

Urszula SANETRA

Główny Instytut Górnictwa, Katowice

## Krytyczne i pokrytyczne własności różnoziarnistych piaskowców karbońskich GZW badanych w trójosiowym ściskaniu

### Streszczenie

Artykuł przedstawia badania prowadzone w konwencjonalnym trójosiowym ściskaniu na próbkach grubo-, średnio- i drobnoziarnistych piaskowców karbońskich GZW. Badano wpływ ciśnienia hydrostatycznego (okólnego) na własności fizyko-mechaniczne skał oraz zależności pomiędzy własnościami krytycznymi i pokrytycznymi. Wykazano, że ze wzrostem ciśnienia okólnego najbardziej wzrasta naprężenie resztkowe, co w praktyce oznacza, że spękanie skały mogą przenosić znaczne obciążenia o wartościach uwarunkowanych wartościami ciśnienia hydrostatycznego.

### 1. Wstęp

Znajomość własności mechanicznych skał jest niezbędna w rozwiązywaniu szeregu problemów inżynierskich z zakresu górnictwa oraz budownictwa podziemnego. Eksperymenty takie powinny być prowadzone w warunkach naturalnego zalegania skał, jednakże ze względu na utrudnienia techniczne i duże nakłady finansowe związane ze specjalistyczną aparaturą najczęściej prowadzone są w warunkach laboratoryjnych.

Stan naprężenia górotworu odzwierciedlają badania laboratoryjne skał poddanych trójosiowemu ściskaniu, które prowadzone są na ogół w warunkach konwencjonalnego ściskania przy zastosowaniu komory ciśnieniowej, najczęściej – Karmana. Pierwszy okres badań nad wpływem ciśnienia okólnego na wytrzymałość próbek skalnych i własności naprężeniowo-odkształceniowe skał prowadzono w tzw. miękkich maszynach wytrzymałościowych, w których nie było możliwości prowadzenia badań w stanie pokrytycznym, gdyż uzyskiwano tylko wznoszącą część charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej. Zastosowanie w eksperymentach sztywnej maszyny wytrzymałościowej umożliwiło uzyskanie opadającej części charakterystyki i badanie procesu niszczenia próbek skalnych, a użycie komory ciśnieniowej pozwala śledzić zmiany, jakim ulegają parametry skał zalegających na różnej głębokości, symulowanej w badaniach zadawanym ciśnieniem okólnym.

Na podstawie charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych badanych piaskowców określono następujące parametry: naprężenie krytyczne i resztkowe, odkształcenie krytyczne i resztkowe, moduł odkształcenia podłużnego oraz moduł osłabienia. Znając metrykę wytrzymałościową skał obliczono kąt tarcia wewnętrzznego i spójność.

## 2. Rodzaj skał objętych badaniami

Badaniami objęto różnoziarniste piaskowce karbońskie występujące w Górnos Śląskim Zagłębiu Węglowym pobrane z warstw łaziskich (200), rudzkich (400), siodłowych (500) i porębskich (600).

Poniżej zestawiono typy litologiczne skał objętych badaniami wraz z podaniem ilości przebadanych próbek:

- piaskowiec gruboziarnisty (26 próbek),
- piaskowiec średnioziarnisty (138 próbek),
- piaskowiec drobnoziarnisty (110 próbek).

## 3. Opis badań eksperymentalnych

Badania przedstawione w artykule przeprowadzono w Laboratorium Geomechaniki Górniczej Zakładu Tępań i Mechaniki Górotworu GIG wyposażonym w aparaturę umożliwiającą wykonanie badań w trójosiowym stanie naprężenia metodą konwencjonalnego ściskania  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$ . Badania prowadzono ze stałą prędkością odkształcenia podłużnego  $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \cdot s^{-1}$  przy zadanym ciśnieniu okólnym w zakresie  $p = 0-70$  MPa.

W trakcie eksperymentu wyznaczono również wytrzymałość na rozciąganie w jednoosiowym stanie naprężenia. Wartości wytrzymałości na rozciąganie uwzględniono do wyznaczenia parabolicznej obwiedni kół Mohra dla skały zwięzłej.

W eksperymencie stosowano próbki cylindryczne o średnicy 30 mm i wysokości 60 mm, wykonane zgodnie z normą PN-G-04303. Dla zabezpieczenia próbki badawczej przed penetracją oleju stosowano osłonki gumowe oraz specjalną otulinę termokurczliwą, ściśle przylegającą do powierzchni próbki (rys. 3.1b).

### 3.1. Aparatura

Badania laboratoryjne przeprowadzono przy użyciu sztywnej maszyny wytrzymałościowej MTS 810 NEW, komory ciśnieniowej typu KTK (rys. 3.1), kompresora umożliwiającego utrzymywanie stałego ciśnienia okólnego oraz komputera ze specjalistycznym oprogramowaniem.

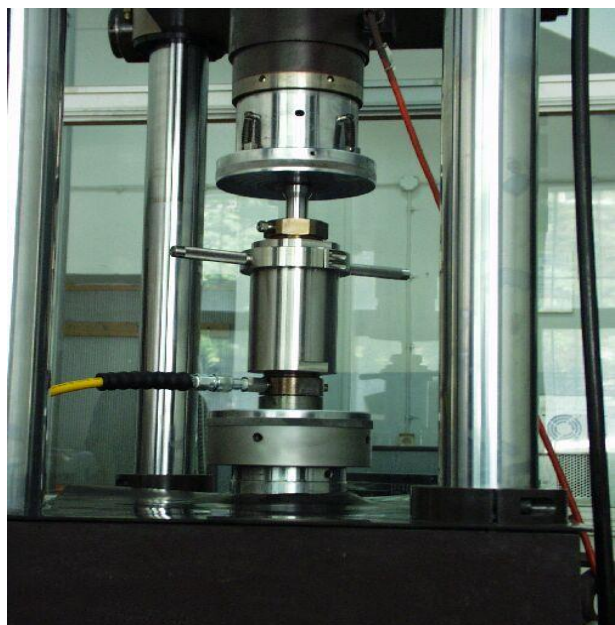
Podczas prowadzenia eksperymentu obciążanie osiowe próbki zwiększano do uzyskania wartości maksymalnej (krytycznej), a następnie w dalszym ciągu obciążano próbkę. W trakcie badania rejestrowano przebieg eksperymentu, aż do całkowitego zniszczenia próbki.

Bezpośrednio po wykonaniu eksperymentu uzyskiwano wydruk z przebiegu badania w postaci charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej z podaniem wartości określanych parametrów.

### 3.2. Charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa

Badania własności naprężeniowo-odkształceniowych skał prowadzono od wielu lat, głównie na podstawie zachowania się materiału skalnego podczas ściskania w maszynie wytrzymałościowej. Ściskana próbka w maszynie stanowi analogon układu: strop – pokład – spąg, co w warunkach laboratoryjnych odpowiada układowi: płyty maszyny wytrzymałościowej – próbka skalna. Zastosowanie do badań sztywnej maszyny wytrzymałościowej umożliwiło

uzyskanie całkowitej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej z częścią wznoszącą i opadającą, opisującej stan przed- i pokrytyczny badanej próbki (Wawersik, Fairhurst 1970; Wawersik, Brace 1971).



a)



b)

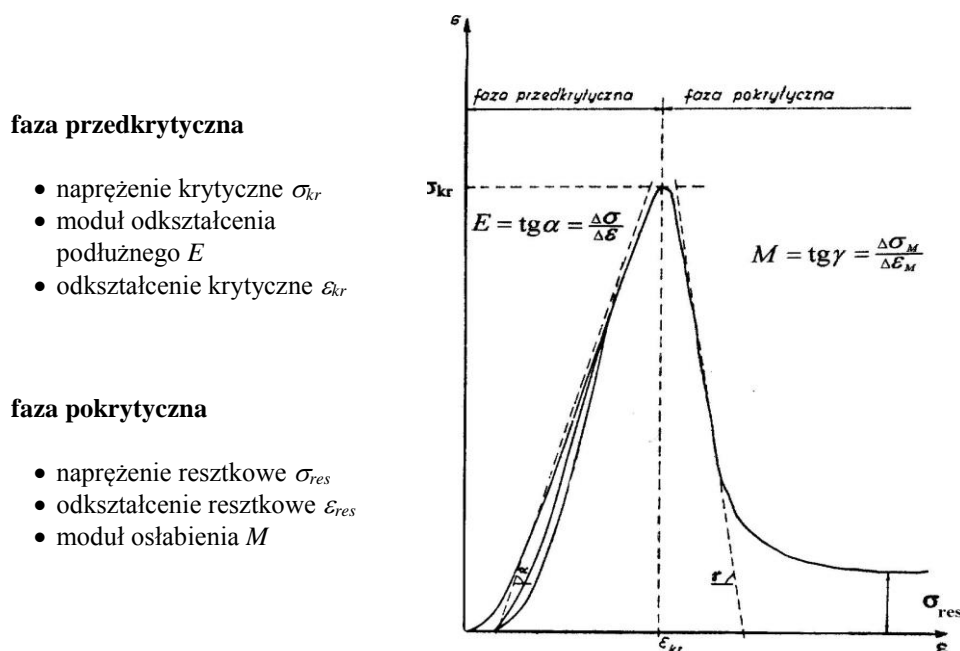
Rys. 3.1. Komora ciśnieniowa typ KTK 70 MPa: a) komora umieszczona w maszynie wytrzymałościowej MTS 810-NEW, b) przygotowanie próbek do badań w komorze  
Fig. 3.1. Pressure chamber 70 MPa type KTK: a) the chamber located in a stiff testing machine MTS 810-NEW, b) preparation of samples to tests in a chamber

### 3.2.1. Wyznaczanie parametrów naprężeniowo-odkształceniowych

Charakterystykę naprężeniowo-odkształceniową uzyskaną z badań prowadzonych w sztywnej maszynie wytrzymałościowej (rys. 3.2) można podzielić na dwie zasadnicze części:

- fazę przedkrytyczną,
- fazę pokrytyczną.

Z przebiegu charakterystyki wyznaczono parametry naprężeniowo-odkształceniowe badanej próbki skalnej.



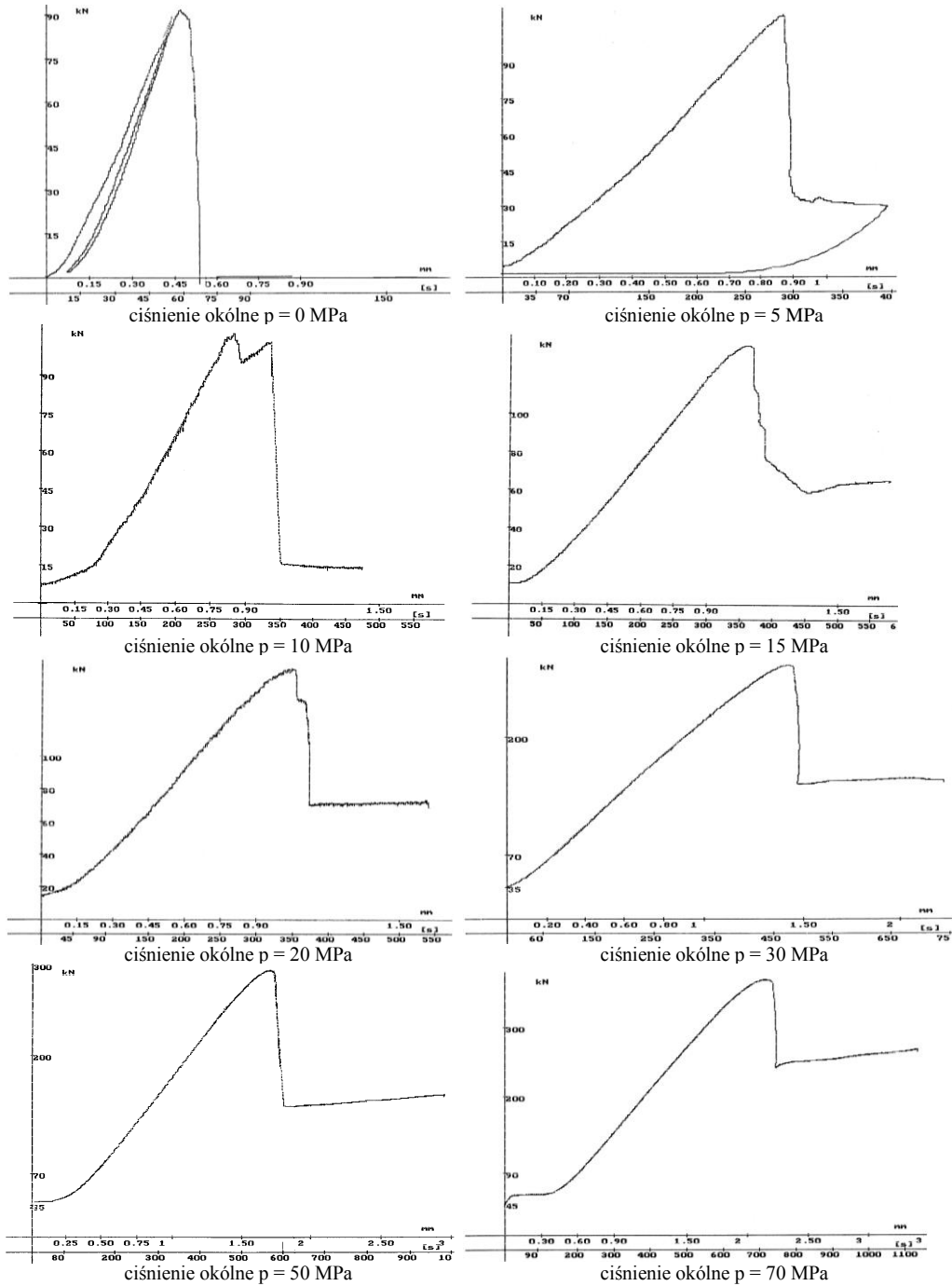
Rys. 3.2. Schemat wyznaczania parametrów naprężeniowo-odkształceniowych w fazie przed- i pokrytycznej

Fig. 3.2. Scheme of stress-strain parameters determination in pre- and post-critical phases

Na wykresach (rys. 3.3) przedstawiono zarejestrowany przebieg badania w postaci krzywej obciążenie – odkształcenie (skrócenie) piaskowca drobnoziarnistego przy różnych wartościach ciśnienia okólnego.

### 3.3. Wyznaczanie kąta tarcia wewnętrznego i spójności

W niniejszym artykule do określenia kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności zastosowano metodę, która zakłada, że obwiednia kół Mohra jest parabolą o równaniu  $y^2 = 2p_p (\sigma_n - R_r)$  obliczoną metodą najmniejszych kwadratów, a wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności obliczane są z równania stycznej do tej paraboli w zadanym punkcie dla skał zwięzłych (faza przedkrytyczna) i spękanych (faza pokrytyczna). W tym celu opracowano komputerowy program (Sanetra, Pacześniowski 2006), według którego oblicza się wartość kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności dla zadanych wartości naprężeń normalnych  $\sigma_n$ .



Rys. 3.3. Charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe dla różnych wartości ciśnienia okólnego próbki piaskowca drobnoziarnistego przy  $p = 0-70$  MPa

Fig. 3.3. Stress-strain characteristics at different values of confining pressure; fine-grained sandstone samples at  $p = 0-70$  MPa

#### 4. Wyniki badań

Przeprowadzone badania laboratoryjne umożliwiły określenie zależności pomiędzy:

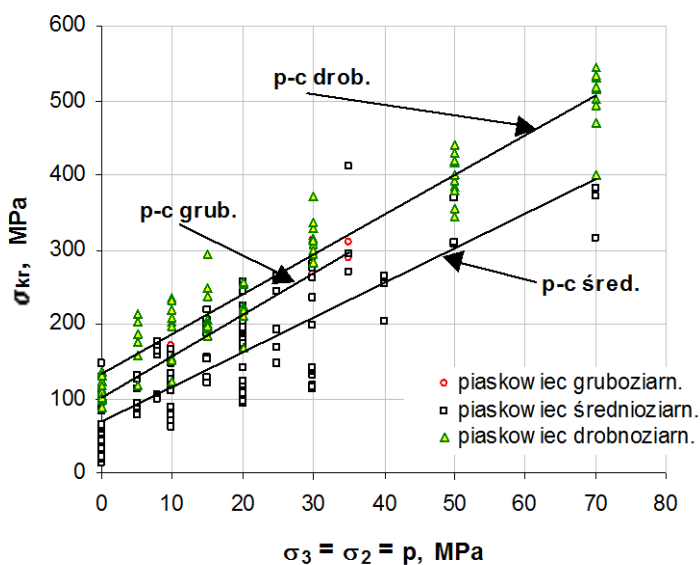
- poszczególnymi parametrami naprężeniowo-odkształceniowymi a wielkością ciśnienia okólnego w zakresie od 0 do 70 MPa, odpowiadającego w przybliżeniu głębokości zalegania skał do 3 000 m,
- przedkrytycznymi i pokrytycznymi własnościami skał,
- kątem tarcia i spójnością a stosowanym ciśnieniem.

##### 4.1. Wpływ ciśnienia okólnego

###### na parametry naprężeniowo-odkształceniowe fazy przedkrytycznej

Dla badanych piaskowców karbońskich określono zależności pomiędzy parametrami naprężeniowo-odkształceniowymi fazy przedkrytycznej, tj. naprężenia krytycznego, odkształcenia krytycznego i modułu odkształcenia podłużnego, a ciśnieniem okólnym w zakresie ciśnienia okólnego od 0 do 70 MPa.

Zależność pomiędzy wartościami naprężenia krytycznego  $\sigma_{kr}$  a ciśnieniem okólnym  $p$   $\sigma_{kr} = f(p)$  badanych skał przedstawiono na rysunku 4.1.



Rys. 4.1. Naprężenie krytyczne  $\sigma_{kr}$  jako funkcja ciśnienia okólnego  $p$   
Fig. 4.1. Critical stress  $\sigma_{kr}$  as a function of confining pressure  $p$

Analiza otrzymanych charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych oraz wyników przeprowadzonych badań pozwala stwierdzić, że wzrost ciśnienia okólnego powoduje wzrost maksymalnej siły niszczącej, a więc wartości naprężenia krytycznego. Zależność pomiędzy naprężeniem krytycznym a ciśnieniem okólnym dla badanych piaskowców – grubo- (p-c grub.), średnio- (p-c śred.) i drobnoziarnistych (p-c drob.) – w zakresie stosowanego ciśnienia okólnego (od 0 do 70 MPa) najlepiej opisuje funkcja liniowa:

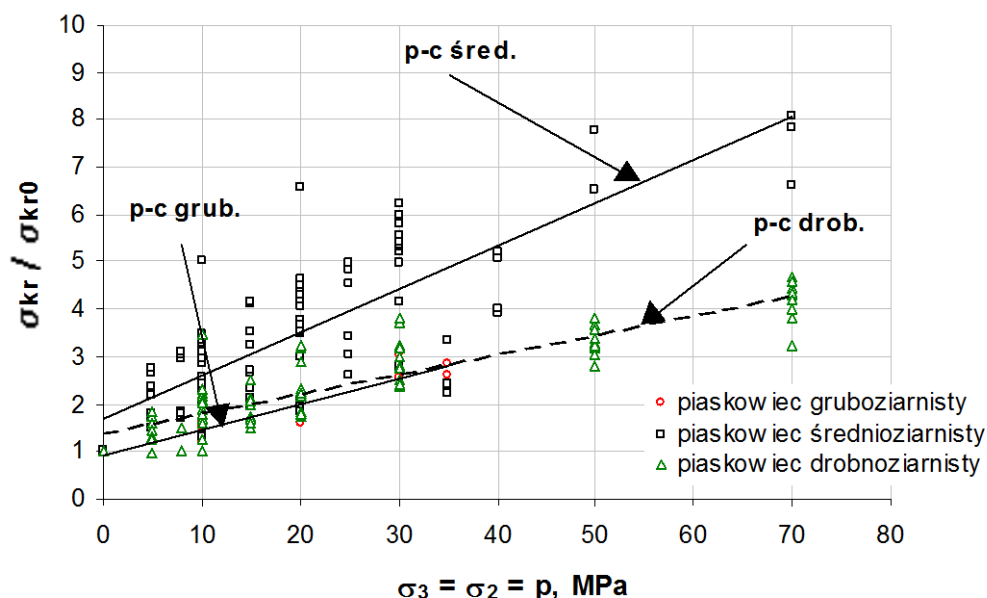
piaskowiec gruboziarnisty:	$\sigma_{kr} = 5,563p + 102,06;$	$r = 0,9676$
piaskowiec średnioziarnisty:	$\sigma_{kr} = 4,6516p + 70,312;$	$r = 0,8223$
piaskowiec drobnoziarnisty:	$\sigma_{kr} = 5,3198p + 133,56;$	$r = 0,9650$

Współczynniki korelacji  $r$  dla zależności  $\sigma_{kr} = f(p)$  wszystkich badanych skał są duże, i dla rozpatrywanych przypadków są znacznie wyższe od wartości granicznych (Volk 1973).

Pod wpływem wzrostu ciśnienia okólnego do 30 MPa (odpowiadającemu głębokości zalegania 1200 m) wartość naprężenia krytycznego wzrosła, dla badanych skał płonnych, około 2,8-krotnie w stosunku do wartości uzyskanych w jednoosiowym stanie naprężenia dla piaskowca gruboziarnistego, nieco więcej dla piaskowca drobnoziarnistego (około 3,2-krotnie). Największy wpływ ciśnienia okólnego na wzrost naprężenia krytycznego, około 5-krotny nastąpił dla piaskowca średnioziarnistego. Można zatem wnioskować, tak jak Gustkiewicz (1990), że wzrost wytrzymałości skał płonnych zależy od składu mineralnego skał, wykształcenia ziarn oraz rodzaju spoiwa, a głównie od rodzaju minerałów ilastych zawartych w spoiwie. Największy wzrost  $\sigma_{kr}$  zaobserwowano dla słabych skał ( $\sigma_{kr0}$  ok. 20 MPa), gdzie ciśnienie okólnie  $p = 30$  MPa spowodowało 5,6 i 5,3-krotny wzrost naprężenia krytycznego w stosunku do naprężenia uzyskanego przy ciśnieniu  $p = 0$  MPa.

Otrzymane wyniki są zgodne z wcześniejszymi badaniami prowadzonymi przez autorkę (Sanetra 1994; Krzysztoń i in. 1998), w których największy wzrost naprężenia krytycznego pod wpływem ciśnienia okólnego obserwowano w skałach o niskiej wytrzymałości w jednoosiowym stanie naprężenia.

Na rysunku 4.2 przedstawiono wzrost naprężenia krytycznego  $\sigma_{kr}$  względem wytrzymałości na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia  $\sigma_{kr0}$  dla badanych piaskowców.



Rys. 4.2. Względna wartość naprężenia krytycznego  $\sigma_{kr} / \sigma_{kr0}$  jako funkcja ciśnienia okólnego  $p$   
 Fig. 4.2. Relative value of critical stress  $\sigma_{kr} / \sigma_{kr0}$  as a function of confining pressure  $p$

Zależność  $\sigma_{kr}/\sigma_{kr0} = f(p)$  można opisać funkcją liniową uzyskując wysokie współczynniki korelacji.

piaskowiec gruboziarnisty:	$\sigma_{kr}/\sigma_{kr0} = 0,0536p + 0,9272;$	$r = 0,9467$
piaskowiec średnioziarnisty:	$\sigma_{kr}/\sigma_{kr0} = 0,091p + 1,7119;$	$r = 0,802$
piaskowiec drobnoziarnisty:	$\sigma_{kr}/\sigma_{kr0} = 0,0416p + 1,4104;$	$r = 0,8675$

Na podstawie wyników badań oraz przebiegu krzywych przedstawionych na rysunku 3.3 można stwierdzić, że wzrost ciśnienia okólnego powoduje również wzrost wartości odkształcenia krytycznego  $\varepsilon_{kr}$  wszystkich badanych skał. Zależność ta jest liniowa, równania regresji  $\varepsilon_{kr} = f(p)$  dla badanych skał oraz współczynniki korelacji zestawiono poniżej.

piaskowiec gruboziarnisty:	$\varepsilon_{kr} = 0,2901p + 13,364;$	$r = 0,9314$
piaskowiec średnioziarnisty:	$\varepsilon_{kr} = 0,4311p + 10,253;$	$r = 0,9064$
piaskowiec drobnoziarnisty:	$\varepsilon_{kr} = 0,3211p + 12,132;$	$r = 0,9123$

Największy przyrost odkształcenia krytycznego uzyskano w zakresie ciśnienia okólnego  $p$  od 0 do 5 MPa; nastąpił wówczas około 1,5-krotny wzrost w stosunku do wartości początkowej, co potwierdzają wcześniejsze eksperymenty (Sanetra 2004). Zaobserwowano również, że większy wzrost odkształcenia krytycznego przy ciśnieniu 70 MPa (około 4-krotny) następuje w skałach o mniejszym uziarnieniu. Liniową zależność wzrostu odkształceń w miarę zwiększania ciśnienia okólnego dla piaskowców otrzymał także Kwaśniewski (1983).

Zależność pomiędzy modułem odkształcenia podłużnego  $E$  a ciśnieniem okólnym  $p$  najlepiej opisuje funkcja wykładnicza:

piaskowiec gruboziarnisty:	$E = 11,709e^{0,01p};$	$r = 0,8103$
piaskowiec średnioziarnisty:	$E = 8,8428e^{0,008p};$	$r = 0,2903$
piaskowiec drobnoziarnisty:	$E = 13,031e^{0,003p};$	$r = 0,2692$

Niskie współczynniki korelacji uzyskano dla piaskowca średnio- i drobnoziarnistego, ale i w tym przypadku zależność jest istotna. Moduł odkształcenia podłużnego większości badanych skał wzrasta nieznacznie (około 1,3÷2,0-krotnie) wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego. Jedynie dla mocnego piaskowca drobnoziarnistego nastąpił niewielki spadek modułu  $E$  wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego.

Wpływ ciśnienia okólnego na moduł odkształcenia podłużnego jest przez badaczy różnie interpretowany. Mogi (Tajduś 1990) przyjmuje, że moduł odkształcenia podłużnego ma wartość stałą, niezależną od ciśnienia okólnego. Kwaśniewski (1983) uważa, że wzrost wartości modułu  $E$  jest tym silniejszy im większa jest porowatość skały. Badając piaskowce stwierdził, że przy wzroście ciśnienia od 0 do 40 MPa moduł  $E$  piaskowca grubo- i bardzo gruboziarnistego rośnie o około 35%, a drobnoziarnistego o około 45% w zakresie ciśnienia od 0 do 20 MPa, powyżej tego ciśnienia przyjmuje wartość stałą.

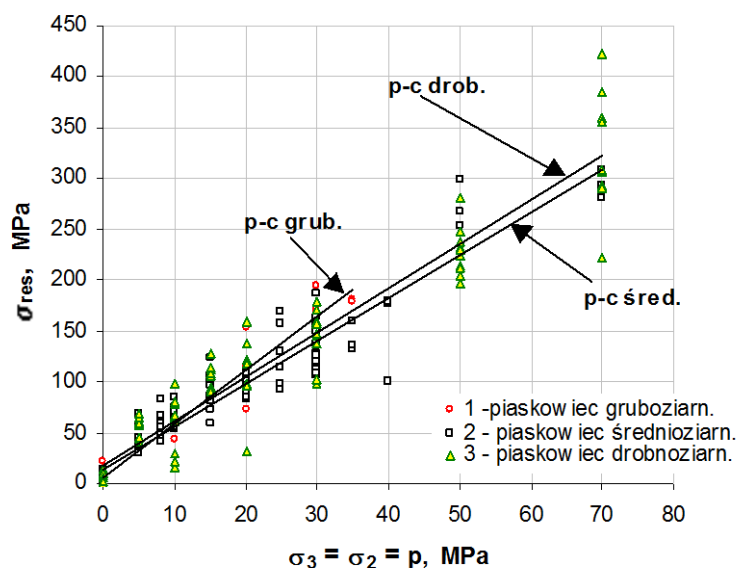


#### 4.2. Wpływ ciśnienia okólnego

##### na parametry naprężeniowo-odkształceniowe fazy pokrytycznej

Badania w sztywnej maszynie wytrzymałościowej umożliwiły określenie parametrów naprężeniowo-odkształceniowych fazy pokrytycznej, a następnie wyznaczenie zależności parametrów: naprężenia resztkowego  $\sigma_{res}$ , odkształcenia resztkowego  $\epsilon_{res}$  i modułu osłabienia  $M$  od wartości stosowanego ciśnienia okólnego.

Uzyskane zależności liniowe dla naprężenia resztkowego  $\sigma_{res}$  jako funkcji ciśnienia okólnego  $p$  przedstawiono poniżej (rys. 4.3).



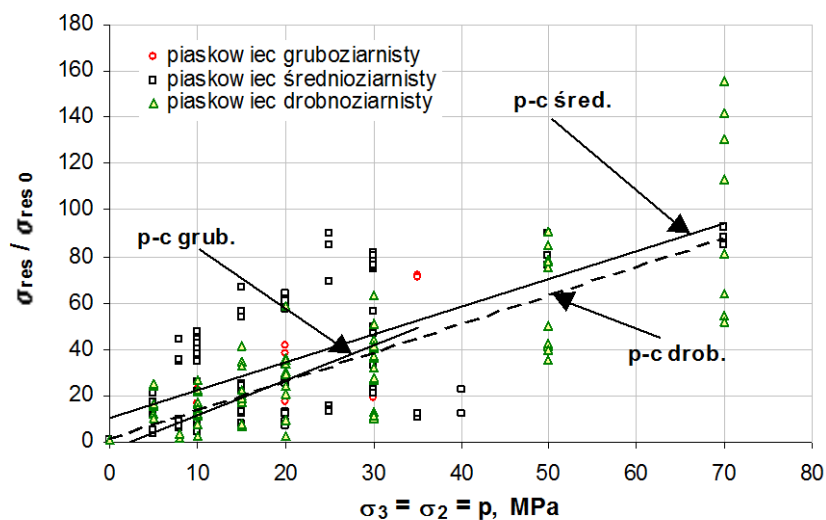
Rys. 4.3. Naprężenie resztkowe  $\sigma_{res}$  jako funkcja ciśnienia okólnego  $p$   
 Fig. 4.3. Residual stress  $\sigma_{res}$  as a function of confining pressure  $p$

piaskowiec gruboziarnisty:	$\sigma_{res} = 5,2847p + 6,2322;$	$r = 0,9358$
piaskowiec średnioziarnisty:	$\sigma_{res} = 4,198p + 13,844;$	$r = 0,9556$
piaskowiec drobnoziarnisty:	$\sigma_{res} = 4,3442p + 18,321;$	$r = 0,9534$

Duże współczynniki korelacji dowodzą, że istnieje liniowa zależność pomiędzy wytrzymałością resztkową a ciśnieniem okólnym.

Badając wpływ ciśnienia okólnego na parametry naprężeniowo-odkształceniowe można stwierdzić, że naprężenie resztkowe jest parametrem, który najbardziej zmienia się w zakresie stosowanego ciśnienia okólnego. W badanym zakresie ciśnień od 0 do 70 MPa naprężenie resztkowe w stosunku do wartości naprężenia resztkowego uzyskanego przy ciśnieniu  $p = 0$  MPa wzrasta ponad stukrotnie. Największy wzrost wartości naprężenia resztkowego przy ciśnieniu okólnym  $p = 70$  MPa w stosunku do wartości naprężenia resztkowego uzyskanego w jednoosiowym stanie naprężenia zaobserwowano u piaskowca drobnoziarnistego (około 125-krotny).

Na rysunku 4.4 przedstawiono zmianę ilorazu naprężenia resztkowego do naprężenia resztkowego w jednoosiowym stanie naprężenia ( $p = 0$  MPa) w zależności od ciśnienia okólnego.



Rys. 4.4. Względna wartość naprężenia resztkowego  $\sigma_{res} / \sigma_{res0}$  jako funkcja ciśnienia okólnego  $p$   
 Fig. 4.4. Relative value of residual stress  $\sigma_{res} / \sigma_{res0}$  as a function of confining pressure  $p$

piaskowiec gruboziarnisty:	$\sigma_{res} / \sigma_{res0} = 1,4884p - 3,0577;$	$r = 0,7493$
piaskowiec średnioziarnisty:	$\sigma_{res} / \sigma_{res0} = 1,2042p + 10,03;$	$r = 0,6253$
piaskowiec drobnoziarnisty:	$\sigma_{res} / \sigma_{res0} = 1,2284p + 2,147;$	$r = 0,8152$

Zmiana ciśnienia okólnego ma również wpływ na zmianę odkształcenia resztkowego, jednak wpływ ten jest znacznie mniejszy niż w przypadku parametrów naprężeniowych.

Z przeprowadzonych badań wynika, że zależność  $\epsilon_{res} = f(p)$  dla wszystkich badanych piaskowców najlepiej opisuje równanie liniowe:

piaskowiec gruboziarnisty:	$\epsilon_{res} = 0,4713p + 16,405;$	$r = 0,8729$
piaskowiec średnioziarnisty:	$\epsilon_{res} = 0,4216p + 14,057;$	$r = 0,8268$
piaskowiec drobnoziarnisty:	$\epsilon_{res} = 0,4381p + 14,387;$	$r = 0,8986$

Większy wpływ ciśnienia okólnego na odkształcenie zaobserwowano dla piaskowca drobnoziarnistego, gdzie przy wzroście ciśnienia okólnego do 70 MPa następuje około 5-krotny wzrost odkształcenia resztkowego.

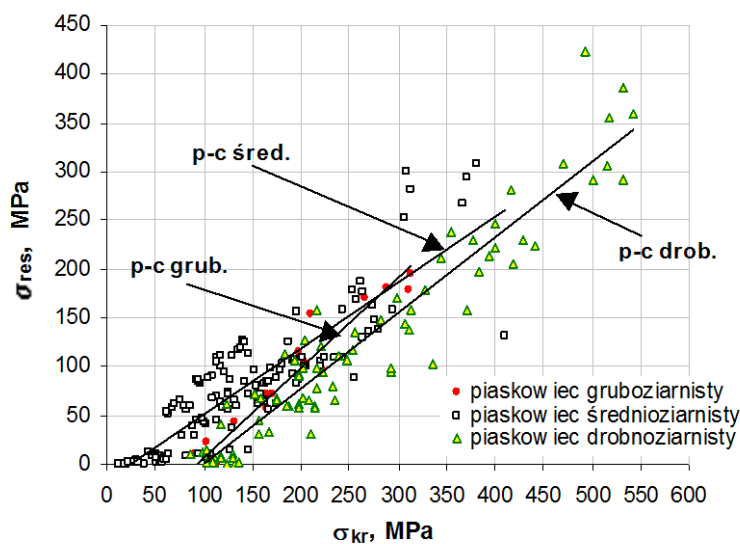
Oceniając wpływ wzrostu ciśnienia okólnego na moduł osłabienia  $M$  można stwierdzić, że istnieje słaba zależność modułu osłabienia od ciśnienia okólnego dla piaskowców, najlepiej opisuje ją funkcja wielomianu drugiego stopnia.

piaskowiec gruboziarnisty:	$M = -0,033p^2 + 1,6352p + 14,41;$	$r = 0,7080$
piaskowiec średnioziarnisty:	$M = 0,0026p^2 - 0,355p + 22,944;$	$r = 0,2828$
piaskowiec drobnoziarnisty:	$M = 0,0146p^2 - 1,4241p + 82,104;$	$r = 0,2798$

Moduł osłabienia piaskowców generalnie maleje ze wzrostem stosowanego ciśnienia od około 1,4 do 0,5-krotnie w stosunku do wartości modułu  $M$  uzyskanego przy ciśnieniu  $p$  wynoszącym 0 MPa. Większy spadek modułu  $M$  zaobserwowano dla piaskowców drobnoziarnistych.

#### 4.3. Zależności pomiędzy krytycznymi i pokrytycznymi własnościami skal

Rozpatrując zależność pomiędzy naprężeniem resztkowym  $\sigma_{res}$  a naprężeniem krytycznym  $\sigma_{kr}$ , przy zadanym ciśnieniu okólnym  $p$ , można stwierdzić, że istnieją pomiędzy tymi parametrami zależności w postaci funkcji liniowej (rys. 4.5) o współczynnikach korelacji mieszczących się w przedziale od 0,87 do 0,97.



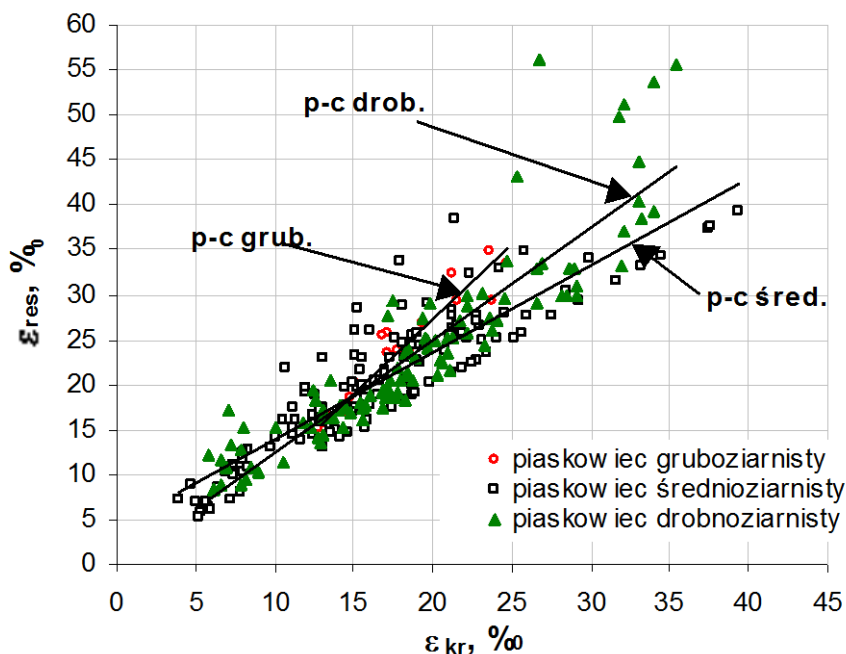
Rys. 4.5. Zależność  $\sigma_{res} = f(\sigma_{kr})$   
 Fig. 4.5. Dependence  $\sigma_{res} = f(\sigma_{kr})$

piaskowiec gruboziarnisty:	$\sigma_{res} = 0,9227\sigma_{kr} - 85,88;$	$r = 0,9710$
piaskowiec średnioziarnisty:	$\sigma_{res} = 0,6776\sigma_{kr} - 17,761;$	$r = 0,8725$
piaskowiec drobnoziarnisty:	$\sigma_{res} = 0,7788\sigma_{kr} - 79,313;$	$r = 0,9540$

Analizując stosunek naprężenia resztkowego do naprężenia krytycznego jako funkcji ciśnienia okólnego stwierdzono, że największy wzrost  $\sigma_{res}/\sigma_{kr}$  następuje przy wzroście ciśnienia okólnego do 5 MPa. Dalszy wzrost ciśnienia okólnego powoduje na ogół łagodny wzrost wartości  $\sigma_{res}/\sigma_{kr}$ . Większy wzrost stosunku naprężenia resztkowego do naprężenia krytycznego spowodowany wzrostem ciśnienia okólnego zaobserwowano u piaskowców charakteryzujących się małą wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie  $\sigma_{kr0}$ , dla których przy wzroście ciśnienia do 30 MPa naprężenie resztkowe stanowiło  $0,90 \sigma_{kr}$ . Najmniejszy wzrost stosunku  $\sigma_{res}/\sigma_{kr}$  zaobserwowano dla mocnych piaskowców drobnoziarnistych.

Wzrost ciśnienia okólnego powoduje zmianę zarówno odkształcenia krytycznego jak i resztkowego. Zależność pomiędzy tymi odkształceniami najlepiej opisuje funkcja liniowa (rys. 4.6), która ma postać:

piaskowiec gruboziarnisty:	$\varepsilon_{res} = -1,6651\varepsilon_{kr} - 6,0054;$	$r = 0,9606$
piaskowiec średnioziarnisty:	$\varepsilon_{res} = 0,9637\varepsilon_{kr} + 4,264;$	$r = 0,8992$
piaskowiec drobnoziarnisty:	$\varepsilon_{res} = 1,2494\varepsilon_{kr} + 0,0082;$	$r = 0,9019$



Rys. 4.6. Zależność  $\varepsilon_{res} = f(\varepsilon_{kr})$   
 Fig. 4.6. Dependence  $\varepsilon_{res} = f(\varepsilon_{kr})$

Największa wartość  $\varepsilon_{res}/\varepsilon_{kr}$  występuje w jednoosiowym stanie naprężenia ( $p = 0$  MPa), gdzie przyjmuje wartość od 1,15 do 1,86. Pod wpływem wzrostu ciśnienia okólnego różnice pomiędzy odkształceniami są coraz mniejsze, przy wartości ciśnienia okólnego do 30 MPa stosunek  $\varepsilon_{res}/\varepsilon_{kr} = 1,03 \div 1,44$ .

Wzrost ciśnienia okólnego nie wpływa znacząco na moduł odkształcenia podłużnego, natomiast wpływa na zmniejszenie się modułu osłabienia. Stosunek  $M/E$  – ze wzrostem ciśnienia okólnego  $p = 0 \div 70$  MPa – zmienia się od 5,2 do 1,1.

#### 4.4. Wpływ naprężenia normalnego na wartość kąta tarcia wewnętrznego i spójności

Mając określone dla danego rodzaju skały równanie obwiedni parabolicznej kół Mohra można wyznaczyć metodą stycznych do obwiedni zmianę wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  i zmianę wartości spójności  $c$  w funkcji naprężenia normalnego  $\sigma_n$ .

Z przeprowadzonej analizy zależności  $\phi = f(\sigma_n)$  dla wszystkich badanych piaskowców wynika, że ze wzrostem naprężenia normalnego wartość kąta tarcia wewnętrznego ulega

zmniejszeniu zarówno dla skał zwięzłych, jak i spękanych oraz, że wartość kąta tarcia wewnętrznego zależy od typu litologicznego skały. Wyniki te potwierdzają wcześniejsze badania (Kidybiński 1982; Sanetra 2002; Krzysztof, Sanetra 2003; Sanetra 2004).

W tabeli 4.1 zestawiono wartości kąta tarcia i spójności zwięzłych i spękanych piaskowców obliczone dla naprężenia normalnego  $\sigma_n = 100$  MPa.

Tabela 4.1.

Zestawienie wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności zwięzłych i spękanych piaskowców przy  $\sigma_n = 100$  MPa

Table 4.1.

List of values of internal friction angle and cohesion for intact and fractured sandstones for  $\sigma_n = 100$  MPa

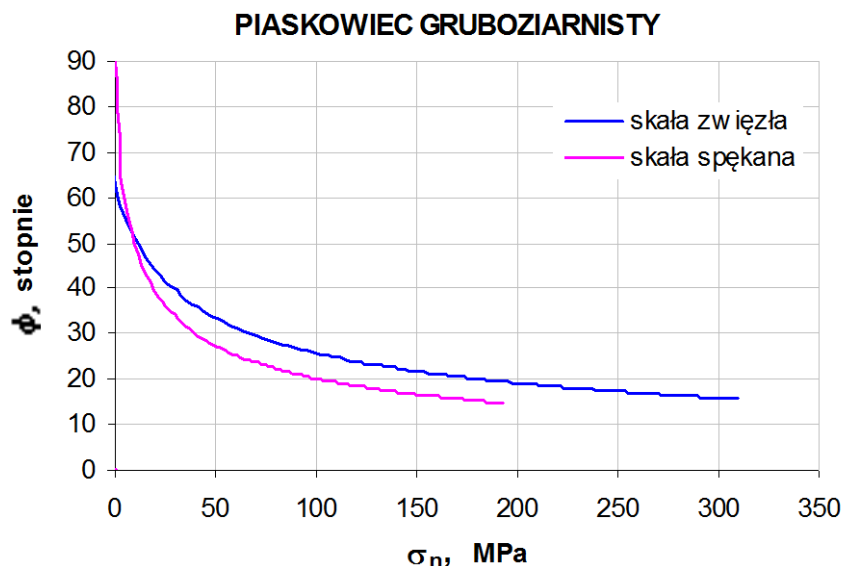
piaskowiec gruboziarn.	Nr pr.	faza przedkrytyczna			faza pokrytyczna		
		$\sigma_{kr}$ (MPa) przy $p = 0$ MPa	$\phi$ (stopnie)	c (MPa)	$\sigma_{resz}$ (MPa) przy $p = 0$ MPa	$\phi$ (stopnie)	c (MPa)
piaskowiec gruboziarn.	1	103,2	26°04'	55,4	9,10	19°54'	36,2
	2	109,8	26°59'	57,1	2,53	19°35'	35,6
piaskowiec średnioziarnisty	3	21,6	15°09'	28,3	1,42	13°32'	24,1
	4	26,2	16°43'	31,2	1,57	14°52'	26,5
	5	99,7	25°42'	56,9	6,60	16°55'	30,4
	6	53,2	27°16'	54,2	1,87	19°02'	34,5
	7	122,4	27°25'	60,8	13,21	15°58'	28,6
	8	51,8	23°07'	46,9	8,0	16°00'	28,7
	9	47,3	25°59'	53,1	3,32	22°45'	41,9
	10	55,9	23°08'	45,5	7,23	14°38'	26,1
piaskowiec drobnoziarn.	11	44,2	19°21'	37,6	3,27	15°35'	27,9
	12	103,1	26°30'	56,5	15,88	21°01'	38,4
	13	96,5	27°25'	58,4	12,46	16°14'	29,1
	14	116,2	31°39'	70,6	5,61	22°27'	41,3
	15	123,2	30°19'	66,7	2,72	22°49'	42,1

Wśród przebadanych skał zaobserwowano, że piaskowce drobnoziarniste charakteryzują się większą wartością kąta tarcia wewnętrznego w stosunku do piaskowców o większych ziarnach oraz, że kąt tarcia wewnętrznego i spójność piaskowców ma wartość wyższą dla skał charakteryzujących się wyższą wytrzymałością.

Z przeprowadzonych badań można wnioskować, że dla wszystkich przebadanych skał wartość kąta tarcia wewnętrznego skały spękanej jest mniejsza niż skały zwięzłej. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że kąt tarcia wewnętrznego zarówno dla skał zwięzłych jak i spękanych, poddanych mniejszym ciśnieniom (zalegających na niewielkich głębokościach) jest większy w stosunku do tych skał zalegających na znacznych głębokościach.

Pod wpływem wzrostu ciśnienia okólnego do 70 MPa obserwuje się zmniejszenie wartości kąta tarcia wewnętrznego skał zwięzłych do około 50% w stosunku do wartości kąta przy ciśnieniu  $p = 10$  MPa. Nieco większy spadek wartości kąta obserwuje się dla skał spękanych. Zmiany te zależą od typu litologicznego skał oraz stopnia spękania skał. Większy spadek wartości kąta  $\phi$  zaobserwowano dla skał grubiej uziarnionych oraz skał zwięzłych (Sanetra 2004).

Przykładowo na rysunku 4.7 przedstawiono zależność  $\phi = f(\sigma_n)$  dla zwięzłego i spękanego (w stanie pokrytycznym) piaskowca gruboziarnistego.



Rys. 4.7. Kąt tarcia wewnętrzznego  $\phi$  skał zwięzłych i spękanych jako funkcja naprężenia normalnego  $\sigma_n$  spąg pokł. 416 KWK „Sośnica”  
Fig. 4.7. Internal friction angle  $\phi$  of intact and fractured rocks as a function of normal stress  $\sigma_n$  floor of seam 416 – KWK Sośnica

Badania dotyczące wpływu ciśnienia okólnego na zmianę wartości kąta tarcia wewnętrznego prowadził m.in. Kwaśniewski (1983), który wykazał, że przy wzroście ciśnienia okólnego od 0 do 60 MPa wartość kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  zmniejszała się dla piaskowca drobno- i średnioziarnistego od  $58^\circ$  do  $22^\circ$ , dla piaskowca średnioziarnistego od  $60^\circ$  do  $8^\circ$ , a dla piaskowca gruboziarnistego od  $56^\circ$  do  $4^\circ$ . Stwierdził on, że „piaskowce będące skałami kruchymi w stanie naprężeń bliskich jednoosiowym w miarę zwiększania ciśnienia okólnego przejawiają w coraz większym stopniu cechę plastyczności. Dla grubiej uziarnionych odmian piaskowca właściwe są mniejsze wartości kąta tarcia wewnętrznego i większe tempo ich spadku w miarę zwiększania ciśnienia okólnego”.

Wyniki badań dowiodły również, że spójność skały spękanej jest zazwyczaj znacznie mniejsza w stosunku do spójności skały zwięzłej. Jest to zgodne z doświadczeniami wytrzymałościowymi, które zostały przeprowadzone przez innych badaczy (Kidybiński 1982; Kwaśniewski 1983). Wykazały one, że wskutek obecności spękań spójność (kohezja) znacznie spada. Natomiast w mniejszym stopniu spękania wywierają wpływ na wartość kąta tarcia wewnętrznego.

Wraz ze wzrostem naprężenia normalnego do 70 MPa obserwuje się wzrost spójności dla skał zwięzłych około 1,8÷2,3-krotny w stosunku do wartości występujących w jednoosiowym stanie naprężenia.

## 5. Podsumowanie wyników badań

Zastosowanie w badaniach różnych ciśnień okólnych umożliwiło przeanalizowanie wpływu ciśnienia na parametry naprężeniowo-odkształceniowe fazy przedkrytycznej, krytycznej i pokrytycznej oraz na wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności piaskowców karbońskich GZW.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

- Dla wszystkich badanych piaskowców wzrost ciśnienia okólnego w zakresie od 0 do 70 MPa powoduje zmianę wartości badanych parametrów naprężeniowo-odkształceniowych (naprężenia krytycznego, naprężenia resztkowego, odkształcenia krytycznego, odkształcenia resztkowego, modułu odkształcenia podłużnego, modułu osłabienia) oraz kąta tarcia wewnętrznego i spójności.
- Zmiana wartości poszczególnych parametrów zależy od wykształcenia litologicznego badanych skał oraz zakresu stosowanego ciśnienia okólnego.
- Istnieje zależność funkcyjna pomiędzy badanymi parametrami a ciśnieniem okólnym.
- Zależność pomiędzy uzyskanymi wynikami eksperymentalnymi a ciśnieniem okólnym aproksymowano najczęściej funkcją liniową, sporadycznie funkcją wykładniczą i wielomianem drugiego stopnia, uzyskując duże wartości współczynnika korelacji.
- Naprężenie krytyczne badanych skał rośnie ze wzrostem stosowanego ciśnienia okólnego: dla piaskowców od 2,8 do 5-krotnie w stosunku do wartości naprężenia krytycznego w jednoosiowym stanie naprężenia.
- Największy wpływ wzrostu ciśnienia okólnego obserwuje się w przypadku naprężenia resztkowego. Dla skał kruchych, do których zalicza się piaskowce, naprężenie resztkowe wzrasta 80÷125-krotnie w stosunku do wartości występujących w jednoosiowym stanie naprężenia.
- Zmiany ciśnienia okólnego wpływają również na zmiany wartości odkształcenia krytycznego i resztkowego. Pod wpływem wzrostu ciśnienia okólnego do 70 MPa w piaskowcach o mniejszym uziarnieniu następuje 4-krotny wzrost wartości tych parametrów w stosunku do wartości początkowych uzyskanych przy  $p = 0$  MPa.
- Moduł odkształcenia podłużnego nie wykazuje jednoznacznych zmian wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego. Natomiast moduł osłabienia ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego.
- W większości przypadków obserwuje się większy przyrost wartości poszczególnych parametrów w zakresie niskiego ciśnienia okólnego od 0 do 10 MPa, niż przy dalszym wzroście ciśnienia okólnego do 70 MPa.
- Wartość kąta tarcia wewnętrznego zależy od typu litologicznego skały i zmniejsza się wraz ze wzrostem naprężenia normalnego.
- Wartość kąta tarcia wewnętrznego skał spękanych znajdujących się w fazie pokrytycznej jest mniejsza od wartości kąta tarcia wewnętrznego skał znajdujących się w fazie przedkrytycznej.
- Spójność skały spękanej jest znacznie mniejsza w stosunku do spójności skały zwięzłej.

## Literatura

- [1] Gustkiewicz J. 1990: Deformacje i wytrzymałość skał w trójosiowym stanie naprężenia z uwzględnieniem płynów porowych. Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe, tom 1, PAN, Instytut Mech.Górotworu, Wydawnictwo AGH Kraków, 97–135.
- [2] Kidybiński A. 1982: Podstawy geotechniki kopalnianej, Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- [3] Krzysztoń D., Sanetra U., Szedel D. 1998: Krytyczne i pokrytyczne własności próbek skalnych badanych w konwencjonalnym trójosiowym ściskaniu w sztywnej maszynie wytrzymałościowej. V Konferencja Naukowo-Techniczna TĄPANIA '98, Ustroń 1998, 69–80.
- [4] Krzysztoń D., Sanetra U. 2003: Investigations of rocks under triaxial compression at confining pressure from 0 to 70 MPa. Archiwum Górnictwa 48, 2, 231–253.
- [5] Kwaśniewski M. 1983: Odształceniowe i wytrzymałościowe własności trzech strukturalnych odmian piaskowców karbońskich w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania. Archiwum Górnictwa, tom 28, zeszyt 4, 524–550.
- [6] Sanetra U. 1994: Wpływ ciśnienia bocznego na własności mechaniczne skał Górnosląskiego Zagłębia Węglowego w warunkach trójosiowego ściskania. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej nr 65, seria Konferencje nr 33, 183–191.
- [7] Sanetra U. 2002: Kąt tarcia wewnętrznego i spójność skał zwięzłych i spękanych. Wydawnictwo IGSMiE PAN Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią. Warsztaty górnicze nt. Problematyka inżynierska z zakresu ochrony terenów górniczych. Sympozja i konferencje nr 55, Ustroń 27–29 maja 2002, 393–404.
- [8] Sanetra U. 2004: Określenie nośności filarów oporowych w stanie pokrytycznym na podstawie badań trójosiowego ściskania karbońskich próbek skalnych, praca doktorska, Katowice, GIG.
- [9] Sanetra U., Pacześniowski K. 2006: Obliczanie kąta tarcia wewnętrznego i kohezji metodą stycznych do obwiedni kół Mohra w postaci paraboli (w druku).
- [10] Tajduś A., 1990: Utrzymanie wyrobisk korytarzowych w świetle wpływu czasu na naprężenia, odształcenia i strefy zniszczenia w górotworze. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo z.154.
- [11] Volk W. 1973: Statystyka stosowana dla inżynierów, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [12] Wawersik R., Fairhurst C. 1970: A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. Int.J. Rock Mech. Min.Sci. no 6, vol. 7, 561–575.
- [13] Wawersik W.R., Brace W.F., 1971: Post-failure behaviour of granite and diabase. Rock Mechanics and Rock Engineering no 3.

## **Critical and post-critical properties of various-grained Carbon sandstones tested in triaxial compression**

The tests conducted in a conventional triaxial compression for coarse-, middle- and fine-grained samples of the Upper Silesian Coal Basin are presented in the paper. The influence of confining pressure on physico-mechanical rock properties were tested as well as the relations between the critical and post-critical properties were determined. It was shown that with the increase of confining pressure the residual stress rises mostly which means in practice that the fractured rocks may transfer high loads of the values related to the values of hydrostatic pressure.

*Przekazano: 17 marca 2006 r.*