

Artur Dziedzic, Paweł Łukaszewski

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii

Metodyczne uwarunkowania badań geomechanicznych skał pobranych z dużych głębokości w trójosiowym stanie naprężenia

W artykule przedstawiono uwarunkowania metodyczne badań geomechanicznych mających na celu oznaczenie parametrów sprężystości i odkształcalności łańcuchów syluru i ordowiku oraz wapieni ordowiku pobranych z głębszych stref górotworu w dwóch rejonach. Parametry oznaczano przy zastosowaniu nieniszczących badań ultradźwiękowych, określając prędkość fali podłużnej (V_p) i dynamiczny moduł sprężystości (E_d), oraz w testach wytrzymałościowych trójosiowego ściskania w złożonym stanie naprężenia, wyznaczając moduł Younga (E) i współczynnik Poissona (ν). Uzyskane wyniki wskazują na dużą zmienność właściwości geomechanicznych łańcuchów oraz na niewielkie ich zróżnicowanie uwarunkowane lokalizacją. Duży zakres zmian parametrów geomechanicznych utrudnia jednoznaczną interpretację wyników badań i ujedliwioną charakterystykę geomechaniczną tych skał. Do pełnego rozpoznania ich cech fizyczno-mechanicznych, niezbędnego przy zabiegach szczelinowania w strefach niekonwencjonalnych złóż gazu ziemnego, konieczne są więc precyzyjne analizy geomechaniczne, prowadzone na materiale pobranym z otworów wiertniczych w interwałach głębokości o jak największym zagęszczeniu. Przy doborze prób badawczych z rdzeni wiertniczych łańcuchów syluru i ordowiku niezbędne jest zatem uwzględnienie aspektu geomechanicznego.

Słowa kluczowe: geomechanika, łupki sylurskie, złożony stan naprężenia, moduł Younga, współczynnik Poissona, wytrzymałość.

Methodological conditions of geomechanical tests under triaxial stress state of rocks taken from large depths

The paper presents methodological conditions of geomechanical tests used to determine the parameters of elasticity and deformability of Silurian and Ordovician shales and Ordovician limestones, which were taken from the deeper zones of the rock mass from the two different regions. The indicators were determined by using non-destructive ultrasonic tests, which determined the longitudinal wave propagation velocity (V_p) and dynamic module of elasticity (E_d). Young's modulus (E) and Poisson's ratio (ν) were calculated by using triaxial strength tests in complex stress state. The obtained results indicate a high variability of the geomechanical properties of shales and slight differences depending on their location. A large range of changes of geomechanical parameters, makes it difficult to unambiguously interpret results obtained from the tests. As a result, it is difficult to give unified geomechanical characteristics of these rocks. In order to comprehensively identify their physical and mechanical properties, which is necessary at hydraulic fracturing in unconventional reservoirs of natural gas, precise geomechanical analyses are required. For this reason, analysis should be carried out on material taken from the bore-holes in depth intervals with the highest density. During the selection of rock samples of Silurian and Ordovician shales from drill cores, it is necessary to take into consideration the geomechanical aspects.

Key words: geomechanics, Silurian shales, complex state of stress, Young's modulus, Poisson's ratio, strength.

Wstęp

Prawidłowa ocena właściwości geomechanicznych skał na dużych głębokościach, w warunkach złożonego stanu naprężenia i w wysokiej temperaturze, ma zasadnicze znaczenie dla skuteczności oraz efektywności zabiegów inżynierskich w górotworze, stosowanych m.in. w inżynierii naftowej [3, 6]. Poprawna charakterystyka cech fizycznych i mechanicznych ośrodków skalnych jest również istotna w interpretacji globalnych, regionalnych i lokalnych procesów geologicznych [9]. Właściwe prognozowanie reakcji masywu skalnego na zmiany stanu naprężenia w wyniku podjętej działalności inżynierskiej wymaga zatem rozpoznania jego właściwości w rzeczywistych warunkach ciśnieniowo-termicznych, panujących na danej głębokości. Jednak złożoność budowy geologicznej, niejednorodność materiału skalnego nawet w obrębie pojedynczego wydzielenia litologicznego oraz zmieniający się stan naprężenia w wyniku podjętej działalności inżynierskiej powodują, że rezultaty badań otrzymane w jednych warunkach nie mogą być bezpośrednio aproksymowane na inne [4, 13]. Stąd każda ocena musi nawiązywać do określonych warunków geologicznych i powinna być prowadzona w odpowiednio zawężonym interwale głębokościowym.

Gęstość ośrodka, jego sprężystość i odkształcalność są parametrami zmiennymi, zależnymi od stanu naprężenia oraz temperatury i muszą być możliwie dokładnie odniesione do jednoznacznie opisanych cech geologicznych skały. Jest to trudne, ponieważ występujące wraz z głębokością zmiany stanu naprężenia i temperatury w głębi Ziemi mają charakter złożony, a zmiany parametrów opisujących cechy materiału skalnego nie mogą być liniowo przenoszone wraz ze wzrostem głębokości, gdyż różne ośrodki w odmienny sposób reagują na zmiany stanu naprężenia i związane z tym procesy deformacji [15].

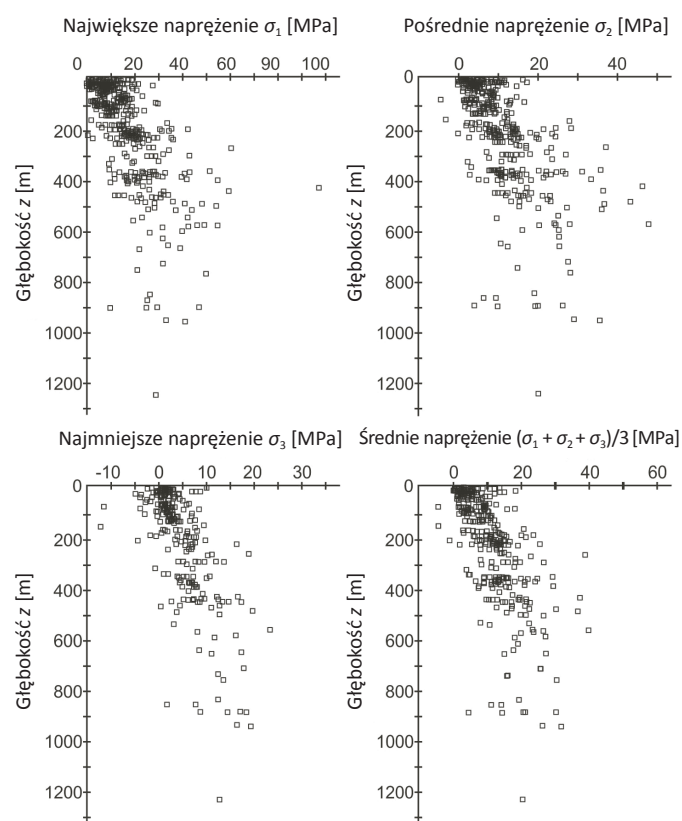
Określenie zależności między stanem naprężenia oraz stanem odkształcenia jest głównym celem badań i analiz geomechanicznych. Dla ośrodka skalnego znajdującego się na powierzchni zależność ta jest znana, ale na głębokości kilku kilometrów stan naprężenia ma charakter bardziej złożony i warunkują go przede wszystkim: wynikające z ciężaru skał nadkładu naprężenie pionowe σ_V oraz trudne do ustalenia maksymalne (σ_H) i minimalne (σ_h) naprężenia boczne (horyzontalne). W strefach niekonwencjonalnych złóż gazu stan naprężenia w górotworze komplikują dodatkowo stosowane współcześnie techniki wydobywania surowca, polegające na poziomych odwiertach o znacznym zasięgu i prognozowanym szczytowaniu gazu prostopadle do uwarstwienia.

Sam masyw skalny na dużej głębokości jest niejednorodny, nieciągły i w różny sposób splekany, a wyznaczone dla niego parametry są lokalnie zmienne i zróżnicowane. Złożoność tych uwarunkowań wpływa na „niepewność geologiczną”

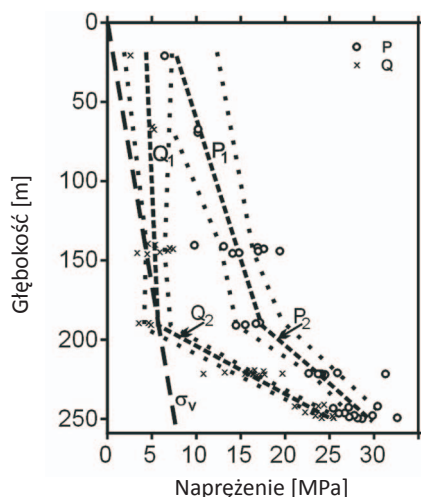
rozpoznania i trudność w jednoznacznej charakterystyce masywu skalnego i jego cech litologicznych, tektonicznych oraz geomechanicznych. Wszystkie te elementy są ze sobą związane i muszą być rozważane równolegle. Dla poprawnego projektowania zabiegów inżynierskich niezbędna jest zatem znajomość aktualnie występujących (rzeczywistych) naprężeń w górotworze, zarówno co do wielkości, jak i ich przestrzennej orientacji.

Ustalenie rzeczywistych wartości naprężenia jest bardzo trudne i mimo coraz dokładniejszych metod badawczych jest to możliwe tylko z dokładnością do 10÷20% [1]. Przy szacowaniu wielkości naprężeń poziomych wykorzystywane są duże zbiory danych otworowych, jednak wykazują one często znaczną zmienność, czego przykładem są dane pochodzące z obszaru Skandynawii dla głębokości do 1200 m (rysunek 1), które wskazują jedynie ogólne trendy zależności [17].

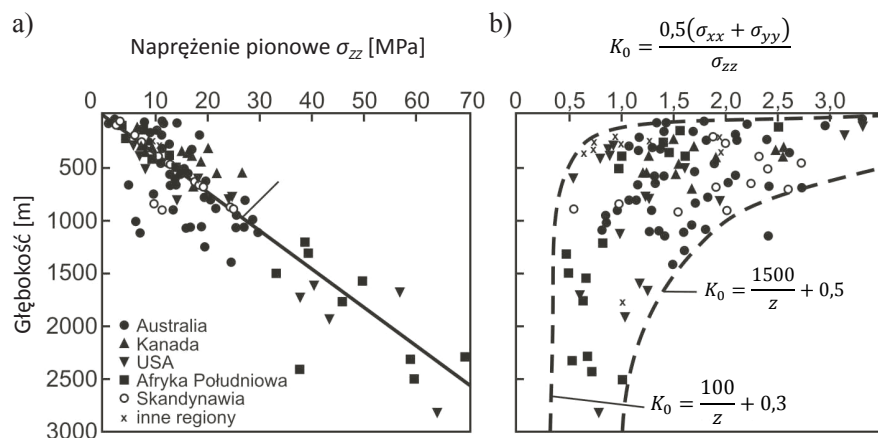
Na podstawie danych uzyskanych *in situ* dla tarczy kanadyjskiej [12] wartości σ_H i σ_h zmieniają się niezależnie w zakresie do 250 m głębokości (rysunek 2) i przy około 180 m obserwuje się wyraźny wzrost σ_H i σ_h . Najbardziej wiarygodne wartości naprężeń poziomych pochodzą z bardzo kosztownych badań *in situ* prowadzonych w Podziemnych Laboratoriach Badawczych (URL), wykonywanych tylko w kilku krajach na świecie (np. w Kanadzie).



Rys. 1. Zmiany naprężenia wraz z głębokością z obszaru Skandynawii [17]



Rys. 2. Zmiana naprężeń wraz z głębokością. Naprężenia poziome σ_H ($P_1 = 6,35 + 5,42 \cdot 10^{-2}z$) ($P_2 = 23,35 + 2,10 \cdot 10^{-1}z$) oraz σ_h ($Q_1 = 4,19 + 4,49 \cdot 10^{-3}z$) ($Q_2 = 59,42 + 3,35 \cdot 10^{-1}z$) na tarczy kanadyjskiej [12]



Rys. 3. Ogólna zmiana naprężenia wraz z głębokością [2]: a) naprężenia pionowe pomierzone *in situ*, b) współczynnik przeliczeniowy K_0

Pomocne przy ustalaniu wartości naprężeń poziomych (σ_H i σ_h) mogą być natomiast znane zależności między naprężeniami poziomymi a pionowymi, wyrażone tzw. wskaźnikiem K_0 . Na głębokości 1000 m K_0 zmienia się od 0,3 do 2,0 [2], czyli w 70% oznaczeń naprężenia poziome są większe od naprężenia pionowego. Jednak wraz z głębokością wskaźnik K_0 zbliża się do 1, co wynika z niwelowania naprężenia poziomego ciężarem skał nadkładu (rysunek 3).

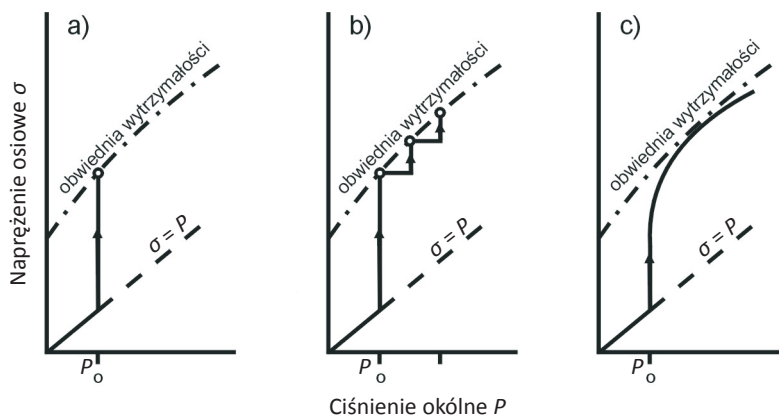
Określając właściwości ośrodka skalnego na dużych głębokościach, należy zdawać sobie sprawę z tego, że we wglębnych partiach skorupy ziemskiej stan naprężenia jest słabo rozpoznany, a penetracja otworowa często jeszcze tam nie sięgnęła. Z tego powodu rdzeniowane głębokie otwory są inspiracją do prowadzenia badań geomechanicznych na materiale skalnym pozyskanym z dużych głębokości.

Aby odwzorować panujące tam rzeczywiste warunki, badania geomechaniczne powinny być prowadzone w złożonym stanie naprężenia przy wysokim ciśnieniu i temperaturze oraz z uwzględnieniem ciśnienia porowego.

W laboratoryjnej praktyce geomechanicznej wykonuje się testy trójosiowego ściskania, na podstawie których możliwa jest charakterystyka procesu deformacji skał w złożonym stanie naprężenia. Wyróżnia się dwie główne metody badawcze: prawdziwe trójosiowe ściskanie, gdzie wszystkie trzy kierunki naprężenia mogą przyjmować różne wartości ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) oraz konwencjonalne trójosiowe ściskanie, w którym panuje stałe ciśnienie okólne P ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = P$). Pierwsza z wymienionych metod jest jednak rzadko stosowana ze względu na ograniczenia w dostępie do odpowiedniej aparatury. Dysponują nią jedynie nieliczne kraje na świecie (Japonia, USA), a wielką zaletą tej metody jest możliwość różnicowania wartości trzech odmiennie ukierunkowanych naprężeń [11].

Dużo bardziej powszechna jest metoda konwencjonalnego trójosiowego ściskania, dla której Międzynarodowe Towarzystwo Mechaniki Skał [10] opublikowało odpowiednie zalecenia metodyczne. W zależności od ścieżki obciążenia, a tym samym – od sposobu uzyskania obwiedni wytrzymałości, wyróżnia się trzy typy testów: pojedynczy test klasyczny, test wielokrotnego zniszczenia oraz test ciągłego zniszczenia (rysunek 4).

W Zakładzie Geomechaniki Uniwersytetu Warszawskiego, stosując konwencjonalne trójosiowe ściskanie, ustalano doświadczalnie parametry sprężystości sylurskich i ordowickich łożowców gazonośnych oraz skał otaczających warstwy łożowe. Badania prowadzono na



Rys. 4. Sposoby wyznaczania obwiedni wytrzymałości dla trzech typów badań trójosiowych [10]: a) pojedynczy test klasyczny, b) test wielokrotnego zniszczenia, c) test ciągłego zniszczenia

próbkach przygotowanych z fragmentów rdzeni wiertniczych z 2 rejonów geograficznych, z wydzielonymi 3 grupami litostratygraficznymi. W dotychczas prowadzonych badaniach trójosiowego ściskania przyjmowano kilka wariantów ciśnień okólnych (P) w komorze termociśnieniowej,

odwzorowujących przede wszystkim ciężar skał nadkładu na danej głębokości oraz ciśnienie złożowe. Przebadano łącznie ponad 300 próbek skalnych w zmiennych ciśnieniach okólnych (P) i w temperaturach (T) odpowiadających rzeczywistym na danej głębokości opróbowania.

Materiał badawczy

Badany materiał skalny pochodził z dwóch różnych rejonów (A i B) i został pobrany z przedziału głębokości obejmującego łącznie około 1400 m przelotu wierceń. W poszczególnych otworach wydzielone jednostki litostratygraficzne lokowały się na zmiennych głębokościach, ale ich wzajemny układ w profilu pionowym był zbliżony. Wydzielono 3 grupy litostratygraficzne: ilowce sylurskie (pierwsza grupa) i ilowce ordowickie (druga grupa) o teksturze łupkowej, z różną zawartością minerałów ilastych i zmienną obecnością węglanów stwierdzanych na podstawie reakcji z HCl, oraz wapienie ordowickie (trzecia grupa).

Do badań w trójosiowym stanie naprężenia przygotowano walcowe próbki skalne o średnicy w granicach 5 cm

i smukłości 2 cm, wytoczone na tokarce z centralnych części fragmentów rdzeni. Skały o warstwowej, łupkowej budowie narażone są w każdym przypadku na powstanie pęknięcia rozdzielczego wzdłuż powierzchni laminacji i z tej przyczyny obrabiane fragmenty rdzenia usztywniane są już na wstępie specjalnymi obejmami. Przygotowaną do badań wytrzymałościowych próbkę umieszcza się następnie między dwiema płaskimi powierzchniami z tworzywa sztucznego, dociskając je do próbek odpowiednio długimi śrubami (rysunek 5a). Przed wykonaniem testu wytrzymałościowego próbka uzbrajana jest w czujniki pomiarowe i umieszczana w komorze termociśnieniowej (rysunek 5b).

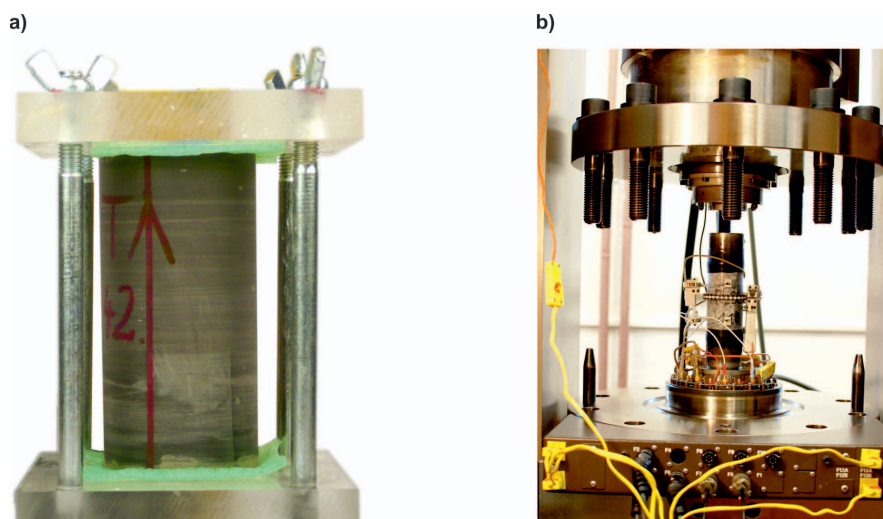
Metodyka badań

Do poprawnego wykonania serii badań geomechanicznych próbek wykonanych z fragmentów rdzeni wiertniczych niezbędna jest jak najszerza znajomość rzeczywistych warunków w górotworze w strefie opróbowania. W celu ustalenia ciśnienia okólnego w komorze termociśnieniowej konieczna jest informacja o głębokości rdzeniowania, gęstości skał nadkładu oraz wielkości ciśnienia złożowego. Istotne znaczenie ma także podstawowy opis budowy geologicznej uwzględniający wydzielone warstwy litologiczne oraz lokalne uwarunkowania tektoniczne. Szczegółowa interpretacja przebiegu odkształcenia i pęknięcia badanych skał wymaga natomiast bardziej dokładnych danych, w tym – znajomości ich cech fizycznych i chemicznych, rozpoznania składu mineralnego, udziału poszczególnych frakcji, charakteru spoiwa oraz informacji o zawartości węglanów.

W celu wstępnego ustalenia zmienności badanego materiału w laboratorium oznaczana jest gęstość objętościowa (ρ_s) każdej próbki. Na wszystkich próbkach przygotowanych z rdzeni, bezpośrednio po ich wytoczeniu na tokarce, przeprowadzane są także badania ultradźwiękowe w celu rozpoznania cech sprężystych. Pomiary wykonywane są metodą przejścia i rejestrowany jest czas propagacji impulsu

o częstotliwości 0,5 lub 1 MHz na drodze między głowicą nadawczą a odbiorczą.

Z obawy przed uszkodzeniem próbek są one umieszczane w specjalnych obejmach (rysunek 5a), a pomiary prędkości fali wykonywane są tylko w kierunku prostopadłym do ich osi podłużnej ($V_{p\perp}$). W większości wykonanych badań był to kierunek zgodny z laminacją i warstwowaniem, ponieważ próbki przygotowywane są z fragmentów rdzeni ukierunkowanych prostopadle do stropu i spągu warstw skalnych. Ze względu na występujące w próbkach skał łupkowych silne



Rys. 5. Próbkę ilowca przygotowaną do testów wytrzymałościowych: a) zabezpieczona przed uszkodzeniem bezpośrednio po wytoczeniu na tokarce, b) uzbrojona w czujniki i umieszczona w komorze termociśnieniowej

tłumienie, pomiar prędkości fali poprzecznej (V_s) jest często utrudniony i ustalenie „rzeczywistego” dynamicznego modułu sprężystości (na podstawie dynamicznego współczynnika Poissona) nie było możliwe. Wyznaczono go więc w sposób uproszczony jako $E_{d\perp}$, na podstawie pomiarów prędkości fali podłużnej ($V_{p\perp}$) oraz znanej gęstości objętościowej (σ_s):

$$E_{d\perp} = \rho_s \cdot V_{p\perp}^2 \text{ [GPa]}$$

Z analizy wyników szczegółowych badań ultradźwiękowych piaskowców fliszowych wynika, że „rzeczywisty”, uwzględniający prędkość fali poprzecznej (V_s), moduł sprężystości jest mniejszy o 10÷15% od uproszczonego, oznaczanego na podstawie gęstości objętościowej i prędkości fali podłużnej [14].

Badania wytrzymałościowe skał łupkowych mają na celu przede wszystkim ustalenie statycznych parametrów sprężystości: modułu Younga (E) i współczynnika Poissona (ν). Badania w trójosiowym stanie naprężenia wykonywane są z zastosowaniem pojedynczych testów klasycznych, zgodnie z zaleceniami ISRM [8] i wytycznymi norm amerykańskich [18].

W realizowanej procedurze badawczej stosowane są zmienne poziomy ciśnienie okólnych ($P = \sigma_2 = \sigma_3$) w komorze w zakresie od kilku do ponad 100 MPa. Podstawowe warianty badawcze nawiązują bezpośrednio do głębokości opróbowania i wielkości ciśnienia złożowego zmierzonego w otworze. W wariantcie I uwzględnia się jedynie ciężar nadkładu i ciśnienie w komorze szacowane jest na podstawie gęstości objętościowej skał występujących powyżej w profilu pionowym, znanej z geofizycznego rozpoznania wglębnego. W przypadku badań uwzględniających obecność ciśnienia złożowego (wariant II) ciśnienie okólne ($P = \sigma_2 = \sigma_3$) dla

danej głębokości dobierane jest w oparciu o generalne trendy wprowadzone przez Browna i Hoeka [2], Stephanssona [16] oraz w nawiązaniu do zaleceń sprecyzowanych przez Economidesa i Nolte’ego [6], a także Charleza [3], dotyczących zasad wyznaczania ciśnienia efektywnego. Wykorzystywana jest formuła uwzględniająca wpływ naprężenia pionowego (σ_v) wywołanego naciskiem warstw skalnych nadkładu oraz udział ciśnienia porowego p , odpowiadającego ciśnieniu złożowemu:

$$P = \sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha p) + \alpha p \text{ [MPa]}$$

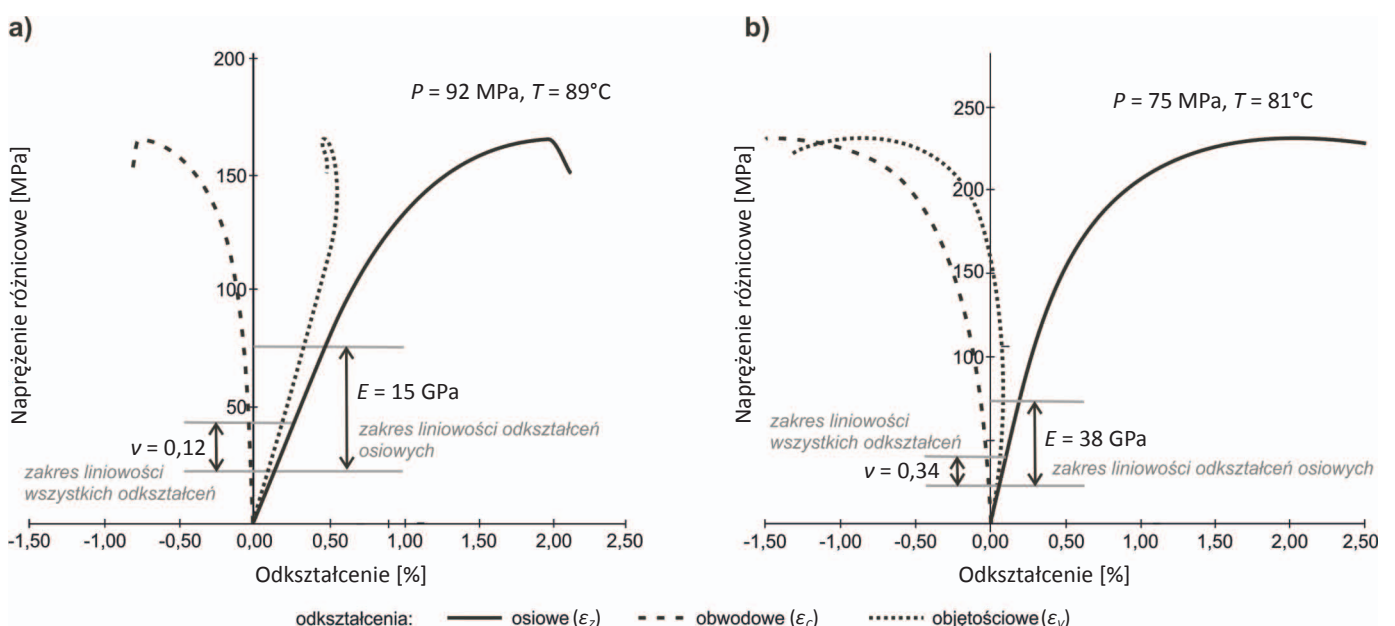
gdzie: ν – współczynnik Poissona, σ_v – naprężenie pionowe, α – stała porosprężystości Biota, p – ciśnienie porowe (złożowe).

W obliczeniach uwzględniano współczynnik Poissona równy 0,20, którego wartość oznaczono na podstawie wcześniejszych badań prowadzonych na podobnym litologicznie materiale skalnym. Naprężenie pionowe σ_v przyjmowano na podstawie szacowanego ciśnienia skał nadkładu z wariantu I.

Wartość ciśnienia złożowego (p) w większości realizowanych zadań była znana dzięki bezpośrednim oznaczeniom w otworze. W przypadku, gdy nie dysponowano takimi danymi, wartość tę określano na podstawie podanego gradientu ciśnienia złożowego w danych warunkach geologicznych bądź przyjmując średni gradient 0,011 MPa/m.

Stałą porosprężystości Biota (α) przyjmowano jako równą 0,7, opierając się na danych literaturowych [3, 5, 6].

W pozostałych wariantach badań uwzględniano różne poziomy ciśnienie okólnych ($P = \sigma_2 = \sigma_3$), zarówno wartości pośrednie między wariantem I i II, jak i skrajnie niskie, np.



Rys. 6. Przykłady krzywych deformacji z testów wytrzymałościowych z zakresami liniowości odkształceń i wartościami współczynnika Poissona oraz modułu Younga

5 MPa, albo skrajnie wysokie w okolicach 120 MPa. Uzyskano zatem szeroki zakres wartości P , co stwarza możliwość wyznaczenia obwiedni wytrzymałości oraz pozwala na bardziej kompleksową ocenę reakcji górotworu na zmienne wartości ciśnienia złożowego.

Temperaturę badań w komorze termociśnieniowej (T) dobierano zwykle na podstawie bezpośrednich pomiarów w otworze. W sytuacji, kiedy taką informacją nie dysponowano, ustalano ją na podstawie znanej głębokości opróbowania oraz stosowanego powszechnie gradientu geotermicznego $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ głębokości.

Wyniki badań

Uzyskane w badaniach wartości dynamicznych (prędkość fali podłużnej i moduł sprężystości) i statycznych (moduł Younga i współczynnik Poissona) parametrów sprężystości wskazują na znaczne zróżnicowanie materiału skalnego (tablica 1). Występuje ono w szczególności w łowcach sylurskich, gdzie wszystkie cztery parametry (V_p , E_d , E i ν) zmieniają się w bardzo szerokim zakresie. Większą rozpiętość uzyskano w skałach rejonu A, co zapewne wynika z dużej ilości oznaczeń. Howce ordowiku charakteryzują się nieco mniejszą zmiennością i jednocześnie w ich przypadku zauważalne jest zróżnicowanie parametrów między rejonami A i B.

Odrębną grupę litologiczną stanowią wapienie ordowickie, które w przeprowadzonych badaniach geomechanicznych miały wyraźnie wyższą prędkość fali (V_p) i wyższe wartości modułu Younga (E). Parametry te osiągają górne granice oznaczeń w łowcach, czasami je przekraczając, przy czym zróżnicowanie wartości parametrów dla skał rejonu A jest także wyraźne.

Właściwości sprężyste badanych skał rozpoznawano za pomocą pomiarów prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej,

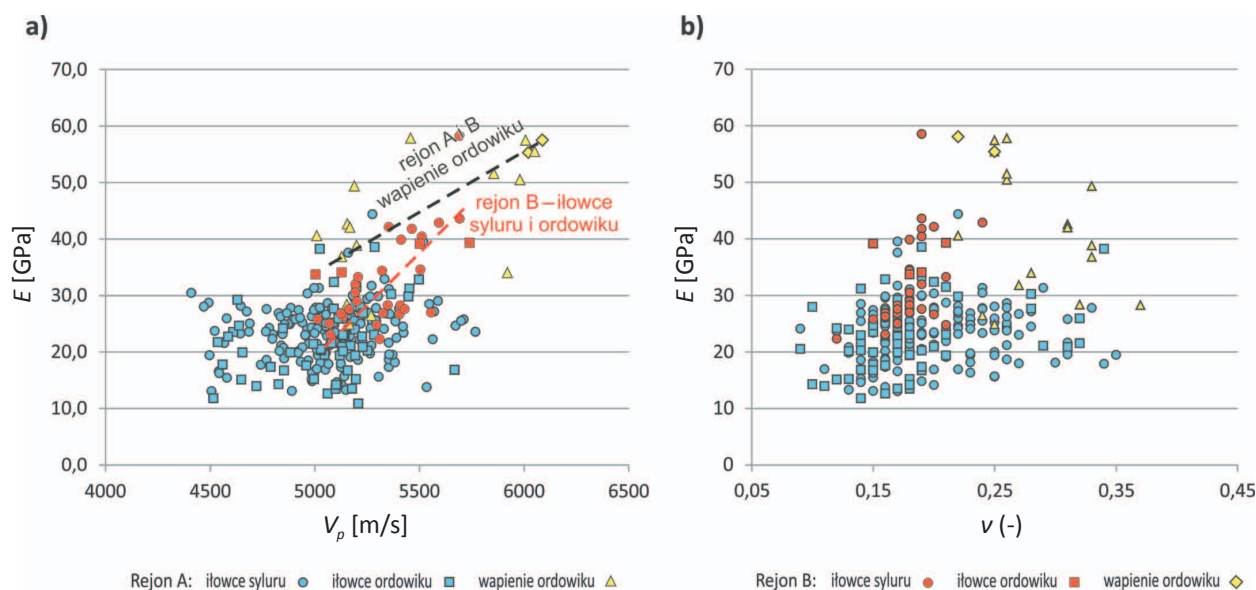
Moduł Younga (E) i współczynnik Poissona (ν) wyznaczano na podstawie autorskich procedur interpretacyjnych, nawiązujących do fenomenologicznego opisu deformacji skał pod obciążeniem [7] i zgodnych z normami amerykańskimi [19] oraz zaleceniami ISRM [8]. Wykorzystywano w tym celu krzywe deformacji uzyskane z badań wytrzymałościowych (rysunek 6). Ustalano na nich zakresy liniowości wszystkich odkształceń, w celu oznaczenia współczynnika Poissona, oraz zakres liniowości odkształceń osiowych, dla którego definiowano moduł Younga.

wykonywanych w kierunku zgodnym z uwarstwieniem (prostopadle do osi próbek) oraz w badaniach wytrzymałościowych jako moduł Younga na podstawie krzywych deformacji uzyskanych podczas ściskania próbek skalnych równoległe do ich osi. W całej grupie badanych skał trudno jest jednak doszukiwać się wyraźnych i jednoznacznych korelacji między tymi grupami parametrów (rysunek 7a), co szczególnie widoczne jest w przypadku łowców syluru i ordowiku z rejonu A. Natomiast w łowcach z rejonu B zależność taka występuje, choć jej charakter jest przybliżony i bardzo ogólny. Należy przy tym pamiętać, że dla tych skał wykonywano mniej oznaczeń i być może wraz ze wzrostem liczby badań korelacja ta ulegałaby rozmyciu.

Brak jednoznacznych zależności między dynamicznymi i statycznymi parametrami sprężystości może także, i to dość znacząco, warunkować kierunek wykonywanych oznaczeń. Parametry statyczne (E i ν) związane są z osiowym ściskaniem próbki w komorze termociśnieniowej, prostopadle do warstwowania i laminacji, natomiast oznaczenia dynamiczne (V_p) wykonywano w kierunku równoległym do tych

Tablica 1. Zmienność wybranych parametrów geomechanicznych badanych skał

Rejon (liczba badań)	Litologia	Wartość	ρ_s [kg/m ³]	$V_{p\perp}$ [m/s]	$E_{d\perp}$ [GPa]	E [GPa]	ν [-]	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ [MPa]
A (245)	łowce syluru	min.	2356	4409	46,5	13,1	0,09	65
		max.	2742	5767	89,7	44,4	0,35	299
	łowce ordowiku	min.	2351	4515	47,9	10,9	0,09	104
		max.	2730	5668	86,3	38,6	0,34	357
	wapienie ordowiku	min.	2645	5009	67,6	24,9	0,22	156
		max.	2718	6051	98,8	57,8	0,37	352
B (33)	łowce syluru	min.	2613	5013	65,9	22,3	0,12	124
		max.	2698	5713	86,5	45,2	0,24	353
	łowce ordowiku	min.	2626	5003	66,4	33,7	0,15	194
		max.	2724	5739	89,7	39,3	0,21	262
	wapienie ordowiku	min.	2692	6034	98,0	55,4	0,22	254
		max.	2729	6081	100,9	58,0	0,25	274



Rys. 7. a) Zależność modułu Younga (E) od prędkości fali podłużnej (V_p); b) związek modułu Younga (E) ze współczynnikiem Poissona (ν) dla trzech grup litostratygraficznych pochodzących z dwóch rejonów

elementów strukturalno-teksturalnych. W przypadku skał łupkowych anizotropia uwarunkowana warstwowaniem ma istotne znaczenie, co może skutkować ograniczoną zależnością tych dwóch grup parametrów. W wapieniach, gdzie brak jest tak specyficznych elementów budowy, wzrost V_p jest już związany korelacyjnie ze wzrostem E (rysunek 7a) dla skał obu rejonów.

Mniejsza niejednorodność wapieni i ograniczenie lokalnych różnic w strukturze uwidacznia się również w zależności

między statycznymi parametrami sprężystości (E i ν) (rysunek 7b). Tylko w skałach węglanowych wzrostowi wartości E odpowiada spadek ν , co wyraźnie jest widoczne przy połączeniu skał z obu rejonów. Natomiast w iłowcach, choć zmienność modułu Younga jest znaczna, to jednak nie jest ona jednoznacznie skorelowana ze zmianami współczynnika Poissona. Zaobserwować można przy tym, że iłowce rejonu B tworzą na wykresie odrębną grupę, z racji wyższych wartości E i ograniczonej do 0,25 wartości ν .

Podsumowanie

Ocena właściwości skał pobranych z dużych głębokości wymaga odtworzenia w laboratorium warunków jak najbardziej zbliżonych do panujących w górotworze, w strefie przewidywanych zabiegów inżynierskich. W badaniach wytrzymałościowych w trójosiowym stanie naprężenia niezbędne jest przede wszystkim przyjęcie właściwego ciśnienia okólnego oraz temperatury w komorze termocisnieniowej. Przy projektowaniu procedur badawczych laboratorium geomechaniczne musi zatem dysponować informacją opartą na bezpośrednich pomiarach geofizycznych oraz wstępną charakterystyką stanu naprężenia i podstawowym opisem geologicznym badanego materiału skalnego. Dopiero na tej podstawie jest możliwe poprawne określenie warunków badania.

Szczegółowa interpretacja uzyskanych wyników badań wymaga natomiast dokładnego rozpoznania skał, nawet w zakresie pojedynczych próbek. Jest to szczególnie istotne w przypadku ośrodków anizotropowych, niejednorodnych, gdzie duże znaczenie i wpływ na wyniki badań mają lokalne

cechy strukturalno-teksturalne. Do takich skał zaliczają się osady o charakterystycznej łupkowej budowie.

W badanych iłowcach syluru i ordowiku stwierdzono dużą zmienność oznaczanych doświadczalnie parametrów. Nie jest ona jednak uwarunkowana głównie głębokością występowania, pozycją stratygraficzną ani gęstością. Decydujący wpływ na wartości parametrów geomechanicznych mają zróżnicowane cechy strukturalne próbek, co utrudnia w znacznym stopniu jednoznaczną interpretację wyników badań i ujednoczoną charakterystykę geomechaniczną tych skał.

W badaniach nie zaobserwowano również większego wpływu uwarunkowań lokalizacyjnych na oznaczane parametry. Na tle wszystkich badanych iłowców w niewielkim stopniu wyróżniają się jedynie skały ordowiku rejonu B, w których odnotowano mniejszą zmienność oznaczanych parametrów, jak również generalnie wyższe ich wartości.

W celu szczegółowego rozpoznania właściwości geomechanicznych skał złożowych syluru i ordowiku konieczna jest, w miarę możliwości, jak największa liczba testów wy-

trzymałościowych. Dla każdej bowiem próbki jej lokalne uwarunkowania strukturalno-teksturalne mają duży wpływ na uzyskiwane parametry i dla poprawności oraz skuteczności wykonywanych w górotworze zabiegów inżynierskich (np.

szczelinowanie) może to mieć istotne znaczenie. W geologicznej ocenie materiału wydobytego z otworu, przy selekcji do dalszych analiz właściwych odcinków rdzeni i próbek badawczych, konieczny jest zatem także aspekt geomechaniczny.

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 1, s. 3–10

Artykuł nadesłano do Redakcji 15.08.2014 r. Zatwierdzono do druku 9.10.2014 r.

Literatura

- [1] Amadei B., Stephansson O.: *Rock stress and its measurement*. Publish. Chapman & Hall 1997, pp. 1–490.
- [2] Brown E. T., Hoek E.: *Trends and relationship between measured rock in-situ and depth*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 1978, 15, pp. 211–215.
- [3] Charlez P. A.: *Rock Mechanics. Vol. 2. Petroleum applications*. Editions Technik. Paris 1997, pp. 1–661.
- [4] Dziedzic A., Pininska J.: *The elastic wave velocity in rocks under triaxial stress at the pressure and temperature*. Rock mechanics for resources, energy and environment. Proceedings of Eurock 2013, ISRM Intern. Symp. Taylor & Francis Group 2013, pp. 255–260.
- [5] Economides M. J., Hill A. D., Ehlig-Economides C. A.: *Petroleum Production Systems*. Prentice Hall 1994.
- [6] Economides M. J., Nolte K. G. (editors): *Reservoir Stimulation*. Schlumberger, Educational Services, Houston 1989.
- [7] Hallbauer D. K., Wagner H., Cook N. G. W.: *Some observations concerning the microscopic and mechanical behaviour of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, London 1973, 10, pp. 713–726.
- [8] ISRM: *Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials*. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization Testing and Monitoring: 1974–2006. Ed.: Ulusay R., Hudson J. A., 2007, pp. 137–140.
- [9] Karato S.: *Deformation of Earth Materials. An Introduction to the Rheology of Solid Earth*. Cambridge University, New York 2008, pp. 1–463.
- [10] Kovari K., Tisa A., Einstein H. H., Franklin J. A.: *Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 1983, 20, pp. 285–290.
- [11] Kwasniewski M.: *Mechanical behaviour of rocks under true triaxial compression conditions – volumetric strain and dilatancy*. Archives of Mining Sciences 2007, 52 (3), pp. 409–435.
- [12] Lang P. A., Everitt R. A., Ng L. K. W., Thomson P. M.: *Horizontal in situ stresses versus depth in the Canadian Shield at the underground research laboratory*. Proc. Int. Sym. of Rock stress & Rock Stress Measurements 1986, pp. 449–456.
- [13] Lukaszewski P.: *Deformational properties of flysch sandstone under conventional triaxial compression conditions*. Archives of Mining Sciences 2007, 52 (3), pp. 371–385.
- [14] Lukaszewski P.: *Odkształcalność piaskowców fliszowych w złożonym stanie naprężenia*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2013.
- [15] Pininska J.: *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skal Polski na dużych głębokościach w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury*. Zakład Geomechaniki Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2011.
- [16] Stephansson O.: *Rock stress in the Fennoscandian shield*. *Comprehensive Rock Engineering*. (ed. J. A. Hudson), Pergamon Press, Oxford 1993, chapter 17, vol. 3. pp. 445–459.
- [17] Stephansson O., Sarkka P., Myrvang A.: *State of stress in Fennoscandia*. Proc. ISRS & RSM 1986, pp. 21–32.

Akty prawne i normatywne

- [18] ASTM Designation: D 2664-95a *Standard Test Method for Triaxial compressive strength of Undrained Rock Core specimens without Pore Pressure Measurements*.
- [19] ASTM Designation: D 3148-02 *Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression*.



Dr Artur DZIEDZIC
Starszy wykładowca
Uniwersytet Warszawski
Wydział Geologii
ul. Żwirki i Wigury 93
02-089 Warszawa
E-mail: artur.dziedzic@uw.edu.pl



Dr hab. Paweł ŁUKASZEWSKI
Adiunkt
Uniwersytet Warszawski
Wydział Geologii
ul. Żwirki i Wigury 93
02-089 Warszawa
E-mail: pawel.lukaszewski@uw.edu.pl