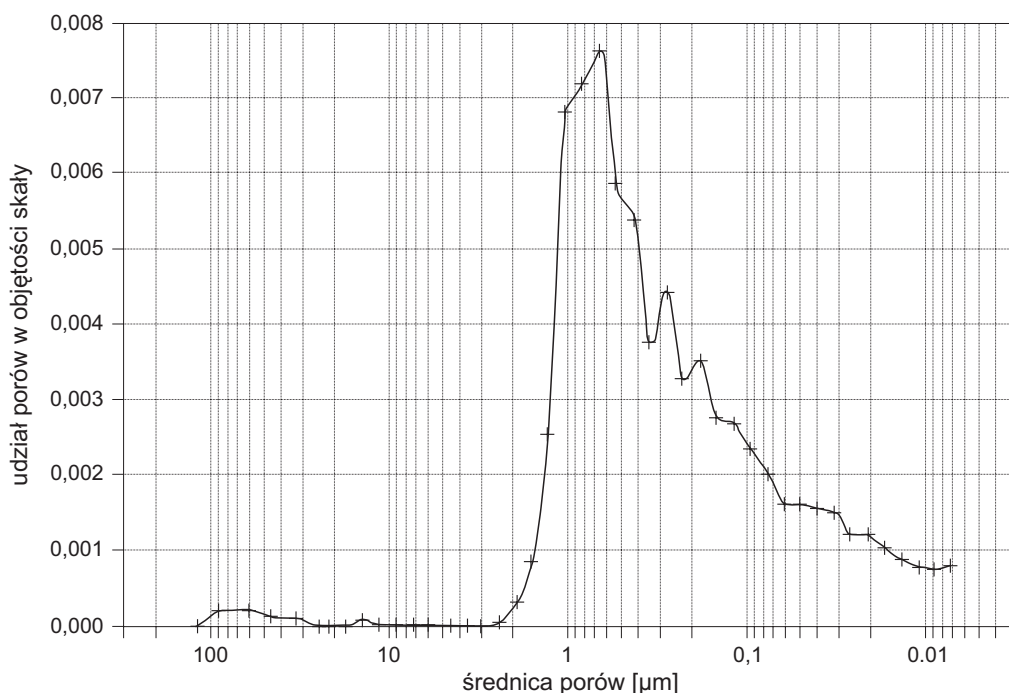
Rys. 6. Rozkład średnicy porów dla piaskowca „Tumlin”

5. Ciśnienie efektywne na granicy wytrzymałości skały w świetle wyników 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, a na-



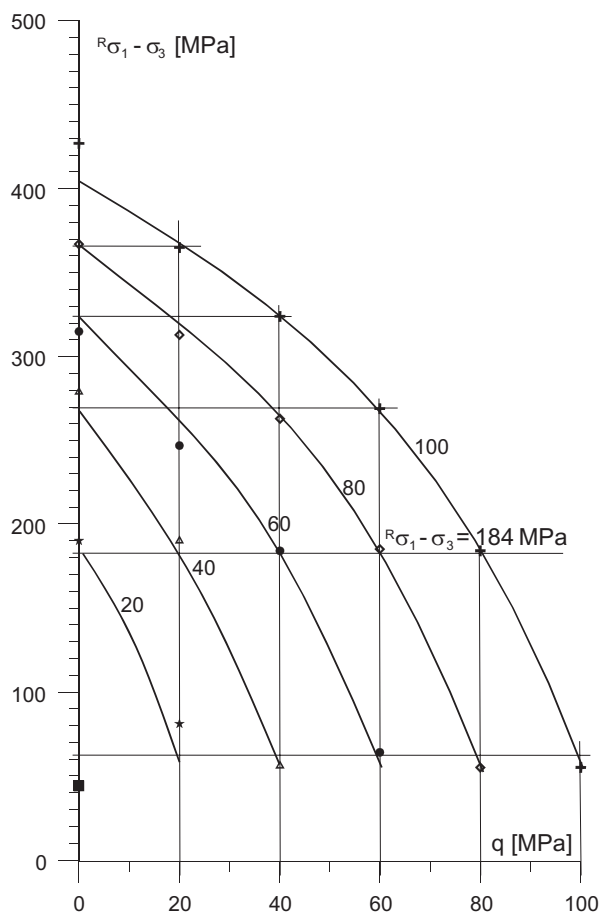
Rys. 7. Rozkład średnicy porów dla wapienia „Pińczów”



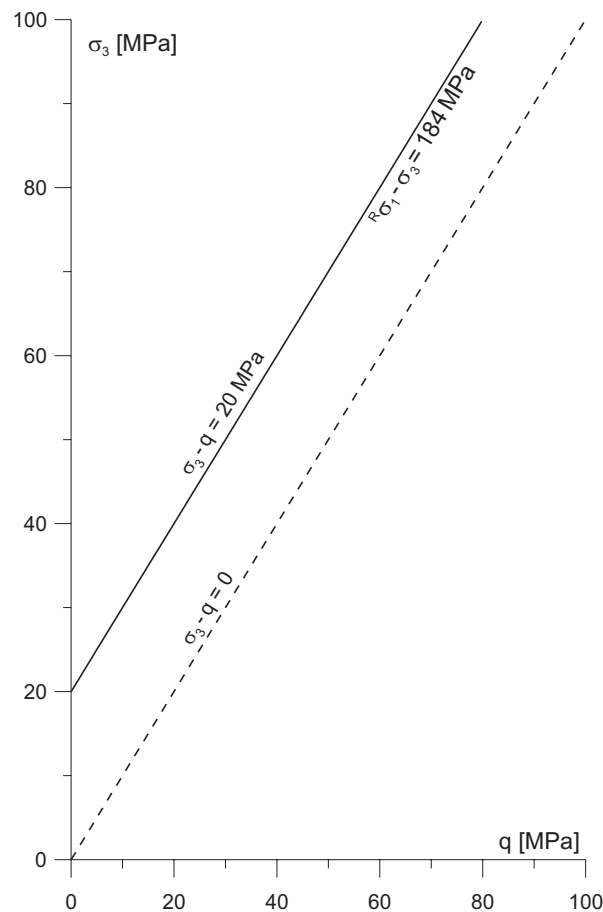
Rys. 8. Rozkład średnicy porów dla opoki „Benatky”

stępnie znajdowano dla nich odpowiadające wartości ciśnienia okólnego i porowego i na tej podstawie wykreślano na płaszczyźnie (σ_3 , q) zależności pozwalające na wyznaczenie wartości ciśnienia efektywnego.

Pierwszy rozpatrywany przypadek dotyczy piaskowca „Tumlin” nasączonego naftą (rys. 9). Ciśnienie efektywne analizowano dla granicy wytrzymałości równej 184 MPa. Na rys. 9 widać, że punkty przecięcia prostej ${}^R\sigma_1 - \sigma_3 = 184$ MPa z poszczególnymi krzywymi dzwonowymi wypadają praktycznie dokładnie w punktach o stałej różnicy między ciśnieniem okólnym a porowym, co oznacza, że mamy do czynienia z przypadkiem konwencjonalnego ciśnienia efektywnego. Zależność między ciśnieniem okólnym a porowym dla przyjętej wartości różnicowej granicy wytrzymałości pokazano na rys. 10.



Rys. 9. Zależność między różnicą granicy wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; piaskowiec „Tumlin” nasączony naftą [Gustkiewicz et al. 2003]



Rys. 10. Zależność między ciśnieniem okólnym a ciśnieniem porowym, dla $R\sigma_1 - \sigma_3 = 184 \text{ MPa}$; piaskowiec „Tumlin” nasączony naftą

W omówionym powyżej przypadku związek między ciśnieniami: porowym, okólnym i efektywnym opisany jest wzorem (5). Nie jest to jednak dla skał regułą. Poniżej, na rys. 11, pokazano zależność między różnicą granicy wytrzymałości a ciśnieniem porowym otrzymaną dla piaskowca „Tumlin” gdy medium porowym był dwutlenek węgla. Widać na nim, że punkty przecięcia linii stałej wytrzymałości z krzywymi dzwonowymi nie pokrywają się z punktami o stałej wartości różnicy $\sigma_3 - q$. Co więcej, zbiór punktów spełniających warunek:

$$\sigma_3 - q = \text{const} \quad (10)$$

wyznacza pewną prostą, której położenie wskazuje, że dla stałych wartości różnic między ciśnieniem okólnym a porowym różnicowa granica wytrzymałości jest malejącą funkcją ciśnienia porowego.

Na potrzeby dalszych rozważań skupiono uwagę nad prostą daną równaniem $R\sigma_1 - \sigma_3 = 195 \text{ MPa}$, którą oznaczono jako ‘1’. Prosta ta przecina oś rzędnych w punkcie ‘O’ o współrzędnych (q, σ_3) równych $(0, 20 \text{ MPa})$ a krzywą dzwonową $\sigma_3 = 100 \text{ MPa}$ w punkcie ‘A’, któremu odpowiada ciśnienie porowe o wartości q_1 . Odpowiadającą prostą ‘1’ spełniającą warunek (10) prosta ‘2’ przechodzi również przez punkt ‘O’ i przecina krzywą dzwonową $\sigma_3 = 100 \text{ MPa}$ w punkcie ‘B’, któremu odpowiada ciśnienie porowe q_0 . Zauważmy, że w rozważanym przypadku $q_1 < q_0$. Zdefiniowano współczynnik β w postaci:

$$\beta = \frac{q_1}{q_0} \quad (11)$$

Wartości tego współczynnika dla wybranej linii stałej wytrzymałości i poszczególnych krzywych dzwonowych pokazano na rys. 11. Współczynnik β_{SR} jest średnią arytmetyczną wyliczoną z wyznaczonych dla danej linii stałej wytrzymałości współczynników β .

Wynik rzutowania prostych '1' i '2' na płaszczyznę (q, σ_3) tak pokazano na rys. 12. Punkty „O”, „A” i „B” przechodzą odpowiednio w punkty „O1”, „A1” i „B1”. W efekcie prosta '1' przechodzi w prostą '11' a prosta '2' w prostą '21'. Współrzędne punktów 'A1' i 'B1' spełniają układ równań (12) postaci:

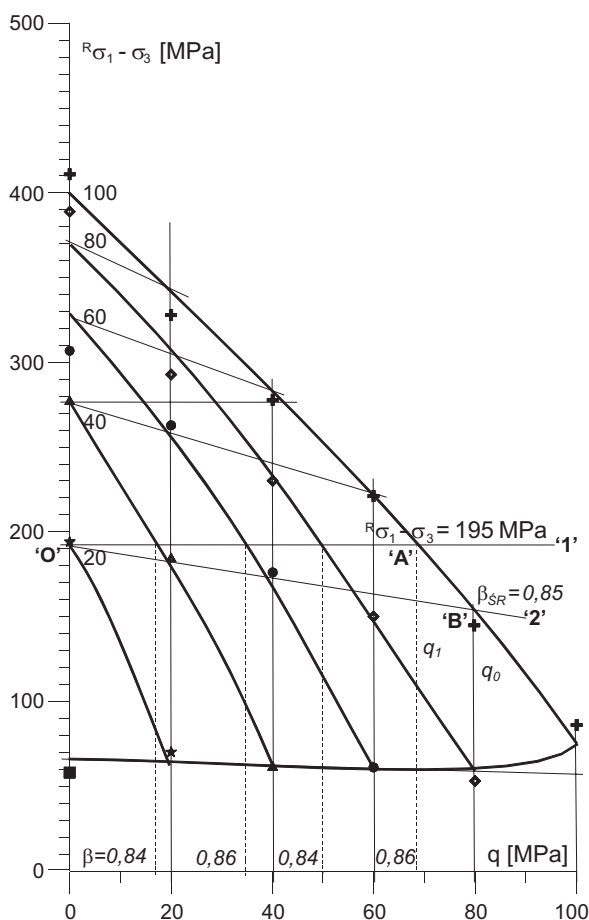
$$\begin{aligned} 100 - q_0 &= 20 \\ 100 - \alpha \times q_1 &= 20 \end{aligned} \quad (12)$$

Po odjęciu tych równań stronami i przekształceniu otrzymanej równości otrzymuje się:

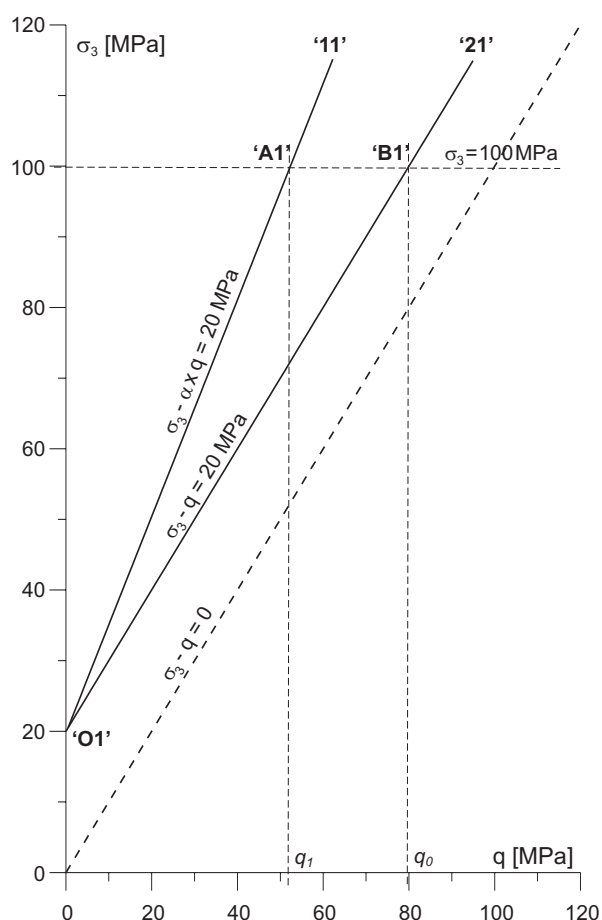
$$\alpha = \frac{q_0}{q_1} \quad (13)$$

co, biorąc pod uwagę (11), oznacza, że:

$$\alpha = \frac{1}{\beta} \quad (14)$$

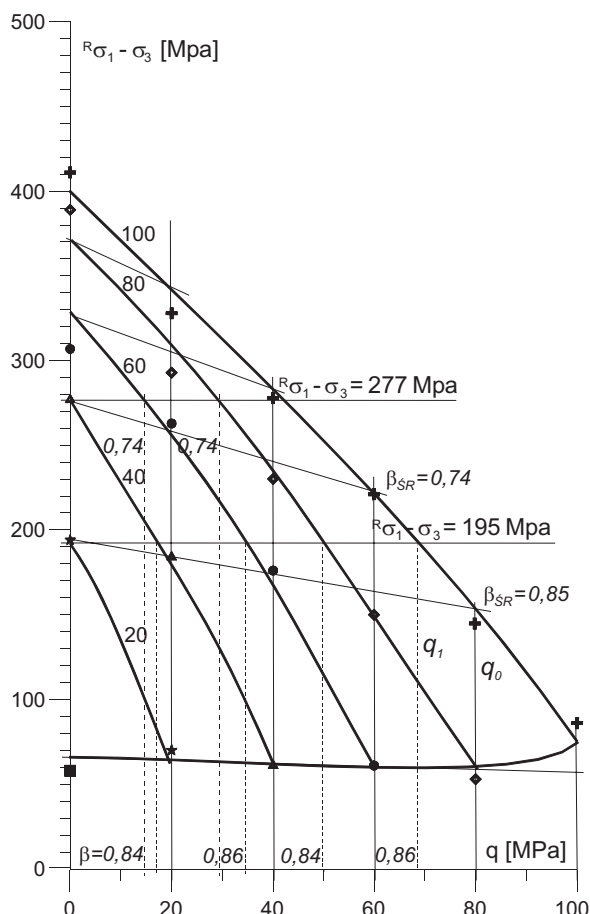


Rys. 11. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; piaskowiec „Tumlin” nasączony CO₂

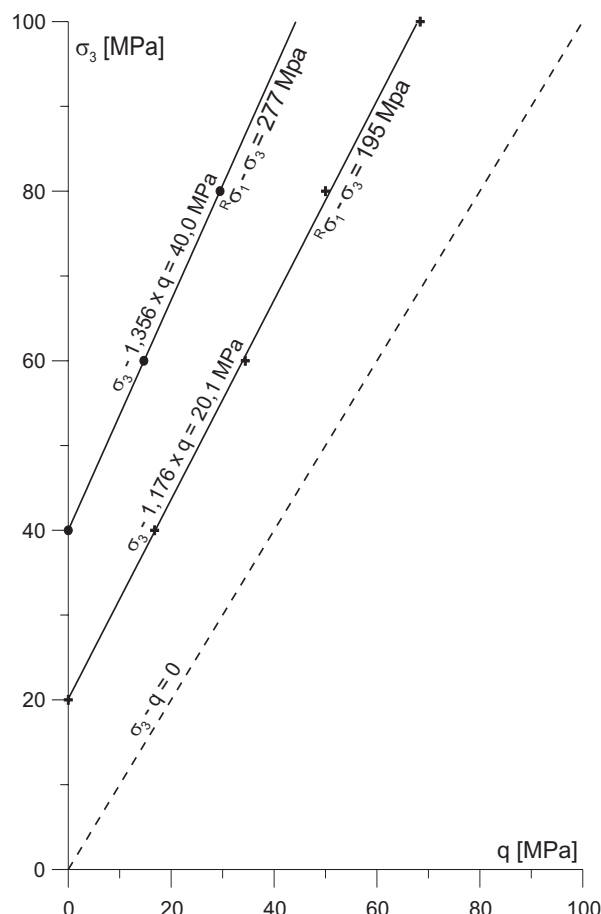


Rys. 12. Zależność między ciśnieniem okólnym a ciśnieniem porowym, dla $R\sigma_1 - \sigma_3$ równej 195 MPa i 277 MPa; piaskowiec „Tumlin” nasączony CO₂

Zauważmy, że ze związku (13) wynika, iż w rozważanym przypadku $\alpha > 1$, co pozostaje w sprzeczności z warunkiem (4). Na zakończenie tej części rozważań trzeba podkreślić, że o poprawności wyznaczenia współczynników α i β decyduje w rzeczywistości dokładność aproksymacji krzywych dzwonowych wyznaczających zależność różnicowej granicy wytrzymałości od ciśnienia porowego. Wydaje się, że dokładność, z jaką spełnione jest równanie (14) można uznać za kryterium poprawności wyznaczania wspomnianych krzywych dzwonowych. Sposób kształtowania się ciśnienia efektywnego w nasączonym CO₂ piaskowcu „Tumlin” pokazano, dla linii $R\sigma_1 - \sigma_3 = 195$ MPa i $R\sigma_1 - \sigma_3 = 277$ MPa (rys. 13), na rys. 14.



Rys. 13. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; piaskowiec „Tumlin” nasączony CO₂



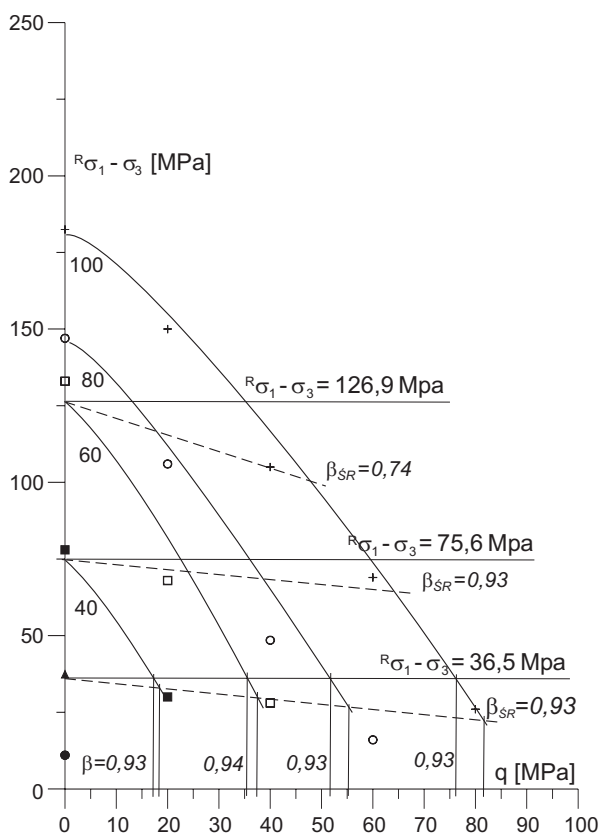
Rys. 14. Zależność między ciśnieniem okólnym a ciśnieniem porowym, dla $R\sigma_1 - \sigma_3$ równej 195 MPa i 277 MPa; piaskowiec „Tumlin” nasączony CO₂

Sposób, w jaki dwutlenek węgla zmienia różnicową granicę wytrzymałości skały uzyskał potwierdzenie w przypadku wapienia „Pińczów”. Na rys. 15 pokazano uzyskane dla tej skały zależności między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym przy ciśnieniu okólnym jako parametrze, natomiast na rys. 16 odpowiadające im zależności między ciśnieniami okólnym i porowym dla trzech wartości różnicowej granicy wytrzymałości, równych kolejno: 36,5 MPa, 75,6 MPa i 126,9 MPa.

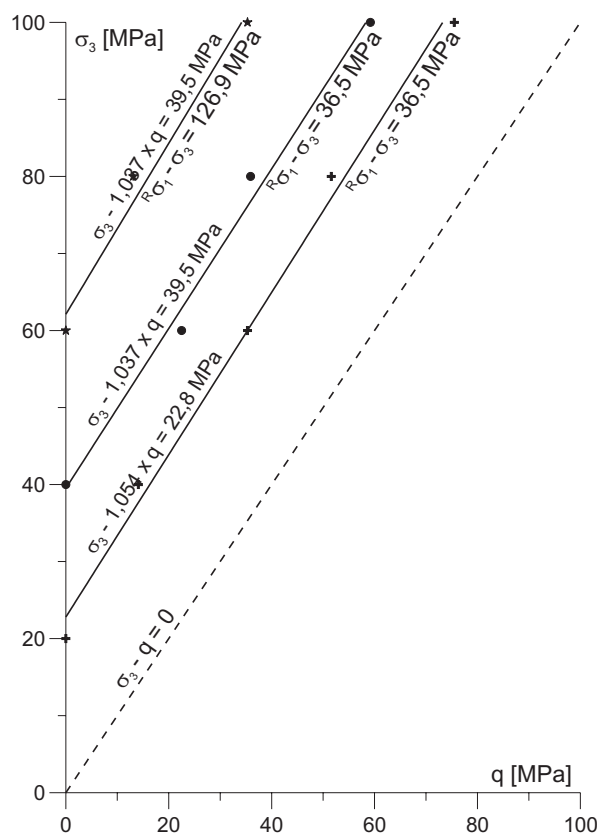
Przedstawione powyżej analizy kształtowania się ciśnienia efektywnego na granicy wytrzymałości w zależności od wartości ciśnienia porowego i różnicowej granicy wytrzymałości dotyczyły piaskowca „Tumlin” i wapienia „Pińczów”. Natomiast próba powtórzenia tego typu rozważań dla wyników badań wykonanych dla próbek opoki „Benatki” nie przyniosła jednoznacznych rezultatów. Istniejące wątpliwości oraz możliwe ich przyczyny zostaną pokazane w rozdz. 6.

6. Podsumowanie i wnioski

Celem badań, których wyniki są przedmiotem analizy i dyskusji w niniejszej pracy, było ustalenie, jak kształtuje się ciśnienie efektywne w skale w chwili, gdy naprężenia w niej osiągają wartość różnicowej granicy wytrzymałości. Studiowano wyniki eksperymentów klasycznego trójosiowego ściskania wykonanych w latach 2003 i 2004 dla trzech różnych skał: piaskowca „Tumlin”, wapienia „Pińczów” i opoki „Benatki”, oraz czterech różnych płynów porowych: nafty, azotu, dwutlenku węgla i wody. Należy podkreślić, że nie dla każdej skały możliwe było użycie wszystkich płynów porowych (np. nie było możliwe wykonanie badań wapienia z cieczami, gdyż pod ich wpływem próbki wapienia się rozpadały). Otrzymane wyniki pozwoliły na wyodrębnienie w skale osiągającej różnicową granicę wytrzymałości, trzech możliwych sposobów kształtowania się ciśnienia efektywnego w zależności od rodzaju użytego płynu porowego.



Rys. 15. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; wapień „Pińczów” nasączony CO₂



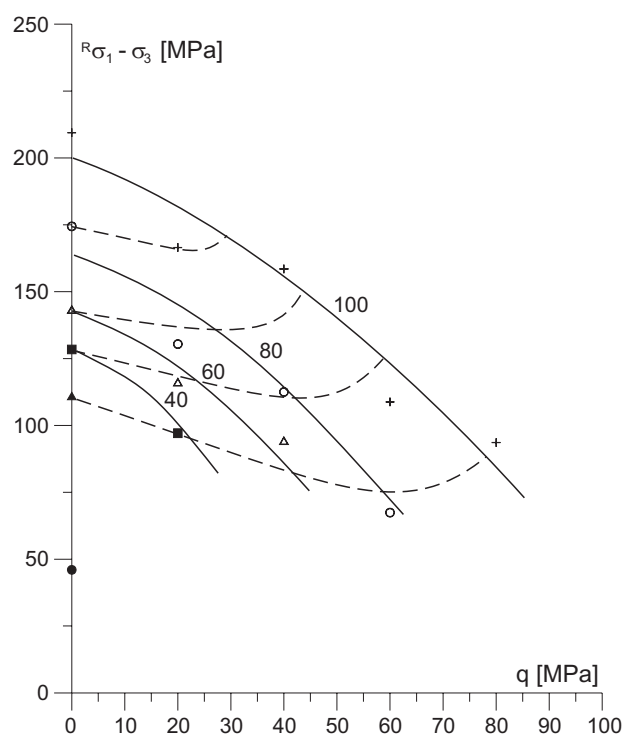
Rys. 16. Zależność między ciśnieniem okólnym a ciśnieniem porowym, dla $R\sigma_1 - \sigma_3$ równej 36,5 MPa, 75,6 MPa i 126,9 MPa; wapień „Pińczów” nasączony CO₂

Pierwszy sposób ujawnia się, gdy płyn porowy jest obojętny wobec składników skały. W takiej sytuacji stałe wartości różnicowej granicy wytrzymałości odpowiadają stałe wartości różnicy między ciśnieniami okólnym i porowym, a ciśnienie efektywne opisane jest wzorem (5). Jest to więc przypadek konwencjonalnego ciśnienia efektywnego. W przypadku tym nie ma znaczenia, czy płynem porowym jest ciecz (np. nafta) czy gaz (np. azot) co wyraźnie pokazały wyniki uzyskane dla nasączanego tymi płynami piaskowca „Tumlin” [patrz wyżej: rys. 9 i 10, a także Gustkiewicz et al. 2003]. Jeśli chodzi o wymagane w takim przypadku spełnienie przez skałę wymienionych w rozdz. 2 warunków określonych przez Handina et al. [1963] to stwierdzić trzeba, że poprzedzająca osiągnięcie przez skałę granicy wytrzymałości dylatacja zapewnia niezbędną łatwość filtracji płynu nawet dla tak wielkocząsteczkowej w porównaniu z azotem cieczy jak nafta. Rzecz jasna, jeśli właściwości filtracyjne skały są wystarczające dla nafty to tym bardziej są one takimi dla azotu.

Jeżeli płynem porowym jest gaz sorbujący (w naszym przypadku był nim dwutlenek węgla) to ciśnienie efektywne zazwyczaj kształtuje się w inny sposób. W takim przypadku, jak pokazały wyniki badań uzyskane dla piaskowca „Tumlin” (rys. 13 i 14) oraz wapienia „Pińczów” (rys. 15 i 16), stałym wartościom różnicy ciśnień $\sigma_3 - q$ mogą towarzyszyć malejące liniowo wraz ze wzrostem ciśnienia porowego, wartości różnicowej granicy wytrzymałości. Oznacza to, że ciśnienie efektywne kształtuje się według wzoru (4) i stawia problem wartości obecnego w tym wzorze współczynnika α . Przeprowadzone w Pracowni badania wykazały, że sugerowany przez literaturę [np. Geertsma 1957 czy Skempton 1960] warunek by α był mniejszy od jedności nie ma uzasadnienia – wręcz przeciwnie – można oczekiwać, że współczynnik ten będzie większy niż jeden. Przyczyny takiego zachowania różnicowej granicy wytrzymałości należy się doszukiwać w tzw. efekcie Rebintera [Rehbinder i Lichtman 1957], który obniża napięcie powierzchniowe, a co za tym idzie i wytrzymałość skały, przy czym spadek wytrzymałości jest tym większy, im wyższa jest ilość zasorowanego gazu. Biorąc pod uwagę, że ilość ta rośnie wraz ze wzrostem ciśnienia porowego, malejąca ze wzrostem ciśnienia porowego wytrzymałość różnicowa jest oczywista. Interesującym wynikiem jest także

uzyskanie zależności (13) pokazującej związek między współczynnikiem α a pewnymi charakterystycznymi wartościami ciśnień porowych.

W tym miejscu należy raz jeszcze stwierdzić, że zależność między σ_3 a σ_3 i q nie musi być zależnością liniową. Teoretyczną możliwość pojawienia się nieliniowej zależności wiążącej te wielkości sygnalizowano już w rozważaniach zamieszczonych w rozdz. 3, a w praktyce sugeruje ją wynik uzyskany dla opoki „Benatky” zawierającej w porach CO_2 pokazany na rys. 17. Widać na nim, że hipotetyczne linie stałej różnicy $\sigma_3 - q$ (linie przerywane) tworzą krzywe początkowo malejące a następnie rosnące ze wzrostem ciśnienia porowego. Taki kształt tych krzywych można by wytłumaczyć na przykład w ten sposób, że początkowy spadek wytrzymałości to skutek wspomnianego wyżej efektu Rebintera, a jej późniejszy wzrost jest rezultatem umocnienia dylatacyjnego lub silnego zaciskania porów przez wyższe ciśnienia okólne i związanej z tym malejącej roli porów w zachowaniu skały. Kończąc tę część rozważań należy podkreślić, że pokazany na rys. 17 wynik wymaga jeszcze potwierdzenia kolejnymi eksperymentami, których wykonanie planuje się na rok przyszły, ale podobne wyniki już w Pracowni Odształceń Skał uzyskiwano na przykład dla piaskowca z Kopalni Węgla Kamiennego „Pniówek” nasyczonego CO_2 .



Rys. 17. Zależność między różnicową granicą wytrzymałości a ciśnieniem porowym, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze; opoka „Benatky” nasączona CO_2

Z trzecim sposobem kształtowania się ciśnienia efektywnego mamy do czynienia wówczas, gdy płynem porowym jest ciecz nieobojętna. W badaniach prowadzonych w Pracowni Odształceń Skał wykorzystywano do tego celu wodę. Jednoznaczne wyniki w przypadku skały nasączonej wodą udało się uzyskać jedynie dla piaskowca „Tumlin” i zostały one opublikowane przez Gustkiewicza et al. [2003]. W tym miejscu należy jednak poczynić następujące uwagi:

- woda, jako substancja fizykochemicznie czynna z pewnością obniża wytrzymałość w stosunku do skały suchej; ten efekt dla piaskowca „Tumlin” pokazano na rys. 1,
- zmiany różnicowej granicy wytrzymałości silnie zależą od ilości zasorbowanego płynu, tymczasem ilość ta, w przypadku cieczy, słabo zależy od ciśnienia, a co za tym idzie ulega niewielkim zmianom ze wzrostem ciśnienia porowego,
- w efekcie jeżeli w skale dominują duże pory dodatkowo uzupełnione powstałymi w wyniku procesu deformacji spękaniami, to skała spełnia warunki Handina i in. [1963] a zmiany różnicowej granicy

wytrzymałości w zależności od ciśnienia porowego zachodzą w sposób, który można uznać za przypadek konwencjonalnego ciśnienia efektywnego; jest to sytuacja pokazana przez Gustkiewicza et al. [2003] na s. 371 – rys. 5.

Jeżeli natomiast przestrzeń porową skały tworzą pory różnych rozmiarów, od makro- do mikro- lub nawet submikroporów, to pojawić się może efekt, który można nazwać „efektem porozymetrycznym”. Polega on na tym, że im wyższe ciśnienie porowe, tym ciecz wnika w coraz mniejsze pory. W konsekwencji ze wzrostem ciśnienia porowego rośnie sumaryczna powierzchnia zwilżona skały i działa efekt Rebintera zmniejszający różnicową granicę wytrzymałości. Taki wynik uzyskano już w Pracowni dla piaskowca z Kopalni Węgla Kamiennego „Pniówek” nasyconego H_2O a można go także znaleźć np. w publikacji Murrella [1965].

Podsumowując można stwierdzić, że wyodrębniono trzy różne sposoby kształtowania się ciśnienia efektywnego na granicy wytrzymałości skały: dla obojętnych płynów porowych (nafta, azot), dla nieobojętnego gazu (CO_2) i dla nieobojętnej cieczy (H_2O), oraz podano prawdopodobne przyczyny zachodzących różnic. W szczególności stwierdzono przypadki, w których współczynnik α występujący przy ciśnieniu porowym może osiągać wartości wyższe niż jeden.

7. Podziękowania

Autorzy czują się zobowiązani podziękować następującym osobom za pomoc okazaną w trakcie omawianych powyżej badań:

- pani mgr inż. Teresie Ratajczak z Pracowni Mikromerytyki IMG PAN za pomoc w sporządzeniu opisu wapienia „Pińczów” oraz analizy obrazów mikroskopowych szlifów cienkich,
- panu dr inż. Romanowi Semyrcze z Zakładu Surowców Energetycznych Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH za wykonanie badań porozymetrycznych wapienia i opoki,
- panu doc. dr hab. Petrovi Martincovi z Instytutu Geoniki Akademii Nauk Republiki Czeskiej za udostępnienie opisów petrograficznych i mineralogicznych opoki.

Literatura

- Biot M.A., 1941: *General theory of three dimensional consolidation*. J. Appl. Phys. 12: 155-168.
- 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*. J. Litwiniszyn (red.). AGH, Kraków, 455-468.
- Detournay E., Cheng A.H.-D., 1993: *Fundamentals of Poroelasticity. Comprehensive rock engineering: principles, practice & projects. Vol. II, Analysis and design method*. C. Fairhurst (ed.), Pergamon Press, 113-171.
- Geertsma J., 1957: *The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks*. Trans. AIME. 210: 331-340.
- Gustkiewicz J., 1998: *Compressibility of rocks with a special consideration given to pore pressure*. Proc. Of the Biot. Conf. on Poromech., Louvain-la-Neuve, 14-16 Sept. 1998, J.-F. Thismus et al. (eds), Balkema, Rotterdam, 573-577.
- 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., Orengo Y., 1990: *Zmiany zachowania węgla pod działaniem wody (w:) Górotwór jako ośrodek wielofazowy*. J. Litwiniszyn (red.). AGH, Kraków, 763-781.
- 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, pp. 401-424.
- 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.
- 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.
- Lasoń M., 1988: *Specific surface of porous material*. Arch. Min. Sci., 33, 475-497.

- Murrell S.A.F., 1965: *The effect of triaxial stress systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures*. Geophys. J. R. Astron. Soc., 10, 231-281.
- 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.
- Paterson M.S., 1998: *Experimental Rock Deformation*. The Brittle Field. Springer Verlag, Berlin–Heidelberg–New York.
- Rajchel J., 2004: *Kamienny Kraków*. Uczelniane Wyd. Nauk.-Dydaktyczne AGH, Kraków, 54-54.
- 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.
- Roegiers J.-C., Cui L., Bai M., 1998: *Porosity applications* (in:) *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Mech. of Joint. and Fault. Rock – MJFR-3, Vienna, Austria, 6-9 April 1998. Hans-Peter Rossmanith (ed.), Balkema, Rotterdam, 39-46.
- Rice J.R., Cleary M.P., 1976: *Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents*. Reviews of Geophysics and Space Physics. 14(4): 227-241.
- Skempton A.W., 1960: *Effective stress in soils, concrete and rocks*. Proc. Conf. on Pore Pres. Sustion in Soils. London, Butterworths, 4-6.
- Terzaghi, 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.
- Zienkiewicz O.C., Shiomi T., 1984: *Dynamic behaviour of saturated porous media; the generalized Biot formulation and its numerical solution*. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech. 8: 71-96.

Shaping of the Effective Pressure in the Rock at the Strength Limit in Triaxial State of Stress – on the base of Laboratory Researches on Cracking and Deformations of selected Rocks

Abstract

In the paper some results of laboratory researches that had been conducted in the years 2003 and 2004 were presented. During those researches an effective pressure at the strength limit of rock was studied as a function of confining pressure and pore pressure. The individual triaxial compression tests with inert and non-inert fluids in the pore space of rock were conducted for three rocks: "Tumlin" sandstone, "Pińczów" limestone and „Benatky” gneiss. Kerosene and nitrogen as non-inert and water and carbon dioxide as inert pore fluids were used in the tests.

Effective pressure at the strength limit was studied as a function of applied pore fluid. Three different ways of shaping of effective pressure were shown: for non-inert fluids (kerosene nitrogen), inert gas (carbon dioxide) and inert liquid (water). Some possible reasons of differences in rock behaviour were presented and discussed.

Keywords: triaxial compression, differential strength limit, confining pressure, pore pressure, effective pressure, conventional effective pressure

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