

Ocena wytrzymałości piaskowców fliszowych przy różnych ścieżkach obciążenia w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania

Paweł Łukaszewski*



Assessment of Flysch sandstones' strength at various loading paths in conditions of conventional triaxial compression. Prz. Geol., 53: 596–601.

S u m m a r y. The paper presents an assessment of Flysch sandstones' strength at various loading paths in conditions of conventional triaxial compression tests. Three types of tests were conducted: single triaxial failure tests at three various confining pressures, multiple failure tests and continuous failure tests. Much attention was given to tests' methodics, the courses of multiple failure tests and the most rare continuous failure tests were described. The highest values of Krosno sandstones strength was observed at the load path up to 90 MPa corresponding with single triaxial failure tests. Samples exposed to either multiple or continuous failure were subjected to "material fatigue" and their strength values are lower — about 30 MPa.

Strength loops obtained from conducted tests also show some differences. The higher values of internal friction angle and lower values of cohesion were obtained for triaxial failure tests than for multiple and continuous failure ones. The conducted tests also gave possibility to compare angle of failure (shear) surface depending on the loading path at condition of conventional triaxial test.

Key words: Krosno sandstones, triaxial tests, strength and strain, strength envelope

Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał należy badać w takich warunkach, w jakich występują we wnętrzu Ziemi, czyli w podwyższonych ciśnieniach i temperaturach. W literaturze światowej wytrzymałość skał jest opisywana najczęściej na podstawie badań wykonanych na próbkach walcowych w warunkach konwencjonalnego, trójosiowego ściskania, czyli w warunkach osiowo-symetrycznego stanu naprężeń ściskających ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) (Gustkiewicz, 1989; Li & Zhao, 1999; Łukaszewski, 2004). Ostatnio coraz więcej jest również prac dotyczących prawdziwego trójosiowego stanu naprężeń ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) (Reik, 1978; Kwaśniewski, 2002).

Choć pierwsze badania w trójosiowym stanie naprężeń przeprowadzono na początku XX w. — na przykład klasyczne już eksperymenty Von Carmana z 1911–1912 r. na marmurze z Carrary (Gramberg, 1989) — to dopiero w latach osiemdziesiątych XX w. Międzynarodowe Towarzystwo Mechaniki Skał (ISRM) podjęło próby pewnej standaryzacji, upowszechnienia i uporządkowania metod badawczych w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$) i w konsekwencji opublikowało zalecenia dotyczące badań trójosiowych (Kovari i in., 1983). Zgodnie z tymi zaleceniami, w zależności od ścieżki obciążenia, a tym samym od sposobu uzyskania obwiedni wytrzymałościowej, wyróżnić można trzy typy testów trójosiowych: pojedynczy test klasyczny, test wielokrotnego zniszczenia i test ciąglego zniszczenia (ryc. 1).

W niniejszej pracy przedstawiono szczegółowo metodykę oraz wyniki wszystkich trzech testów w warunkach konwencjonalnego, trójosiowego ściskania dla wybranych piaskowców fliszowych.

Charakterystyka badanych skał

Materiał badawczy do badań stanowiły gruboławicowe piaskowce fliszowe eksploatowane w kamieniołomie Górka–Mucharz, położonym na wschodnim krańcu Beskidu Małego, ok. 12 km na południe od Wadowic. Kamieniołom

ten znajduje się w obrębie płaszczowiny śląskiej, na północ od czoła nasunięcia płaszczowiny magurskiej (ryc. 2). Eksploatowane w nim skały, to piaskowce średnioziarniste należące do dolnych warstw krośnieńskich, które datowane są na górny eocen–oligocen. Są to skały niebieskoszare, o spoiwie węglanowym i węglanowo-ilastym, z bezładnie rozmieszczonymi dużymi ziarnami muskowitu na tle drobnoziarnistej masy kwarcowej z minką. Pod względem petrograficznym badany materiał stanowi średnioziarnistą wale lityczną lub arkozową.

Metodyka badań

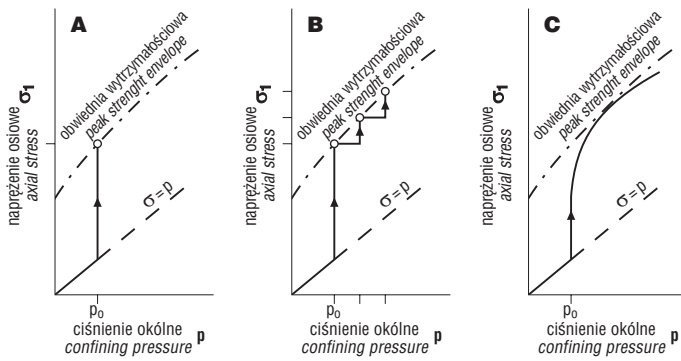
Badania trójosiowe przeprowadzono w laboratorium Zakładu Geomechaniki Uniwersytetu Warszawskiego w szytywnej prasie MTS 815, wyposażonej w komorę trójosiową typu MTS 656.05 z układem generacji zmian dynamicznych ciśnienia. Komora ta umożliwia zadanie ciśnienia okólnego na próbki cylindryczne maksymalnie do 140 MPa. W środku komory jest zainstalowany specjalny czujnik siły (maksymalna siła 2700 kN), który podobnie jak próbka skalna jest wystawiony na działanie ciśnienia okólnego. Czujnik ten mierzy zatem siłę bez uwzględnienia ciśnienia okólnego. Sama próbka skalna podczas badania znajduje się między specjalnymi podkładkami i osłonięta jest specjalną osłonką termokurczliwą. Stosowane w badaniach trójosiowych specjalne dwa ekstensometry do pomiaru odkształceń osiowych i do pomiaru odkształceń obwodowych są zakładane na próbki już zabezpieczone osłonkami.

Opisany zestaw badawczy umożliwia przeprowadzenie wszystkich trzech testów trójosiowego ściskania ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$) zgodnie z zaleceniami ISRM. Dla piaskowców krośnieńskich z Mucharza przeprowadzono wszystkie trzy typy testów trójosiowych.

Pojedynczy test klasyczny przebiega dwufazowo. W pierwszej fazie na próbkę zadaje się określone ciśnienie okólne $p = \sigma_2 = \sigma_3$, a w drugiej fazie obciąża się ją osiowo aż do zniszczenia.

Dla piaskowców krośnieńskich zastosowano trzy różne ciśnienia okólne, równe odpowiednio 30, 60 i 90 MPa, które zadawano ze stałą prędkością wynoszącą 3,3 MPa/s. Po

*Zakład Geomechaniki, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; pawel.lukaszewski@uw.edu.pl



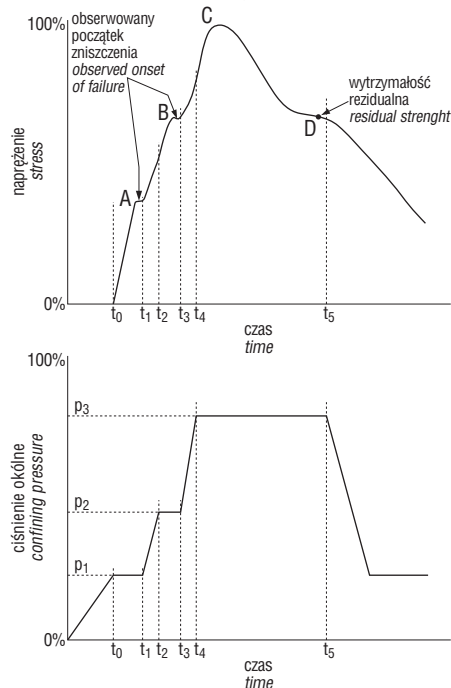
Ryc. 1. Sposoby uzyskania obwiedni wytrzymałościowej dla trzech typów badań trójosiowych (Kovari i in. 1983); a — pojedynczy test klasyczny, b — test wielokrotnego zniszczenia, c — test ciągłego zniszczenia

Fig. 1. Determination of strength loops for three types of triaxial tests; a — single triaxial failure test, b — multiple failure test, c — continuous failure test



Ryc. 2. Lokalizacja kamieniołomu Górká-Mucharz na mapie tektonicznej (Poprada & Nemcok, 1988–1989)

Fig. 2. Location of the Górká-Mucharz quarry in a tectonic map (Poprada & Nemcok, 1988–1989)



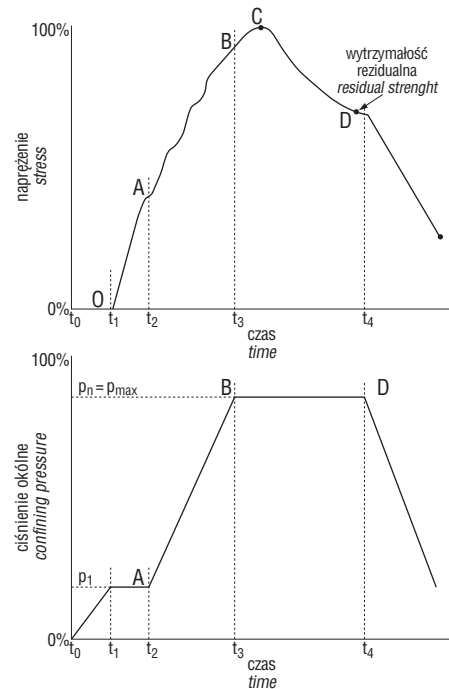
Ryc. 3. Schemat przebiegu testu wielokrotnego zniszczenia
Fig. 3. Diagram of multiple failure test

zadaniu określonego ciśnienia okólnego próbki obciążano ze stałą prędkością przyrostu przesuwu tłoka równą 0,05 mm/min.

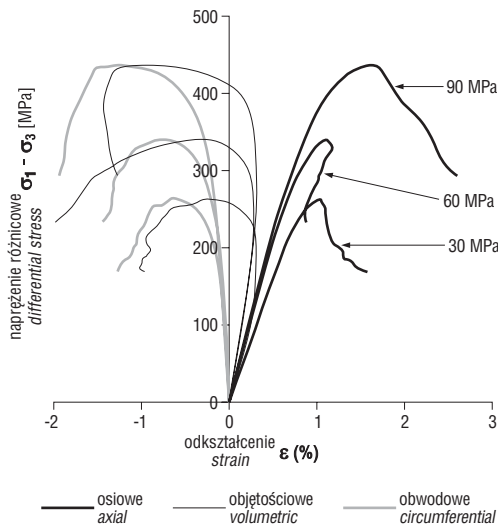
Test wielokrotnego zniszczenia jest dużo bardziej skomplikowany i oprócz wymagań sprzętowych wymaga znacznej sprawności od operatora. Test ten przebiega w kilku fazach (Kovari & Tisa, 1975), co przedstawiono na ryc. 3. Rozpoczyna się od zadania na próbkę skalną pierwszego, inicjalnego ciśnienia okólnego p_1 . Następnie próbkę obciąża się osiowo obserwując przebieg deformacji na wykresie w czasie rzeczywistym. Przed samym zniszczeniem (punkt A) operator zwiększa ciśnienie okólnie do poziomu p_2 i następnie próbka skalna dalej obciążana jest osiowo. Gdy jest obserwowany ponownie początek zniszczenia (punkt B) zwiększa się ciśnienie okólnie do wartości p_3 . Przy tym trzecim poziomie ciśnienia okólnego próbkę obciążamy już nie tylko do momentu zniszczenia (punkt C), ale tak aby uzyskać opadającą gałąź deformacji z charakterystyczną wytrzymałością rezydualną (punkt D). Badanie kończymy po uzyskaniu poziomu wytrzymałości rezydualnej zdejmując z próbki najpierw ciśnienie okólnie a następnie obciążenie osiowe.

W jednym teście wielokrotnego zniszczenia dla piaskowców krośnieńskich z Mucharza zastosowano ciśnienia okólnie wynoszące, podobnie jak w testach klasycznych, 30, 60 i 90 MPa. Ciśnienia te zadawano z mniejszą prędkością niż w testach klasycznych, równą 5 MPa/min. Natomiast z taką samą prędkością obciążano same próbki i w ciągu całego testu przyrost obciążenia był regulowany stałą prędkością przyrostu przesuwu tłoka, wynoszącą 0,05 mm/min.

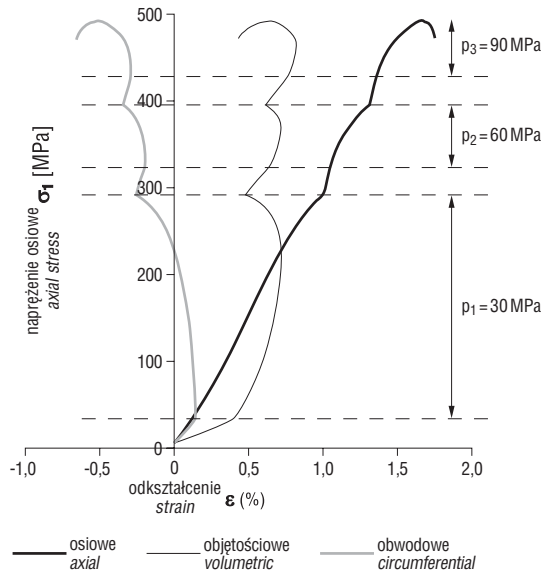
Test ciągłego zniszczenia jest najbardziej złożony ze wszystkich testów trójosiowych. Należy również wspomnieć o dużych wymaganiach sprzętowych związanych z koniecznością sterowania ciśnieniem okólnym podczas samego eksperymentu (Nowakowski, 1994).



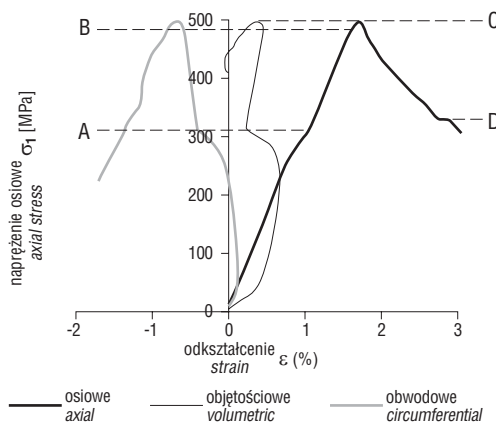
Ryc. 4. Schemat przebiegu testu ciągłego zniszczenia
Fig. 4. Diagram of continuous failure test



Ryc. 5. Krzywe naprężenie różnicowe–odkształcenie dla różnych ciśnień okólnych uzyskane z testów klasycznych
Fig. 5. Differential stress–strain curves for various confining pressures obtained from the single failure test



Ryc. 6. Krzywe naprężenie osiowe–odkształcenie uzyskane z testu wielokrotnego zniszczenia
Fig. 6. Axial stress–strain curves obtained from the multiple failure test



Ryc. 7. Wyniki z testów ciągłego zniszczenia: krzywe naprężenie–odkształcenie oraz zależność pomiędzy naprężeniem a ciśnieniem okólnym
Fig. 7. Results of tests of continuous failure tests: stress–strain curves and dependence of stress upon confining strain

Test ten przebiega w kilku fazach, co przedstawiono na ryc. 4. Rozpoczyna się on od zadania na próbkę skalną pierwszego, inicjalnego ciśnienia okólnego p_1 . Następnie, w drugiej fazie, próbkę obciąża się osiowo obserwując przebieg deformacji na wykresie w czasie rzeczywistym. Przed samym zniszczeniem (punkt A), w trzeciej fazie, zwiększa się ciśnienie okólnie, sterując nim tak, aby na krzywej naprężenie–odkształcenie osiowe uzyskać w czasie rzeczywistym prostą równoległą do liniowej części krzywej deformacji otrzymanej w drugiej fazie. Po uzyskaniu określonego, zamierzonego ciśnienia okólnego, zostaje ono zatrzymane na danym poziomie $p_n = p_{max}$ (punkt B). W fazie czwartej próbka, obciążana dalej osiowo przy stałym ciśnieniu okólnym, ulega zniszczeniu co odpowiada punktowi C na krzywej deformacji. Po zaobserwowaniu, w czasie rzeczywistym na opadającej gałęzi deformacji punktu D, odpowiadającego wytrzymałości rezidualnej, kończymy badanie poprzez zdjęcie z próbki najpierw ciśnienia okólnego, a następnie obciążenia osiowego.

W jednym teście ciągłego zniszczenia dla piaskowców krośnieńskich z Mucharza zastosowano pierwsze, inicjalne ciśnienia okólnie wynoszące 30 MPa, zadając je ze stałą prędkością równą 3,3 MPa/s. Po zadaniu ciśnienia okólnego próbki obciążano najpierw ze stałą prędkością przyrostu przesuwu tłoka równą 0,05 mm/min, a następnie, w trzeciej fazie testu, ze stałą prędkością przyrostu ciśnienia okólnego wynoszącą początkowo 0,02 MPa/s. Dla analizowanych piaskowców ciśnienie okólnie zwiększano do wartości równej $p_n = p_{max} = 90$ MPa.

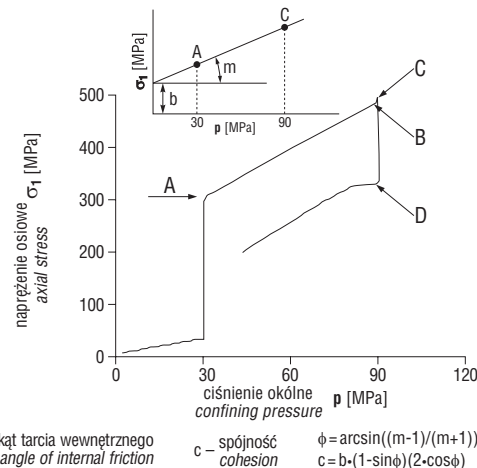
Podczas wszystkich testów trójosiowych rejestrowano za pomocą odpowiednich czujników: siłę (kN), ciśnienie okólnie (MPa), przesuw tłoka prasy (mm), odkształcenie osiowe [%] oraz odkształcenie obwodowe [%]. Odkształcenie objętościowe (ϵ_v) obliczano natomiast na podstawie rzeczywistych pomiarów odkształcenia osiowego (ϵ_a) i obwodowego (ϵ_c) ze wzoru:

$$\epsilon_v = \epsilon_a + 2\epsilon_c$$

Wszystkie badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej na próbkach o średnicy 5 cm i smukłości 2.

Wyniki badań

Wyniki klasycznych testów trójosiowych dla próbek piaskowca krośnieńskiego z Mucharza przedstawiono na



ϕ – kąt tarcia wewnętrzznego
 angle of internal friction
 c – spójność
 cohesion
 $\phi = \arcsin((m-1)/(m+1))$
 $c = b \cdot (1 - \sin\phi) / (2 \cdot \cos\phi)$

krzywych naprężenie różnicowe–odkształcenie dla kolejnych wartości ciśnienia okólnego (ryc. 5).

Analizując przedstawioną rodzinę krzywych zauważyć można, że ze wzrostem ciśnienia okólnego zwiększa się pionowy i poziomy zasięg krzywych oraz zmienia się ich kształt. Wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego rośnie zatem wytrzymałość na ściskanie, odkształcalność, nachylenie wznoszącej krzywej naprężenie–odkształcenie oraz spadek naprężenia po zniszczeniu (Gustkiewicz, 1999). Analizując szczegółowo odkształcalność (tab. 1) zauważyć można wyraźny wzrost wartości krytycznych odkształceń osiowych i obwodowych oraz modułu Younga i współczynnika Poissona wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego.

Na ryc. 6 przedstawiono przykład krzywych deformacji uzyskanych na podstawie testu wielokrotnego zniszczenia w postaci pełnych charakterystyk naprężenie osiowe – odkształcenie osiowe, obwodowe i objętościowe, na których zaznaczono kolejne fazy deformacji dla trzech zastosowanych ciśnień okólnych. Jeszcze bardziej złożone krzywe deformacji uzyskano na podstawie testów wielokrotnego zniszczenia. Ich wyniki przedstawiono na krzywych: naprężenie osiowe–odkształcenie oraz naprężenie osiowe–ciśnienie okólnie (ryc. 7). Na wykresach tych zaznaczono opisane wcześniej cztery fazy deformacji, za pomocą zdefiniowanych na ryc. 4 punktów A, B, C i D.

Przeprowadzone badania trójosiowe umożliwiają ocenę wytrzymałości piaskowców fliszowych przy różnych ścieżkach obciążenia. W tym celu porównano wyniki pojedynczych testów klasycznych z wynikami testu wielokrotnego zniszczenia oraz z wynikami testu ciągłego zniszczenia (ryc. 8). Zauważyć można dużą zbieżność uzyskanych wyników dla ciśnień okólnych równych 30 i 60

MPa. Różnice w wytrzymałości między poszczególnymi testami nie przekraczają w tym przypadku 5 MPa. Natomiast dla maksymalnych ciśnień okólnych rzędu 90 MPa zarejestrowano większe różnice w wytrzymałości, dochodzące do 30 MPa. Wyraźnie zatem widać, że próbki w wyniku wielokrotnego i ciągłego zniszczenia uległy „zmęczeniu” i wykazują mniejszą wytrzymałość.

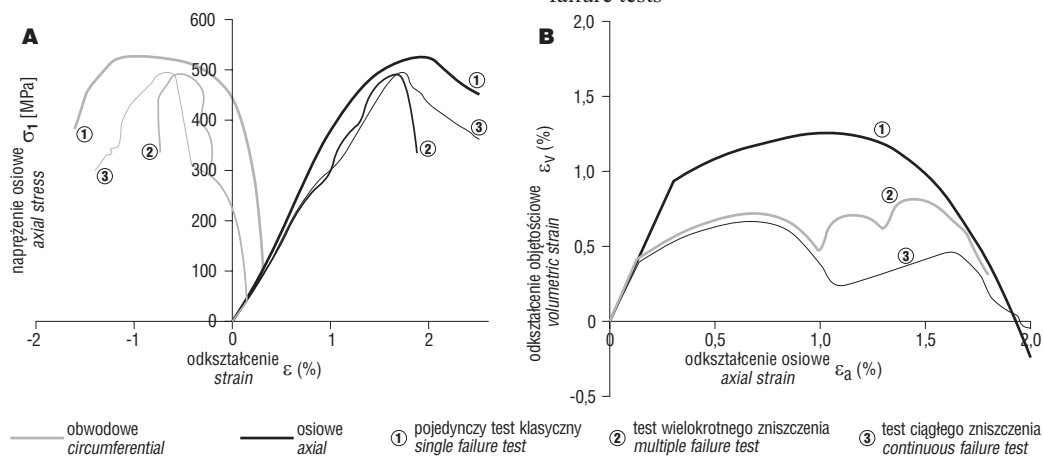
Analizując proces deformacji przy różnych ścieżkach obciążenia (ryc. 9A) zauważyć można że krzywe uzyskane na podstawie testu wielokrotnego zniszczenia oraz testu ciągłego zniszczenia są zbliżone, podczas gdy krzywe uzyskane z testu klasycznego przy ciśnieniu okólnym 90 MPa mają dużo większy zasięg i to zarówno pionowy, jak i poziomy. Przy ścieżce obciążenia do 90 MPa zgodnej z testami klasycznymi uzyskano zatem nie tylko większą wytrzymałość, ale i odkształcalność, wyrażoną zwiększeniem krytycznych wartości odkształceń osiowych i obwodowych. Jeszcze większe różnice uzyskano dla odkształceń objętościowych, co wyraźnie jest widoczne przy analizie zmian odkształcenia objętościowego w funkcji odkształcenia osiowego na ryc. 9B.

Przeprowadzone badania umożliwiają wyznaczenie obwiedni wytrzymałościowych. Należy jednak podkreślić, że dla każdego typu testu trójosiowego inna jest procedura ich wyznaczania. Dla trzech pojedynczych testów klasycznych procedurę tę przedstawiono na ryc. 10, a dla testu

Tab.1. Wyniki pojedynczych testów klasycznych
Table. 1. The results of single triaxial failure tests

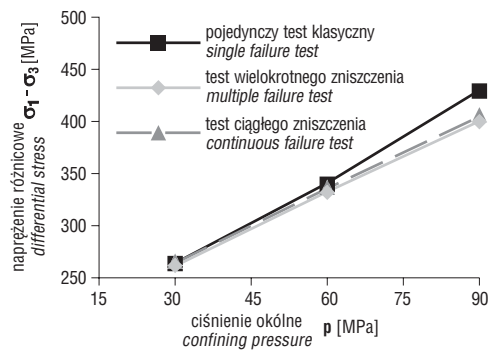
p [MPa]	σ_1 [MPa]	E [GPa]	ν [-]	ϵ_a [%]	ϵ_c [%]
30	295	32,3	0,33	1,04	-0,64
60	400	37,8	0,35	1,13	-0,69
90	520	38,3	0,36	1,62	-1,26

p — ciśnienie okólnie, *confining pressure*, σ_1 — naprężenie osiowe, *axial stress*, E — moduł Younga, *Young's modulus*, ν — współczynnik Poissona, *Poisson's coefficient*, ϵ_a — odkształcenie osiowe, *axial strains*, ϵ_c — odkształcenie obwodowe, *circumferential strain*



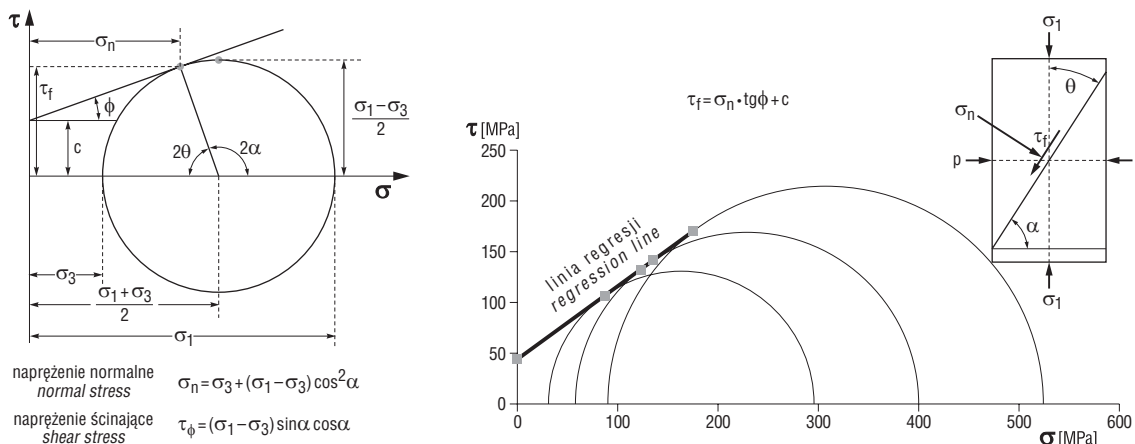
Ryc. 9. Porównanie krzywych deformacji uzyskanych: z pojedynczego testu klasycznego dla ciśnienia okólnego 90 MPa, z testu wielokrotnego zniszczenia oraz z testu ciągłego zniszczenia; A — krzywe naprężenie osiowe–odkształcenie, B — zależność odkształcenia objętościowego od odkształcenia osiowego

Fig. 9. Comparison of deformation curves obtained from single failure test for confining strain 90 MPa in multiple and continuous failure tests; A — axial stress vs. strain, B — volume strain vs. axial strain



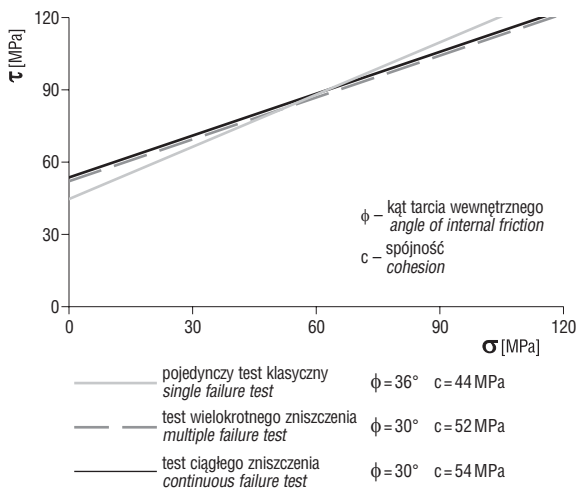
Ryc. 8. Porównanie wyników pojedynczych testów klasycznych z testem wielokrotnego zniszczenia oraz z testem ciągłego zniszczenia

Fig. 8. Comparison of results of single, multiple and continuous failure tests



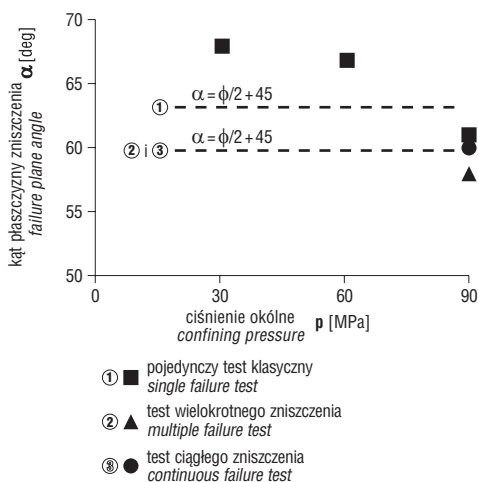
Ryc. 10. Schemat wyznaczania koła i obwiedni Coulomba-Mohra na podstawie pojedynczych testów klasycznych dla trzech różnych ciśnień okólnych

Fig. 10. Determination of a circle and Coulomb-Mohr loop for single triaxial failure tests at three various confining stress



Ryc. 11. Porównanie obwiedni wytrzymałościowych uzyskanych przy trzech różnych ścieżkach obciążenia

Fig. 11. Comparison of strength loops for three various loading paths



Ryc. 12. Porównanie kątów powierzchni zniszczenia pomierzonych na próbkach po trzech typach testów trójosiowych oraz wyznaczonych na podstawie wartości kąta tarcia wewnętrznego

Fig. 12. Comparison of the failure plane angles for three types of triaxial tests and those determined on the basis of the internal friction angle value

ciągłego zniszczenia procedurę postępowania przedstawiono na ryc. 7.

Obwiednie wytrzymałościowe, z charakterystycznymi wartościami kąta tarcia wewnętrznego (ϕ) i spójności (c), wyznaczone na podstawie testu wielokrotnego zniszczenia i testu ciągłego zniszczenia są do siebie bardzo zbliżone (ryc. 11). Natomiast obwiednia wytrzymałościowa, uzyskana na podstawie testów klasycznych, wskazuje na większy kąt tarcia wewnętrznego i mniejszą wartość spójności.

Przeprowadzone badania umożliwiły również porównanie kątów powierzchni zniszczenia (ścięcia) w zależności od ścieżki obciążenia w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania. W tym celu pomierzono kąty na próbkach po badaniach klasycznych dla różnych ciśnień okólnych, po testach wielokrotnego i ciągłego zniszczenia oraz wyznaczono wartości kąta na podstawie wartości kąta tarcia wewnętrznego (ryc. 12). Można zauważyć, że wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego w testach klasycznych wartość kąta powierzchni zniszczenia maleje. Dla testów wielokrotnego zniszczenia i testów ciągłego zniszczenia uzyskano natomiast mniejsze wartości kąta niż w testach klasycznych, przy ciśnieniu okólnym 90 MPa. Wartość kąta α wyznaczona na podstawie kąta tarcia wewnętrznego uzyskanego z testów klasycznych mieści się w przedziale kątowym uzyskanym z tych testów dla trzech ciśnień okólnych. Natomiast wartości kąta α wyznaczone na podstawie kątów tarcia wewnętrznego uzyskanych z testów wielokrotnego i ciągłego zniszczenia są bardzo zbliżone do wartości uzyskanych z tych badań laboratoryjnych. Należy podkreślić, że uzyskane wartości kąta α są zgodne z wyznaczanym dla tych skał w terenie podwójnym kątem ścinania 2θ (gdzie $\theta=90-\alpha$) (Mastella & Zuchiewicz, 2000).

Podsumowanie

W artykule przedstawiono ocenę wytrzymałości piaskowców krośnieńskich z Mucharza uzyskaną przy różnych ścieżkach obciążenia w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania. W tym celu przeprowadzono trzy typy testów trójosiowych, zgodnie z zaleceniami ISRM. Uzyskane wyniki wskazują, że przy ścieżce obciążenia do 90 MP, zgodnej z pojedynczymi testami klasycznymi, uzyskano dla piaskowców krośnieńskich największą wytrzymałość. Natomiast próbki poddane wielokrotnemu lub ciągłemu zniszczeniu uległy

„zmęczeniu” i wykazują mniejszą o ok. 30 MPa wytrzymałość w porównaniu z testami klasycznymi.

Różnice te zaobserwować można również analizując obwiednie wytrzymałościowe wyznaczone na podstawie przeprowadzonych badań. Okazuje się bowiem, że obwiednia wytrzymałościowa uzyskana na podstawie testów klasycznych charakteryzuje się większym kątem tarcia wewnętrznego i mniejszą wartością spójności niż obwiednie uzyskane z testu wielokrotnego zniszczenia i testu ciągłego zniszczenia.

Przedstawione w artykule badania w trójosiowym stanie naprężeń są kluczowe dla prac projektowych, dotyczących między innymi wykonywania szybów i podziemnych wyrobisk eksploatacyjnych, podziemnych zbiorników do magazynowania ropy naftowej i gazu ziemnego oraz tuneli drogowych i kolejowych.

W pracy przedstawiono maksymalny zakres badań trójosiowych ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$), jaki jest zalecany przez ISRM. Porównanie trzech opisanych typów badań wskazuje, że przy niewielkiej liczbie próbek, ale przy jednoczesnym dysponowaniu odpowiednim sprzętem, najwłaściwszym testem jest test ciągłego zniszczenia. W trakcie prowadzenia tego eksperymentu w sposób ciągły uzyskuje się obwiednię wytrzymałościową.

Literatura

GRAMBERG J. 1989 — A Non-Conventional View on Rock Mechanics and Fracture Mechanics. Balkema, Rotterdam.

- GUSTKIEWICZ J. 1989 — Synoptic view of mechanical behaviour of rocks under triaxial compression. [In:] Rock at Great Depth, Maury & Froumaintraux. Balkema, Rotterdam: 3–10.
- GUSTKIEWICZ J. (red.) 1999 — Właściwości fizyczne wybranych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Skały warstw siodłowych. IGSMiE PAN, Kraków.
- KOVARI K., TISA A., EINSTEIN H.H. & FRANKLIN J.A. 1983 — Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version. Inter. Jour. Rock Mech. Min. Sc. & Geomech. Abstracts, 20: 285–290.
- KOVARI K. & TISE A. 1975 — Multiple Failure State Test and Strain Controlled Triaxial Test. Rock Mechanics, 7: 17–33.
- KWAŚNIEWSKI M. 2002 — Zachowanie się skał izo- i anizotropowych w warunkach trójosiowego ściskania. Zesz. Nauk. Politech. Śląskiej, Górnictwo, 247: 1–407.
- LI H.B., ZHAO J. & LI T.J. 1999 — Triaxial compression tests on a granite at different strain rates and confining pressures. Inter. Jour. Rock Mech. and Mining Sc., 36: 1057–1063.
- ŁUKASZEWSKI P. 2004 — Strukturalne uwarunkowania wytrzymałości piaskowców krośnieńskich z Mucharza poddanych wysokim ciśnieniom. Geotechnika i Budownictwo Spec., 2004. XXVII ZSMG. Zakopane. T.1: 151–160.
- MASTELLA L. & ZUCHIEWICZ W. 2000 — Jointing in the Dukla Nappe (Outer Carpathians, Poland): an attempt at palaeostress reconstruction. Geol. Quart., 44: 377–390.
- NOWAKOWSKI A. 1994 — Trzy testy trójosiowego ściskania — sposób wykonania, zalety, wady i ewentualne możliwości wykorzystania wyników. Pr. Nauk. Inst. Geotech. Hydrotech. Politech. Wrocł., 65: 155–161.
- POPRAWA D. & NEMCOK J. 1988–1989 — Geological Atlas of the Western Outer Carpathians and their Foreland. Państw. Inst. Geol.
- REIK G. & ZACAS N. 1978 — Strength and deformation characteristics of jointed media in true triaxial compression. Intern. Jour. Rock Mech. Min. Sc. & Geomech. Abstracts, 15: 295–303.