

Wpływ prędkości zmian ciśnienia hydrostatycznego na wyniki drenowanego testu ścisłości

ANDRZEJ NOWAKOWSKI, JANUSZ NURKOWSKI

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

Streszczenie

Praca zawiera omówienie wyników badań wpływu prędkości zmian ciśnienia na wynik drenowanego eksperymentu ścisłości. Wykonano serię testów ścisłości próbek piaskowca nasączonego naftą, dla różnych wartości prędkości kompresji i dekompresji cieczy ciśnieniowej wypełniającej komorę. Wykazano, że przy wolnych zmianach ciśnienia cieczy, ciśnienie w porach próbki nadąża za jego zmianami. Potwierdzeniem jest brak histerezy na wykresie *odkształcenie próbki vs ciśnienie płynu w komorze*. Przy szybkich zmianach ciśnienia cieczy w komorze, ciśnienie wewnątrz próbki jest względem niego opóźnione, czyli podczas kompresji jest mniejsze od ciśnienia zewnętrznego, a przy dekompresji większe, oraz pojawia się znaczna histereza, wprost proporcjonalna do prędkości zmian ciśnienia cieczy. To opóźnienie w wyrównywaniu ciśnienia wewnątrz i na zewnątrz próbki najlepiej tłumaczy proces filtracji, który znacząco opóźnia transport cieczy porowej do i z wnętrza próbki. Eksperymenty wykonano dla prędkości zmian ciśnienia 0,5; 1; 2; 4 i 8 MPa/s, w zakresie od 0 do 350 MPa.

Słowa kluczowe: eksperyment ścisłości, eksperyment drenowany, ciśnienie hydrostatyczne, ciśnienie porowe, filtracja

Wstęp

Badania zmiany objętości próbki skalnej pod wpływem zmiany ciśnienia hydrostatycznego należą do szerokiego spektrum badań wykorzystywanych w Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN do rozpoznawania wpływu płynu porowego na właściwości deformacyjne skały. Podstawowym narzędziem badawczym jest tutaj tzw. eksperyment ścisłości, wykonywany w dwóch wariantach oznaczanych „ $p_p = 0$ ” i „ $p_p = p$ ” (szczegóły w rozdz. 1 niniejszej pracy). Celem badań była próba określenia zależności wyniku testu „ $p_p = p$ ” od różnych prędkości ciśnienia hydrostatycznego.

1. Zasady wykonywania i interpretacji wyników testu ścisłości

Test ścisłości skały polega na ściskaniu próbki skalnej ciśnieniem hydrostatycznym z równoczesnym pomiarem jej zmian objętości. Jako wynik otrzymujemy zależność między ciśnieniem hydrostatycznym p a zmianą objętości próbki e . Wykonywane w Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN testy ścisłości z reguły są tzw. testami drenowanymi, co oznacza, że przestrzeń porowa skały nie jest podczas testu szczelnie zamknięta i istnieje kontakt pomiędzy tą przestrzenią a otoczeniem próbki. Istnieją dwa podstawowe typy testów drenowanych:

1) Test oznaczany „ $p_p = 0$ ”

Podczas tego testu próbka oddzielona jest od medium realizującego ciśnienie hydrostatyczne elastyczną osłoną, natomiast przestrzeń porowa próbki połączona jest z powietrzem pozostającym pod ciśnieniem atmosferycznym. W takim przypadku można przyjąć, że wynikające z deformacji skały ewentualne zmiany objętości przestrzeni porowej nie przekładają się na zmianę wartości ciśnienia porowego p_p , które pozostaje stałe i równe ciśnieniu atmosferycznemu. Uzyskane na tej drodze krzywe ścisłości są w dalszej części niniejszej pracy oznaczane symbolem $p_p = 0$.

2) Test oznaczany „ $p_p = p$ ”

W trakcie wykonywania tego eksperymentu próbka umieszczana jest w komorze wysokiego ciśnienia bez osłon tak, aby zapewnić kontakt przestrzeni porowej skały z medium realizującym ciśnienie hydrostatyczne. Zakłada się wówczas, że ciśnienie porowe w próbce jest cały czas równe ciśnieniu hydrostatycznemu¹, a deformacja próbki jest konsekwencją jedynie deformacji szkieletu skały, której przestrzeń porowa deformacji nie ulega. Uzyskaną w ten sposób krzywą ścisłości będą dalej oznaczane jako $p_p = p$.

Schematy odpowiednich krzywych ścisłości pokazano na rysunku 1. Interpretacja kształtu tych krzywych oraz wyróżnionych na nich punktów charakterystycznych wymaga jednak poczynienia najpierw pewnych uwag dotyczących budowy skały.

Na wstępie należy zauważyć, że integralną częścią skały jest tzw. przestrzeń porowa składająca się z pustek różnego kształtu i wielkości. Z uwagi na ich kształt pory dzielimy na dwie grupy: pory izometryczne – czyli takie, których wszystkie trzy wymiary są zbliżone a kształt mniej lub bardziej przypomina kulę, oraz spękania – czyli pory, których jeden wymiar jest co najmniej o rząd mniejszy od dwóch pozostałych. Z punktu widzenia reakcji skały na obciążenie ciśnieniem hydrostatycznym obie te grupy porów zachowują się odmiennie.

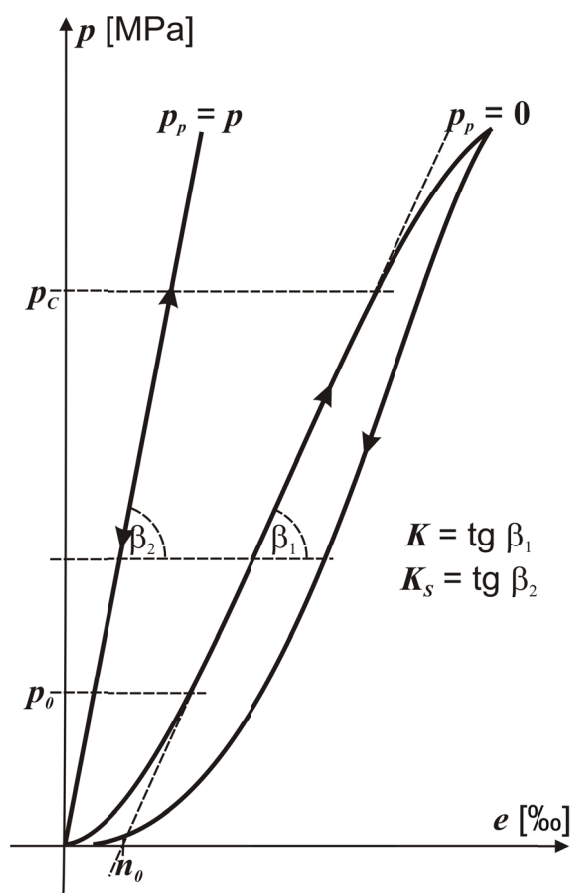
Pory izometryczne w zasadzie nie ulegają deformacji pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego natomiast po przekroczeniu wytrzymałości ścianki następuje ich „zapadnięcie się” połączone z destrukcją struktury skały i jest to efekt trwały. Natomiast spękania – z uwagi na swój specyficzny kształt – „pracują”, czyli mogą się zamykać lub otwierać w zależności od wielkości obciążającego skałę ciśnienia, przy czym proces ten w zasadzie jest odwracalny i nie ma wpływu na strukturę skały, która pozostaje nienaruszona.

Wspomniane wyżej zmiany zachodzące w przestrzeni porowej skały mają znaczący wpływ na kształt krzywej ścisłości $p_p = 0$ (patrz Rys. 1). Zauważmy, że w swojej początkowej części krzywa ta jest nieliniowa z wypukłością skierowaną w stronę osi „ e ”. Nieliniowość jest konsekwencją procesu zamykania spękań przez ciśnienie hydrostatyczne. Proces ten kończy się po osiągnięciu ciśnienia p_0 , które nosi nazwę ciśnienia zamykania spękań (por. Walsh [1985]), po przekroczeniu którego krzywa ścisłości się linearyzuje i pozostaje liniowa aż do ciśnienia p_C , nazywanego ciśnieniem konsolidacji.

Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, że przedłużenie prostoliniowej części krzywej $p_p = 0$ w kierunku osi „ e ” przecina tę oś w punkcie o współrzędnych $(n_0, 0)$. Wartość odciętej tego punktu n_0 to tzw. porowatość spękań, czyli informacja, jaki procent objętości badanej próbki stanowią „spękania”.

Po przekroczeniu przez ciśnienie hydrostatyczne wartości p_C krzywa $p_p = 0$ ponownie traci charakter liniowy z tym, że jej wypukłość skierowana jest w stronę osi „ p ”. Jest to spowodowane rozpoczęciem destrukcji próbki pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego.

Powyższe stwierdzenie może się wydać czytelnikowi zaskakujące. Jeżeli bowiem przyjąć, że obciążenie skały ciśnieniem hydrostatycznym p wywołuje w jej wnętrzu hydrostatyczny stan naprężeń, to stan ten nie powinien doprowadzić do destrukcji materiału, z którego wykonana jest próbka. Tymczasem już Rychlewski [1965] pokazał na drodze teoretycznej, że w materiale porowatym ciśnienie hydrostatyczne może wywoływać dewiatorowe stany naprężenia wywoływane poślizgiem powierzchni spękań bądź też destrukcją ścian porów izometrycznych. Interesujące informacje o wpływie porów na wyniki testu ścisłości znaleźć można u Gustkiewicza [1989, 1998].



Rys. 1. Schematy krzywych ścisłości (strzałki na krzywych wskazują kierunek zmian ciśnienia)

¹ Założenie to jest dyskusyjne, o czym w rozdz. 2.

Dodatkowo należy także wziąć pod uwagę, że praktycznie każda skała ma budowę ziarnistą, a punkty styku ziaren mogą być bardzo silnymi koncentratorami naprężeń. W efekcie w skałe obciążonej ciśnieniem hydrostatycznym mogą punktowo pojawić się naprężenia o wartościach kilka rzędów wyższych niż ciśnienie obciążające. Koncentratorami naprężeń mogą być także krawędzie spękań, od których bardzo często zaczyna się destrukcja materiału. W efekcie po przekroczeniu ciśnienia konsolidacji może dojść do superpozycji kilku procesów prowadzących do zniszczenia struktury skały.

Sformułowane powyżej uwagi w sposób oczywisty nie dotyczą krzywej $p_p = p$. W sytuacji, gdy ciśnienie płynu porowego jest stale równe ciśnieniu hydrostatycznemu nie może być mowy o jakiegokolwiek deformacji porów, a ewentualne zmiany objętości próbki są jedynie konsekwencją ścisłości materii skalnej (z dokładnością do ścisłości cieczy). W efekcie krzywa ścisłości $p_p = p$ zawsze ma charakter liniowy w całym zakresie ciśnień hydrostatycznych. Odstępstwo od tej zasady możliwe jest jedynie wtedy, gdy w badanym materiale znaczący odsetek spękań stanowią spękania izolowane, czyli takie, do których nie ma możliwości wprowadzenia ciśnienia porowego. Wówczas w początkowej części krzywej $p_p = p$ również pojawi się wypukłość skierowana w stronę osi „e”, będąca konsekwencją zamykania się takich spękań. Odpowiedni przykład pokazano na rysunku 2.

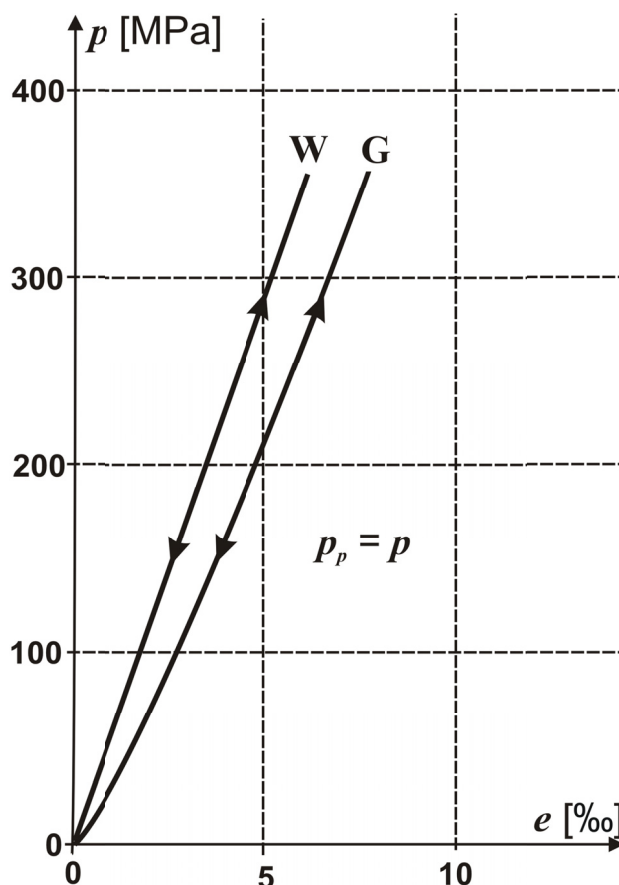
W tym miejscu należy podkreślić, że wartości tangensów kątów nachylenia krzywych $p_p = 0$ i $p_p = p$ do osi odciętych są wartościami modułów ścisłości objętościowej skały (K) i jej szkieletu (K_s) tak jak to pokazano na rysunku 1. Oczywistym jest, że obowiązuje zależność $K_s \geq K$, przy czym $K_s = K$ zachodzi, gdy porowatość skały spełnia warunek $n = 0$.

Na zakończenie tej część rozważań warto jeszcze poświęcić chwilę uwagi testowi niedrenowanemu, czyli takiemu, podczas którego przestrzeń porowa próbki jest odcięta od otoczenia. W takim przypadku wymuszona deformacją próbki pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego zmiana objętości przestrzeni porowej powoduje indukowanie się w tej przestrzeni ciśnienia porowego zgodnie z zależnością:

$$p_p = B p \quad (1)$$

w której B jest tzw. współczynnikiem Skemptona. Szczegóły dotyczące zarówno definicji stałej B jak i sposobu jej wyznaczania znaleźć można u Wanga [2000; str. 20-22, 64-65].

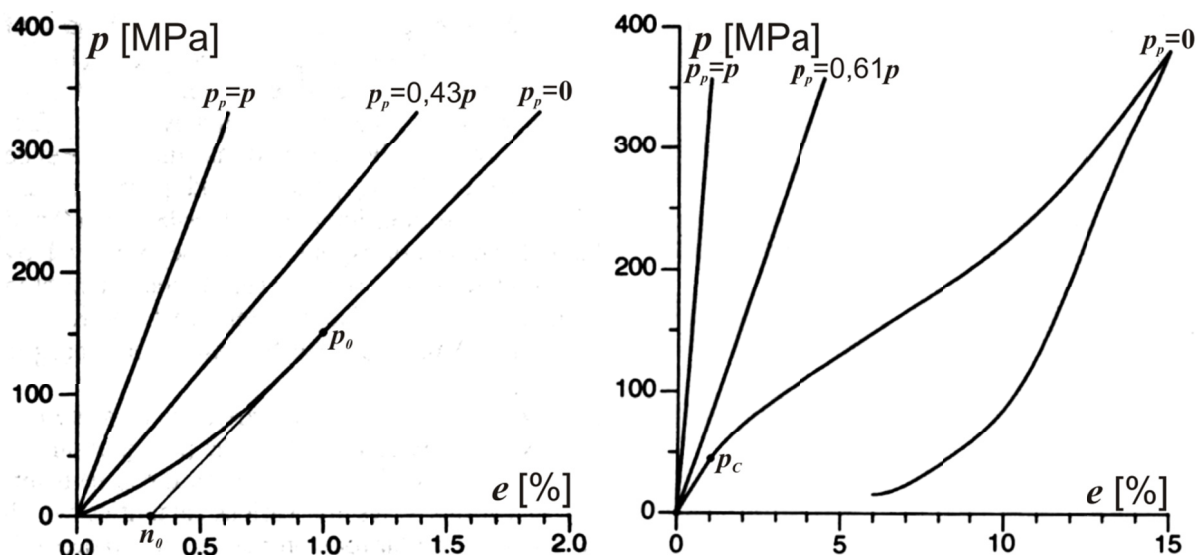
Krzywa zależności między zmianą objętości próbki a ciśnieniem hydrostatycznym będzie, dla testu niedrenowanego, sytuować się gdzieś pomiędzy krzywymi $p_p = 0$ i $p_p = p$. Odpowiednie przykłady dla piaskowca i gezy podał Gustkiewicz [1998] i zostały one pokazane na rysunku 3.



Rys. 2. Krzywe ścisłości „ $p_p = p$ ”: W – wapień z Morawicy, G – granit ze Strzelina; Gustkiewicz [1989]

2. Sformułowanie problemu badawczego i sposób wykonania badań laboratoryjnych

Opisując (rozdz. 1, pkt 2)) test ścisłości $p_p = p$ autorzy stwierdzili, iż podczas tego testu: *Zakłada się (...), że ciśnienie porowe w próbce jest cały czas równe ciśnieniu hydrostatycznemu.* Założenie to musi budzić wątpliwości. Otóż: biorąc pod uwagę fakt, że objętość przestrzeni porowej podczas testu $p_p = p$ nie ulega zmianie (z dokładnością do ścisłości płynu porowego), wyrównywanie ciśnień porowego i otacza-



Rys. 3. Wyniki drenowanych i niedrenowanych testów ścisłości; po lewej – piaskowiec „Pniówek” ($B = 0,43$), po prawej – geza „Louny” ($B = 0,61$); Gustkiewicz [1998]

jącego próbkę ciśnienia hydrostatycznego podczas badania ścisłości próbki może się dokonywać głównie poprzez transport masy płynu z otoczenia próbki do jej przestrzeni porowej, czyli poprzez jego filtrację. Prędkość filtracji zależy od wielu czynników i z pewnością ma wartość skończoną. Należy zatem podejrzewać, że wzrost wartości ciśnienia porowego w próbce następuje z pewnym opóźnieniem w stosunku do wzrostu wartości ciśnienia hydrostatycznego. Co więcej, można domniemywać, że opóźnienie to będzie tym większe, im większa będzie prędkość wzrostu ciśnienia hydrostatycznego.

Podobnej sytuacji należy się spodziewać podczas odciążania próbki poprzez zmniejszanie ciśnienia hydrostatycznego. Ponieważ ruch płynu porowego przebiegał będzie wówczas w przeciwnym kierunku niż w przypadku obciążania, uzasadnionym wydaje się podejrzenie, że ciśnienie porowe wewnątrz próbki będzie wyższe, niż ciśnienie hydrostatyczne.

2.1. Metodyka badawcza

Celem zweryfikowania powyższych hipotez postanowiono posłużyć się drenowanym testem ścisłości w wersji $p_p = p$. Przyjęto założenie, że podczas takiego testu nie dochodzi do destrukcji materiału, a zatem pętlę „obciążenie – odciążenie” można wykonywać wielokrotnie na jednej próbce. Dla każdej badanej próbki zaplanowano następujące rodzaje eksperymentów:

A) „wolne obciążanie”

Wykonuje się 5 pętli „obciążenie – odciążenie” w taki sposób, że prędkość obciążania jest w każdej pętli stała i wynosi $0,5 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$ natomiast prędkość odciążania przyjmuje wartości: $0,5 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $1,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $2,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $4,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$ i $8,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$.

B) „szybkie obciążanie”

Wykonuje się 5 pętli „obciążenie – odciążenie” w taki sposób, że prędkość obciążania jest w każdej pętli stała i wynosi $8,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$ natomiast prędkość odciążania przyjmuje wartości: $0,5 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $1,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $2,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $4,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$ i $8,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$.

C) „wolne odciążanie”

Wykonuje się 5 pętli „obciążenie – odciążenie” w taki sposób, że prędkość obciążania przyjmuje wartości: $0,5 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $1,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $2,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $4,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$ i $8,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, natomiast prędkość odciążania jest w każdej pętli stała i wynosi $0,5 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$.

D) „szybkie odciążanie”

Wykonuje się 5 pętli „obciążenie – odciążenie” w taki sposób, że prędkość obciążania przyjmuje wartości: $0,5 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $1,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $2,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, $4,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$ i $8,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$, natomiast prędkość odciążania jest w każdej pętli stała i wynosi $8,0 \text{ MPa} \times \text{s}^{-1}$.

W tak zaplanowanych eksperymentach ciecz wypełniająca komorę wysokiego ciśnienia oraz próbki podlega – z punktu widzenia termodynamiki – tzw. przemianie izochorycznej co oznacza, że temperatura cieczy zarówno podczas obciążania próbki (kompresja) jak i podczas jej odciążania (dekompresja) ulega zmianie. Dlatego też każdorazowo fazy obciążania i odciążania nie następowały po sobie natychmiast, lecz zawsze były rozdzielone fazą stabilizacji temperatury, której czas trwania zależał od prędkości kompresji lub dekompresji. Temperaturę uznawano za ustabilizowaną po zakończeniu sprężania wówczas, gdy różnica między temperaturą początkową a końcową była nie większa niż 3°C , natomiast po zakończeniu rozprężania, gdy różnica ta nie przekraczała $0,5^{\circ}\text{C}$. Postępowano tak gdyż spadek temperatury cieczy w komorze po zakończeniu sprężania następował wielokrotnie wolniej niż jej wzrost po zakończeniu rozprężania. Przyczyną tego „braku symetrii” jest rozpoczęcie dekompresji przy temperaturze o 3°C większej od otoczenia w połączeniu z dużą bezwładnością cieplną komory.

Temperaturę cieczy w komorze ciśnieniowej mierzono złączem *p-n* diody LED zielonej (Nurkowski [1995]). Odształcenie liniowe próbki mierzono bezrdzeniowym czujnikiem indukcyjnym mocowanym do opasek umieszczonych na krańcach próbki (Nurkowski [2004]). Odształcenie objętościowe próbki *e* wyliczano ze zmierzonego odształcenia liniowego zakładając jednorodność i izotropię materiału piaskowca.

2.2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań była próbka wykonana z piaskowca pochodzącego z kamieniołomu w miejscowości Tumlin (w dalszej części niniejszej pracy używane będzie określenie piaskowiec Tumlin). Jest to skała osadowa o teksturze zbitej i bezładnej, w której dominują ziarna kwarcu. Średnica ziaren waha się zwykle od 0,1 do 0,3 mm, rzadziej spotyka się ziarna drobniejsze ($0,05 \div 0,1$ mm). Ziarna są z reguły słabo obtoczone. Szczegółowy opis tej skały znajduje się w pracy Nowakowskiego i in. [2003].

Dla testowanej próbki oznaczono metodą piknometryczną porowatość, która wynosiła 7,1%. W ramach przygotowań do eksperymentu próbka została umieszczona przez 48 h pod próżnią rzędu 10^{-2} a następnie zalana cieczą wypełniającą komorę wysokociśnieniową (nafta) i pozostawiona do nasączenia. Stan nasączenia próbki sprawdzano poprzez pomiar masy. Pomiedzy poszczególnymi eksperymentami próbka przechowywana była całkowicie zanurzona w nafcie.

3. Wyniki badań

Dla próbki przygotowanej w sposób opisany w rozdz. 2.2 wykonano wszystkie eksperymenty omówione w punktach A) ÷ D) rozdz. 2.1. Wyniki w postaci zestawu odpowiednich krzywych pokazano poniżej.

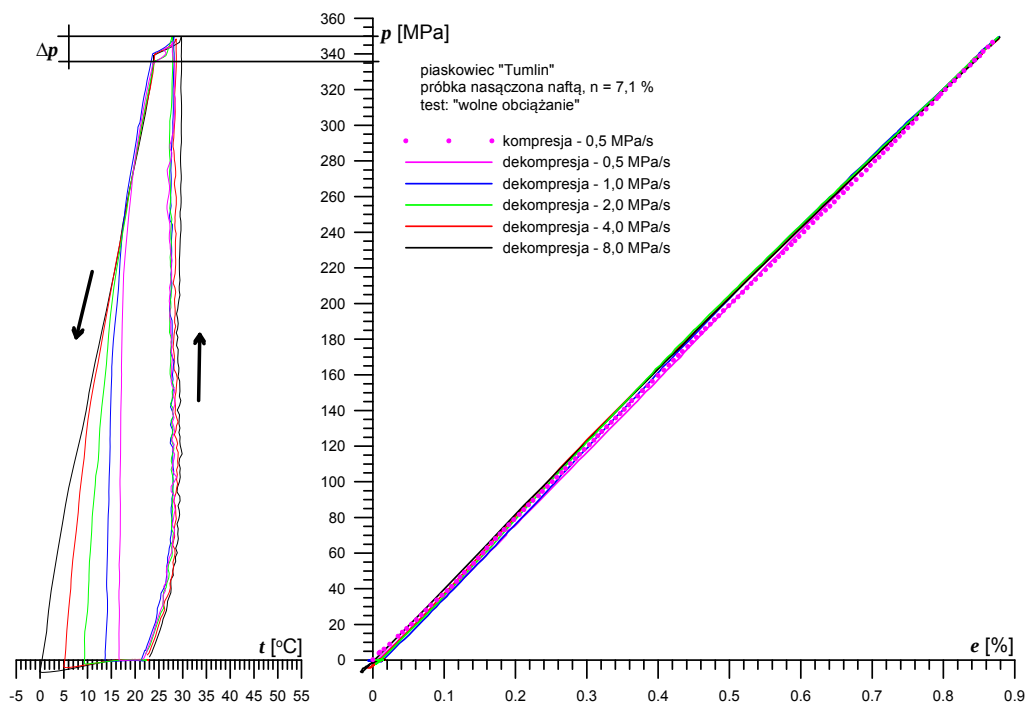
A) test „wolnego obciążania”.

Wyniki testu „wolnego obciążania” pokazują rysunki 4a i 4b. Na rysunku 4a pokazano równoległe zależności między ciśnieniem hydrostatycznym *p* a temperaturą w komorze *t* (po lewej) oraz między ciśnieniem hydrostatycznym *p* a zmianą objętości próbki *e*. Rysunek 4b zawiera wyłącznie zależności *p(e)*.

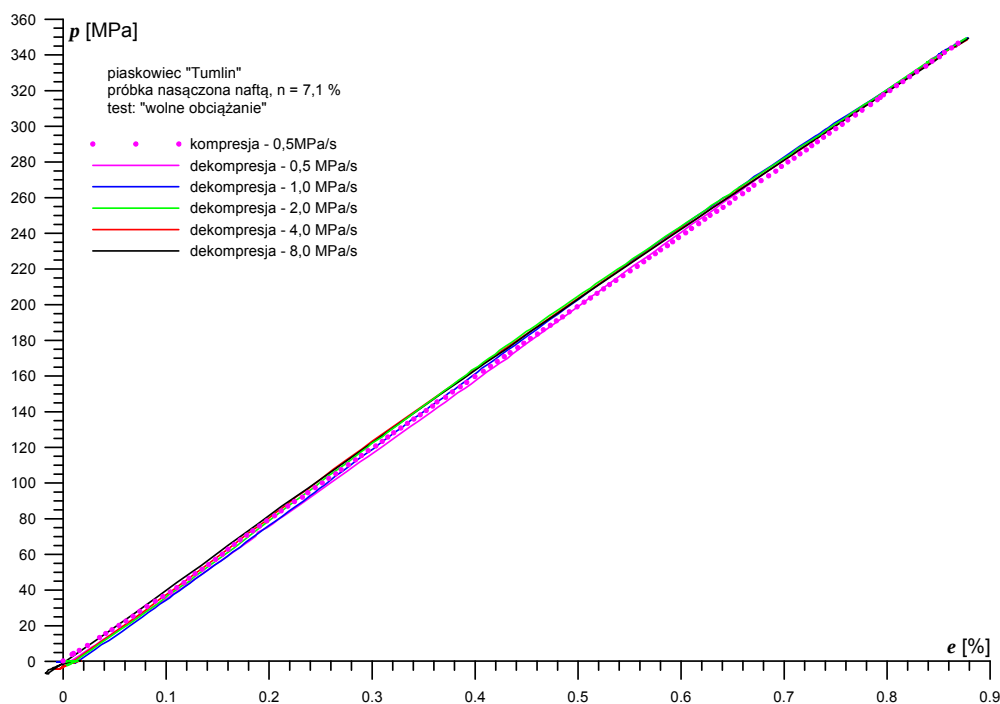
Pokazane na rysunku 4a krzywe *p(t)* dowodzą bardzo dobrej powtarzalności wykonywania pętli kompresja-dekompresja. W szczególności zmiana temperatury podczas kompresji przebiega za każdym razem tak samo zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym. Ma to swoje przełożenie na kształt wznoszących części krzywych *p(e)*: otóż, podczas testu „wolnego obciążania” części te również wyglądały za każdym razem tak samo. Dlatego też na rysunkach 4a i 4b zaznaczono tylko jedną linię kompresji, oznaczoną „kompresja – $0,5 \text{ MPa/s}$ ”.

W przypadku dekompresji zależność *p(t)* rozpoczyna się niewielkim spadkiem ciśnienia oznaczonym Δp , którego przyczyną jest spadek temperatury po zakończeniu procesu sprężania. Na tym odcinku wszystkie krzywe dekompresji się pokrywają, a towarzyszący spadkowi ciśnienia Δp wzrost objętości próbki (a ściślej, spadek wartości odształceń objętościowych) przebiega dokładnie po linii dekompresji. Następnie rozpoczyna się właściwa dekompresja, której towarzyszy spadek temperatury cieczy w komorze, który jest tym większy im większa jest prędkość dekompresji.

Wyraźne różnice w przebiegu linii dekompresji dla krzywych *p(t)* okazują się nie mieć przełożenia na kształt linii dekompresji krzywych *p(e)*. Analizując krzywe ścisłości pokazane na rysunku 4b można wręcz powiedzieć, że przy niskiej prędkości kompresji prędkość dekompresji nie ma znaczenia dla sposobu deformacji próbki.



Rys. 4a. Wynik testu „wolnego obciążania”: po lewej – zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a temperaturą, po prawej – zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a zmianą objętości; piasek Tumlin



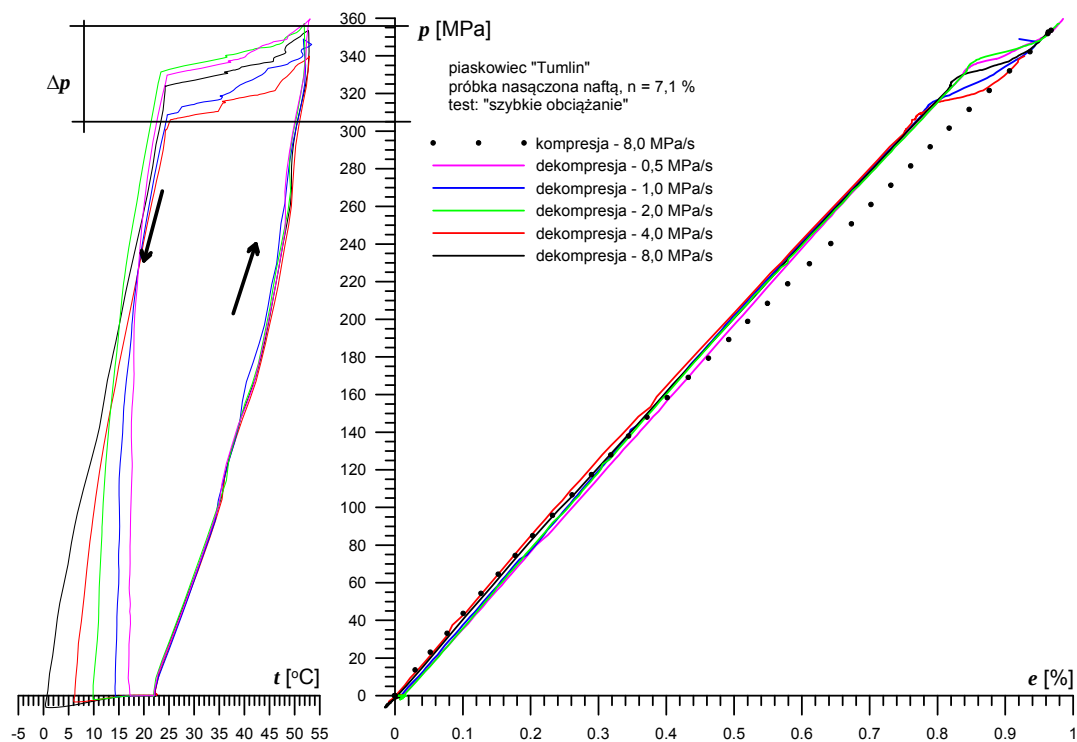
Rys. 4b. Wynik testu „wolnego obciążania”: zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a zmianą objętości; piasek Tumlin

B) test „szybkiego obciążania”.

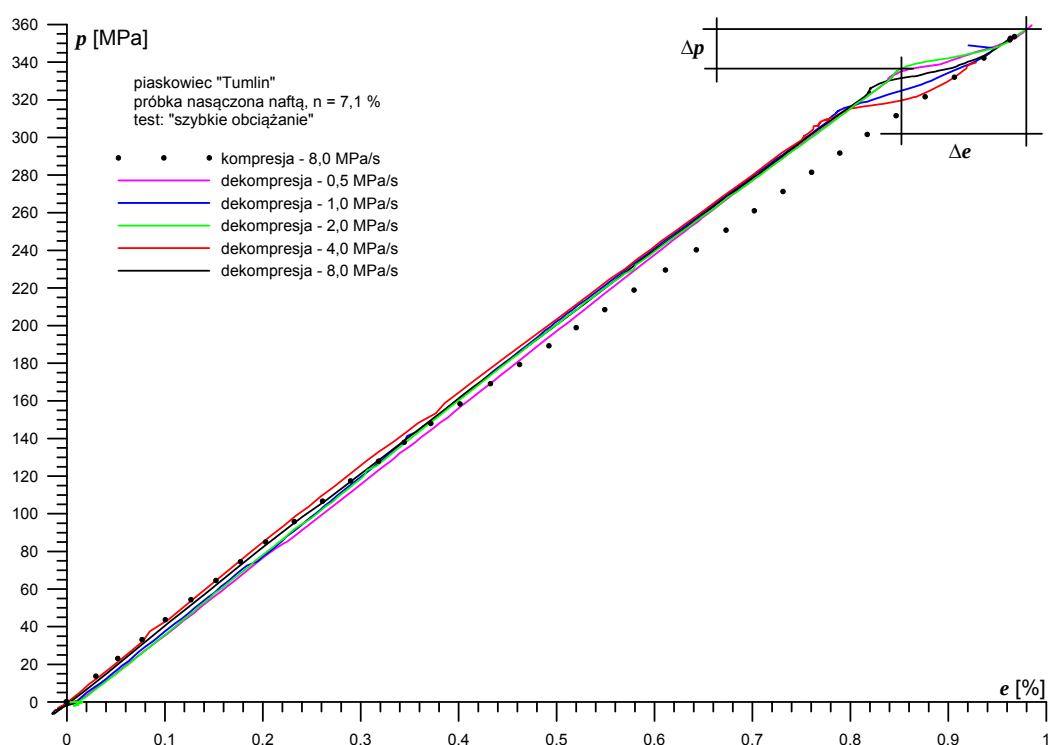
Odpowiednie zależności dla tego testu pokazują rysunki 5a i 5b. Również w przypadku tego testu linie kompresji dla wszystkich pętli kompresja-dekompresja były takie same, zatem dla poprawy czytelności rysunku pozostawiono tylko jedną, oznaczoną „kompresja – 8,0 MPa/s”

W przypadku testu „szybkiego obciążania” temperatura po zakończeniu kompresji była znacznie wyższa niż dla testu „wolnego obciążania” a w konsekwencji spadek ciśnienia Δp towarzyszący procesowi

stabilizacji temperatury w komorze też był wyższy (Rys. 5a). Kształt krzywych $p(t)$ na rysunku 5a można uznać jakościowo za identyczny jak na rysunku 4a. Wartość Δp dla każdej z pętli kompresja-dekompresja na rysunku 5a można uznać za taką samą a to, że odpowiednie odcinki krzywych $p(t)$ się nie pokrywają wynika z faktu, że osiągnięte w poszczególnych pętlach maksymalne wartości ciśnienia hydrostatycznego nie są identyczne.



Rys. 5a. Wynik testu „szybkiego obciążania”: po lewej – zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a temperaturą, po prawej – zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a zmianą objętości; piasek Tumlin



Rys. 5b. Wynik testu „szybkiego obciążania”: zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a zmianą objętości; piasek Tumlin

Analiza kształtu krzywych $p(e)$ pokazanych na rysunku 5b wykazuje istotne różnice z analogicznymi krzywymi na rysunku 5b. W teście „wolnego obciążania” spadek ciśnienia hydrostatycznego oraz towarzyszący mu spadek odkształcenia objętościowego pokrywają się z linią kompresji próbki niezależnie od prędkości dekompresji. W przypadku „szybkiego obciążania” przebieg dekompresji wygląda inaczej, o czym decyduje wielkość spadku odkształceń objętościowych Δe odpowiadająca stabilizacji termicznej próbki. Jak widać na rysunku 5b spadek ten jest znacznie większy niż wynikałoby to tylko z wartości spadku ciśnienia hydrostatycznego. Powstaje pytanie, jaka jest tego przyczyna?

Wydaje się, że wartość wielkości Δe jest w tym przypadku konsekwencją dwóch efektów: wspomnianego już wyżej spadku ciśnienia hydrostatycznego w konsekwencji spadku temperatury cieczy w komorze oraz filtracji płynu do przestrzeni porowej skały dla wyrównania ciśnień hydrostatycznego i porowego. Konsekwencją wysokiej prędkości przyrostu ciśnienia hydrostatycznego w komorze był nie tylko znacznie większy przyrost temperatury cieczy wewnątrz komory, ale także „nienadążanie” ciśnienia porowego za ciśnieniem hydrostatycznym. Dopiero gdy przyrost ciśnienia hydrostatycznego został zatrzymany powolna filtracja doprowadziła do wyrównania ciśnień na zewnątrz i wewnątrz próbki.

Pewnym potwierdzeniem powyższej hipotezy jest porównanie wartości modułów ścisłości skały uzyskanych dla jej kompresji oraz dekompresji. W omawianym przypadku moduł ten oszacowano dla kompresji w wysokości $K_{s(c)} = 30,0$ GPa a dla dekompresji w wysokości $K_{s(d)} = 39,5$ GPa, co jest różnicą rzędu 30%. Proces wyrównywania ciśnień powoduje, że odkształcenia objętościowe próbki maleją, a moduł sprężystości objętościowej rośnie.

C) test „wolnego odciażania”.

Na rysunkach 6a i 6b pokazano zależności między ciśnieniem hydrostatycznym a zmianą objętości próbki oraz temperaturą w komorze wysokiego ciśnienia dla różnych prędkości kompresji i jednej prędkości dekompresji równej 0,5 MPa/s.

Jest rzeczą oczywistą, że im większa była prędkość kompresji tym większe były odpowiadające jej przyrosty temperatury cieczy w komorze. Jednocześnie należało oczekiwać, że towarzyszące stabilizacji temperatury spadki ciśnienia Δp będą również rosły wraz ze wzrostem prędkości kompresji. Także ta prawidłowość w zasadzie znalazła swoje potwierdzenie w wynikach eksperymentów.

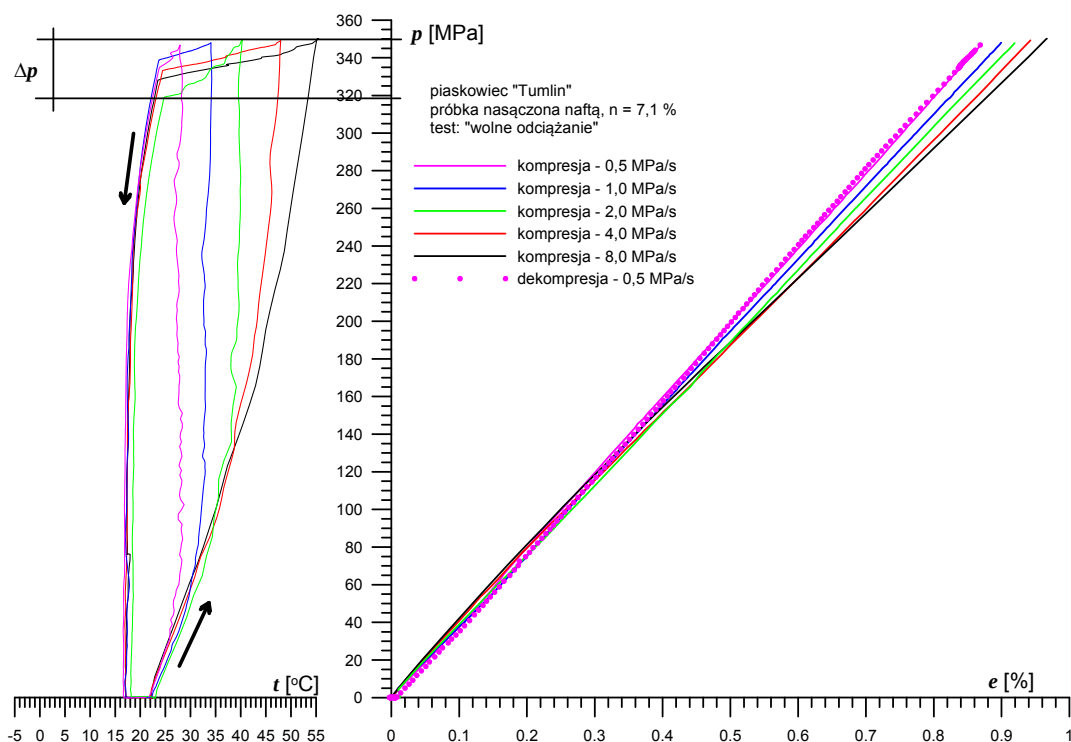
Przebieg linii dekompresji (która – przypomnijmy – zawsze prowadzona była z tą samą prędkością, równą 0,5 MPa/s) odpowiadających poszczególnym prędkościom kompresji różnił się nieznacznie, ale w swej końcowej fazie zawsze pokrywał się z pokazaną na rysunkach 6a i 6b linią oznaczoną „dekompresja – 0,5 MPa/s”. Można przyjąć, że linia ta była swego rodzaju granicą, do której dążyły linie dekompresji dla wszystkich wykonanych eksperymentów. Przykład takiego „dążenia” pokazano na rysunku 6b dla dekompresji prowadzonej z maksymalną prędkością równą 8,0 MPa/s.

Przyjrzyjmy się teraz dokładniej kształtowi krzywych ścisłości pokazanych na rysunku 6b. Widzimy, że maksymalne odkształcenia objętościowe próbki są tym większe, im większa jest prędkość kompresji próbki. Tymczasem z wyników badań wytrzymałościowych wynika, że odkształcalność próbki maleje ze wzrostem prędkości obciążania. I najprawdopodobniej tak by było gdyby nie problem filtracji. Ponownie mamy bowiem do czynienia z sytuacją, gdy ciśnienie porowe „nie nadąży” za ciśnieniem hydrostatycznym, przy czym różnica między nimi jest tym większa, im większa jest prędkość kompresji. W konsekwencji im wyższa prędkość kompresji tym odkształcalność próbki większa, co bardzo dobrze ilustruje pokazane w tabeli 1 zestawienie modułów ścisłości objętościowej oszacowanych dla poszczególnych krzywych ścisłości pokazanych na rysunkach 6a i 6b. Widać z niego, że wpływ filtracji na wynik testu ścisłości jest widoczny, choć nie tak znaczący, jak w teście „szybkiego obciążania”.

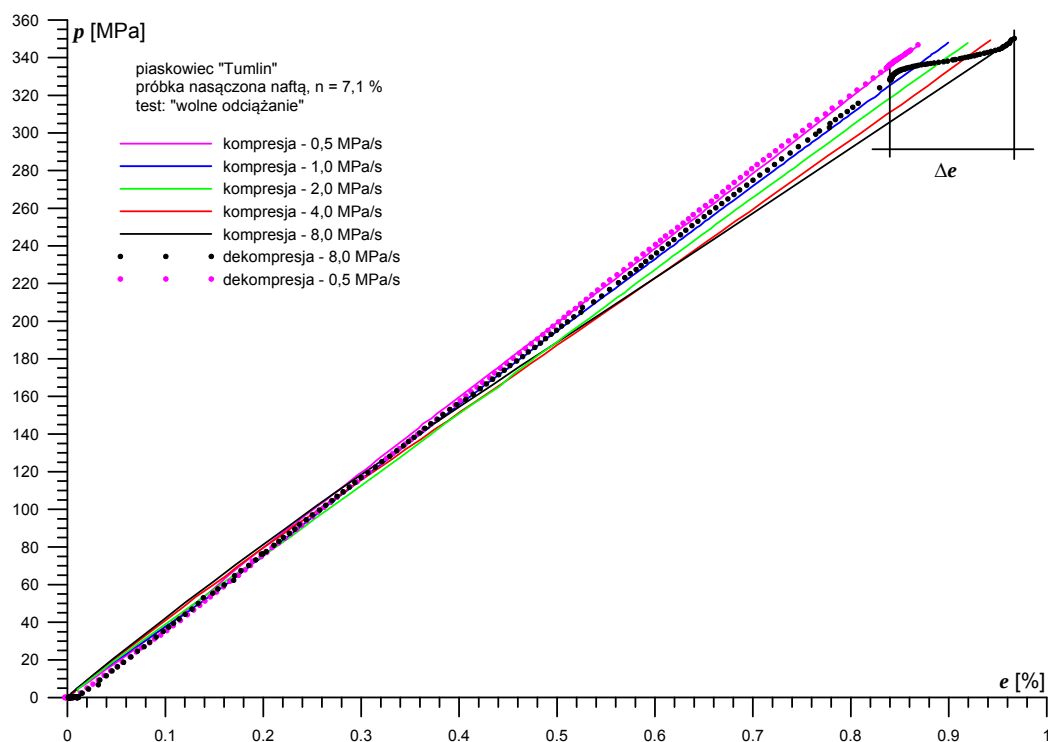
D) test „szybkiego odciażania”.

Wyniki tego testu przedstawiono na rysunkach 7a i 7b. W teście tym różne prędkości kompresji połączone z jedną prędkością dekompresji, która w tym przypadku wynosiła 8,0 MPa/s.

Różnice między pokazanymi na rysunkach 7a i 6a zależnościami $p(t)$ można uznać za wyłącznie ilościowe. Po prostu wyższa prędkość dekompresji (Rys. 7a) musiała skutkować wyższym spadkiem temperatury. W przypadku krzywych $p(e)$ (Rys. 7b) można uznać, że krzywa ścisłości uzyskana dla kompresji i dekompresji wykonywanych z tą samą prędkością równą 8,0 MPa jest rodzajem obwiedni, w obrębie której mieszczą się wszystkie pozostałe. W tabeli 2 zestawiono – analogicznie jak w przypadku testu „wolnego odciażania” – moduły ścisłości objętościowej oszacowane dla poszczególnych krzywych ścisłości

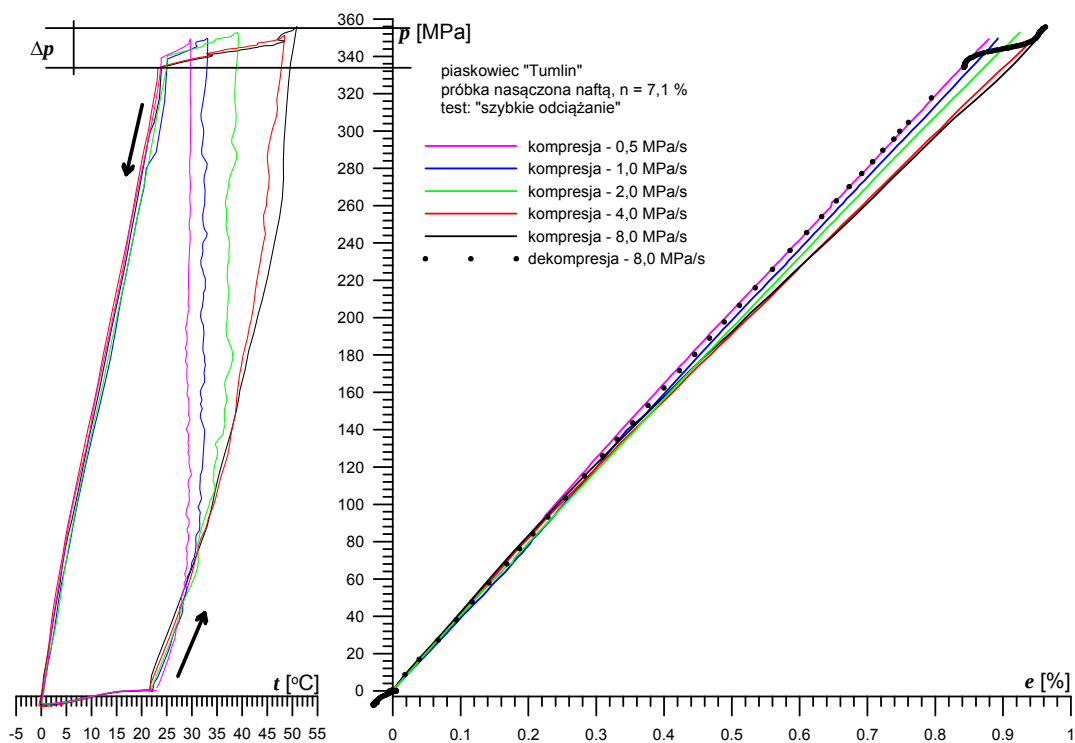


Rys. 6a. Wynik testu „wolnego odciążania”: po lewej – zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a temperaturą, po prawej – zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a zmianą objętości; piasek Tumlin

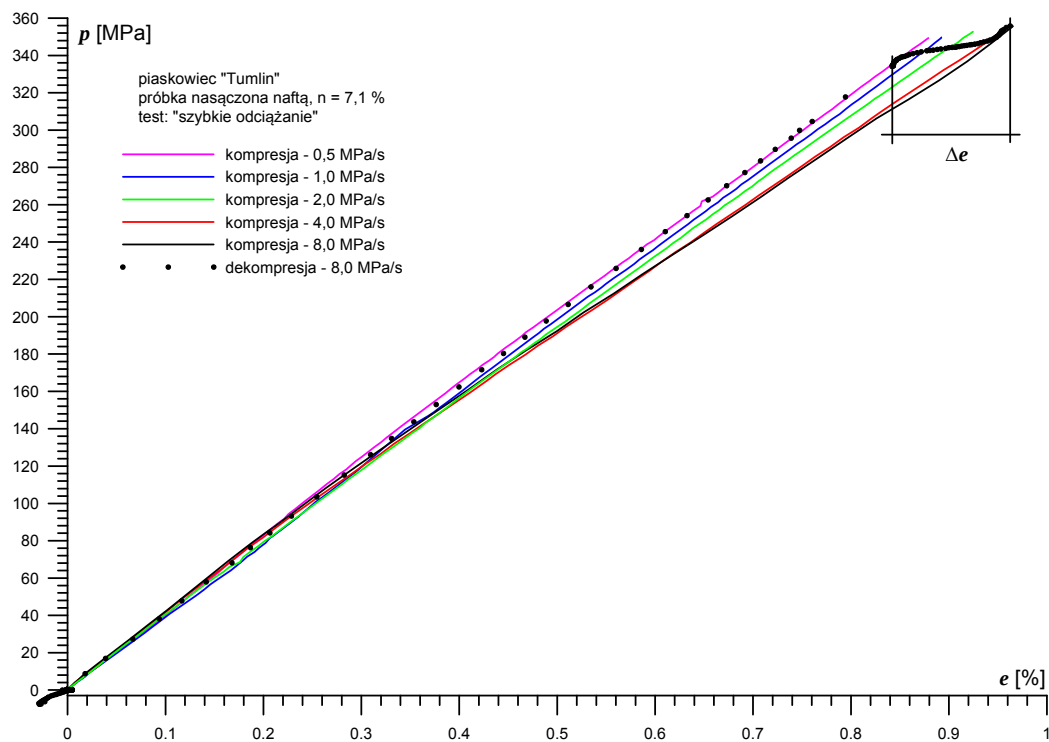


Rys. 6b. Wynik testu „wolnego odciążania”: zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a zmianą objętości; piasek Tumlin

pokazanych na rysunkach 7a i 7b. Wartości odpowiednich modułów w tabeli 1 nie różnią się znacząco od ich odpowiedników w tabeli 2 natomiast zaobserwowany wcześniej wzrost odkształcalności próbki w powiązaniu ze wzrostem prędkości kompresji został także i w tym przypadku potwierdzony. Związek tego zjawiska z filtracją również wydaje się nie budzić wątpliwości.



Rys. 7a. Wynik testu „szybkiego odciążania”: po lewej – zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a temperaturą, po prawej – zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a zmianą objętości; piaskowiec Tumlin



Rys. 7b. Wynik testu „szybkiego odciążania”: zależność między ciśnieniem hydrostatycznym a zmianą objętości; piaskowiec Tumlin

Tab. 1. Moduły ścisłości objętościowej dla kompresji ($K_{s(c)}$) i dekompresji ($K_{s(d)}$); test „wolnego odciążania”, piaskowiec Tumlin

	prędkość kompresji					prędkość dekompresji
	8 MPa/s	4 MPa/s	2 MPa/s	1 MPa/s	0,5 MPa/s	0,5 MPa/s
$K_{s(c)}$ [GPa]	34,6	36,6	37,9	38,4	40,1	
$K_{s(d)}$ [GPa]						40,0

Tab. 2. Moduły ścisłości objętościowej dla kompresji ($K_{s(c)}$) i dekompresji ($K_{s(d)}$); test „szybkiego odciążania”, piaskowiec Tumlin

	prędkość kompresji					prędkość dekompresji
	8 MPa/s	4 MPa/s	2 MPa/s	1 MPa/s	0,5 MPa/s	8 MPa/s
$K_{s(c)}$ [GPa]	34,9	35,7	37,4	38,4	38,5	
$K_{s(d)}$ [GPa]						39,2

4. Podsumowanie

Pokazane i omówione wyżej wyniki badań dowodzą, że prędkość zmiany ciśnienia hydrostatycznego ma istotny wpływ na wynik analizowanego drenowanego testu ścisłości „ $p_p = p$ ”². Wpływ ten jest tym większy, im większa jest zastosowana prędkość kompresji bądź dekompresji.

W szczególności wysoka prędkość zmiany tego ciśnienia skutkuje zwiększeniem odkształcalności badanego materiału, a co za tym idzie obniżeniem wartości modułu ścisłości objętościowej szkieletu skały K_s . To spostrzeżenie jest bardzo istotne dla przypadku, gdy jako równania konstytutywne badanej skały chcemy zastosować równania porosprężystego ośrodka Biot³. Niektóre z występujących w tych równaniach stałych materiałowych są funkcjami modułu ścisłości objętościowej szkieletu skały K_s , który wyznacza się na podstawie wyniku drenowanego eksperymentu ścisłości „ $p_p = p$ ”. Jak wykazano wyżej, prędkość zmiany ciśnienia hydrostatycznego ma istotny wpływ na wynik tego eksperymentu, a co za tym idzie na wartość wyznaczaną na podstawie tego wyniku modułu K_s .

Przyczyną opisanych w rozdz. 3 zjawisk wydaje się być przebieg procesu filtracji płynu do i z wnętrza badanej próbki. Proces ten – jak to zasygnalizowano w rozdz. 2 – powoduje, że wyrównanie ciśnień hydrostatycznego i porowego zostaje rozciągnięte w czasie, a tym samym nie może zostać spełniony podstawowy warunek poprawności wyznaczania modułu ścisłości skały, że ciśnienie porowe jest równe ciśnieniu hydrostatycznemu.

Na zakończenie należy zwrócić jeszcze uwagę, że autorzy niniejszej pracy nie analizowali wpływu na wyniki wspomnianych eksperymentów ścisłości wartości tak istotnej strukturalnej stałej materiałowej jaką jest porowatość (n). Dla badanego piaskowca Tumlin było $n \approx 7\%$, czyli niezbędna do wypełnienia cieczą objętość porów była relatywnie niewielka. Uzasadnionym wydaje się więc być przypuszczenie, że dla skały o znacząco wyższej porowatości (np. rzędu 20%) wpływ zmian prędkości kompresji bądź dekompresji na wynik końcowy będzie wprawdzie jakościowo taki sam ale ilościowo znacząco większy. Autorzy planują kontynuację badań poświęconych tej tematyce.

Literatura

- Biot M.A., 1941: *General Theory of Three-Dimensional Consolidation*. J. Appl. Phys., Vol. 12, pp. 155-164.
 Biot M.A., 1955: *Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid*. J. Appl. Phys., Vol. 26, pp. 182-185.
 Gustkiewicz J., 1989: *Objętościowe deformacje skały i jej porów*. Arch. Min. Sci., Vol. 34, Issue 3, 593-609.

² Klasyfikacja testów ścisłości – patrz rozdz. 1 niniejszej pracy.

³ Więcej na ten temat przede wszystkim Biot [1941, 1955] ale także Gustkiewicz [1989, 1998] czy też Roegiers i in. [1998]; cały podręcznik poświęcony temu tematowi napisał Wang [2000].

- Gustkiewicz J., 1998: *Compressibility of rocks with a special consideration given to pore pressure*. In: "Poromechanics – A Tribute to Maurice A. Biot", Proc. of the Biot Conf. on Poromech., Louvain-la-Neuve (Belgium), 14-16 Sept. 1998, Thimus et al. (eds.), Balkema, Rotterdam, pp. 573-577.
- Nowakowski A., Młynarczyk M., Ratajczak T., Gustkiewicz J., 2003: *Wpływ warunków termicznych na zmianę niektórych właściwości fizycznych i strukturalnych wybranych skał*. Prace IMG PAN. Rozprawy, Monografie, nr 5, 104 str.
- Nurkowski J., 1995: *Wykorzystanie półprzewodnikowych przetworników do pomiaru temperatury w warunkach wysokiego ciśnienia*. W: XXVII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów MKM ,95. Materiały konferencyjne T.1. Wyższa Szkoła Inżynierska w Zielonej Górze, s. 300-303.
- Nurkowski J., 2004: *An inductive strain sensor for operation in high pressure environments*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., No. 41, pp. 175-180.
- Roegiers J.-C., Cui L., Bai M., 1998: *Poroelasticity applications*. In: Mechanics of Jointed and Faulted Rocks, Proc. 3rd Int. Conf. Mech. Joint. & Fault. Rock – MJFR-3, Vienna, Austria, 6-9 April 1998, Hans-Peter Rossmann (ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 39-48.
- Rychlewski J., 1965: *Note on the beginning of plastic deformation in a body under uniform pressure*. Arch. Mech. Stos., vol. 17, iss. 3, p. 405-412.
- Walsh J.B., 1965: *The effect of cracks on compressibility of rock*. J. Geophys. Res., Vol. 70, pp. 381-389.
- Wang H.F., 2000: *Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology*. Princeton University Press, Princeton & Oxford, USA, 287 pages.

The impact of hydrostatic pressure change rate on results of drained compressibility test

Abstract

Article presents some results of laboratory tests carried out to study the influence of the velocity of hydrostatic pressure change rate on result of a drained compressibility test. A series of drained compressibility tests was performed for sandstone samples soaked in kerosene, for different values of compression and decompression speed of fluid filling the chamber. It has been shown that with slow changes in fluid pressure, the pressure in the pores of the sample remains stable, which is confirmed by the lack of hysteresis on the plot showing sample deformation vs. fluid pressure in the chamber. With fast changes in the chamber liquid pressure the pore pressure inside the sample is delayed with respect to it. The pore pressure is lower than external pressure during compression and higher during decompression. In both cases a significant hysteresis appears which is proportional to the velocity of liquid pressure changes. The delay in equalization of the pressure inside and outside the sample may be explained the best way by the filtration process, which significantly delays the transport of the pore liquid to and from the interior of the sample. The laboratory tests were carried out for the hydrostatic pressure change rate of 0.5, 1, 2, 4 and 8 MPa/s, in the hydrostatic pressure range from 0 to 350 MPa.

Keywords: compressibility test, drained test, hydrostatic pressure, pore pressure, filtration