

Wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych łupka ilastego

Lesław Bagiński¹, Irena Bagińska²

¹Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: leslaw.baginski@pwr.edu.pl

²Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Streszczenie

W pracy określono parametry wytrzymałości na ścinanie łupków ilastych dla kryterium wytrzymałościowego Coulomba–Mohra, na bazie wyników badań wytrzymałościowych skały na ścinanie. Wykorzystano wyniki testów wytrzymałościowych jednoosiowego ściskania, ścinania prostego oraz w uchwycie (ścianania ze ściskaniem). Ścinane w uchwycie przeprowadzono dla dwóch kątów ścinania: 30° i 60°. Na podstawie wyników testów wytrzymałościowych ustalono dla łupka ilastego spójność wynoszącą 13,6 MPa oraz kąt tarcia wewnętrznego o wartości 18,8°.

Wprowadzenie

Łupek ilasty to drobnoziarnista skała osadowa z domieszką kwarcu, zbudowana głównie z substancji ilastej, powodującej osłabienie szkieletu skalnego. Charakteryzuje się dużą łupliwością i ciemną barwą wynikającą z obecności składników organicznych. W celu rozpoznania parametrów wytrzymałościowych łupka ilastego wykonuje się szereg testów laboratoryjnych mogących zobrazować zachowanie mechaniczne skały w różnych stanach naprężeń (Kidybiński, 1982; Hoek, 2008; Kwaśniewski, 2013). Do badań wytrzymałościowych wybrano reprezentatywne próbki skalne łupka ilastego, które poddano testom wytrzymałościowym jednoosiowego ściskania, ścinania bezpośredniego (prostego) oraz ścinania ze ściskaniem w uchwycie dla dwóch kątów ścinania: 30° i 60°. Otrzymane wyniki wytrzymałości granicznych (krytycznych), ze wszystkich testów łącznie, są bardzo ważną informacją stanowiącą weryfikację wzajemnych zależności pomiędzy otrzymanymi wynikami badań (Tomiczek, 2008). Dodatkowo w pracy stanowiły one nie tylko podstawę do określenia parametrów wytrzymałościowych dla kryterium wytrzymałościowego Coulomba–Mohra, ale również do graficznego zobrazowania obwiedni kryterium dla badanego łupka ilastego.

Metodyka i wyniki testów wytrzymałościowych

Wszystkie próby łupka ilastego poddane badaniom pochodzą z północno-środkowej części województwa dolnośląskiego, posiadały widoczny układ laminacji zgodny z poziomym układem zalegania warstwy (Jarczyk, 2019).

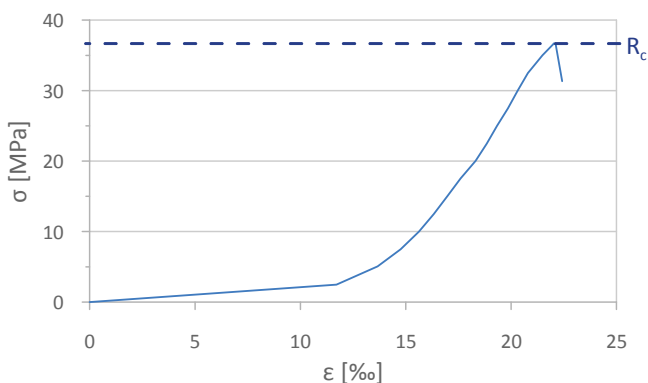
Próby zostały wykonane zgodnie z PN-G-04301:1996. Przeprowadzono cztery testy wytrzymałościowe:

- jednoosiowe ściskanie;
- ścinanie proste cylindryczne;
- ścinanie ze ściskaniem w uchwycie dla dwóch kątów ścinania: 30° i 60°.

W każdym z testów wytrzymałościowych wykonano po sześć badań. Wyniki zestawiono w tabelach w rozbiu na poszczególne testy. Gęstość objętościowa badanego łupka ilastego wynosiła $2,39 \pm 2,42 \text{ g/cm}^3$.

Jednoosiowe ściskanie R_c

Badanie wykonano zgodnie z PN-G-04303:1997 na próbach walcowych o smukłości jeden i wymiarach $h = 44,4 \text{ mm}$ oraz średnicy $d = 45,0 \text{ mm}$. Przyrost pionowej siły wynosił 1 kN/s . Rejestracji podlegał przyrost przemieszczenia przy stałej prędkości przyrostu obciążenia. Wartość krytyczną R_c ustalono jako maksymalną, zgodnie z przykładowym rys. 1. Z uwagi na stosowany kształt prób podczas interpretacji wyników dla R_c uwzględniono współczynnik korekcyjny równy ułamkowi $8/9$ zgodnie z PN-G-04303:1997.



Rys. 1. Rzeczywisty wykres σ - ε dla przykładowego testu jednoosiowego ściskania

Tabela 1. Wyniki testu jednoosiowego ściskania R_c

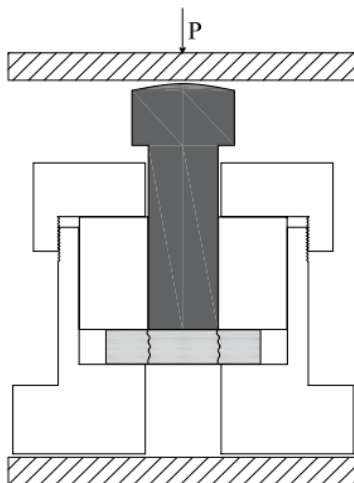
d [mm]	h [mm]	P [kN]	R_c [MPa]
44,40	45,00	63,91	36,69
44,40	45,00	64,39	36,97
44,40	45,00	63,97	36,73
44,40	45,00	65,34	37,51
44,40	45,00	62,9	36,11
44,40	45,00	64,43	36,99

Średnia wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wyniosła $36,83 \text{ MPa}$ przy odchyleniu standardowym $0,42 \text{ MPa}$.

Ścinanie proste cylindryczne R_t

Badanie wykonano zgodnie z PN-G-04304:1997 na próbach w kształcie krążków o wymiarach $h = 10,0 \text{ mm}$ i średnicy $d = 44,4 \text{ mm}$. Siłę ścinającą zadawano zgodnie z założoną powierzchnią ścinającą przy składowej normalnej do powierzchni ścicia równej zero (rys. 2). Przygotowaną próbkę po zamocowaniu w prasie obciążono prostopadle do plasterka z pręd-

kość 0,1 kN/s. Rejestrowano maksymalną siłę, przy której próba ulegała zniszczeniu. Średnica tłoka wynosiła $s = 21$ mm.



Rys. 2. Uchwyt do ścinania prostego cylindrycznego próbek skalnych w postaci krążków

Wytrzymałość na ścinanie R_t w MPa obliczono według równania (1). Zgodnie z Kidybińskim (1982) wartość tą można utożsamiać ze spójnością skały.

$$R_t = \frac{P}{\pi s h} [\text{MPa}] \quad (1)$$

gdzie:

P – siła niszcząca [MN],

d – średnica tłoka [m],

h – wysokość (grubość) próbki [m].

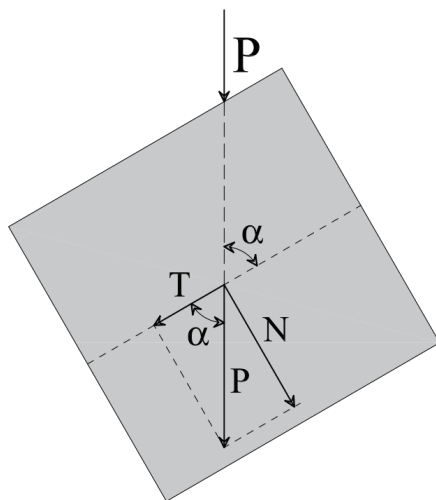
Tabela 2. Wyniki testu ścinania prostego cylindrycznego R_t

d [mm]	h [mm]	P [kN]	R_t [MPa]
44,40	10,00	10,11	15,32
44,40	10,00	9,8	14,85
44,40	10,00	8,76	13,28
44,40	10,00	9,24	14,01
44,40	10,00	9,66	14,64
44,40	10,00	10,46	15,85

Średnia wartość wytrzymałości na ścinanie proste wyniosła 14,66 MPa, przy odchyleniu standardowym 0,84 MPa.

Ścinanie ze ściskaniem w uchwycie

Badanie wykonano zgodnie z Kidybińskim (1982) na próbach walcowych o smukłości jeden i wymiarach $h = 44,4$ mm oraz średnicy $d = 45,0$ mm. Przyrost pionowej siły wynosił 1 kN/s. Podczas badania ustalono maksymalną wartość obciążenia krytycznego P_{kr} . Ścinanie w uchwycie przeprowadzono dla dwóch kątów ścinania: 30° i 60° . Zasadę ścinania ze ściskaniem przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zasada ścinania ze ściskaniem prób skalnych w uchwycie

Wskutek ukośnego mocowania badanej próby w metalowym uchwycie podzielonym na dwie oddzielne części. Siła ścinająca P rozkłada się na składową prostopadłą do powierzchni ścinania N oraz składową styczną do tej powierzchni T (rys. 3). Składowa styczna wywołuje naprężenia ścinające powodujące ścięcie próbki wzdłuż wymuszonej powierzchni ścięcia natomiast składowa prostopadła powoduje powstanie naprężeń dociskowych (normalnych do powierzchni ścinania). Wartości sił i naprężeń powstałych w próbach ustalono zgodnie z równaniami (2) dla siły normalnej N , (3) dla siły tnącej T , (4) dla naprężenia normalnego σ i (5) stycznego τ .

$$N = P \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

$$T = P \cdot \cos \alpha \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{N}{F} = \frac{P \cdot \sin \alpha}{dh} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{T}{F} = \frac{P \cdot \cos \alpha}{dh} \quad (5)$$

Tabela 3. Wyniki testu ścinania ze ściskaniem w uchwycie dla kąta ścinania 30°

d [mm]	h [mm]	N [kN]	T [kN]	σ [MPa]	τ [MPa]
44,40	45,00	17,56	30,41	8,79	15,22
44,40	45,00	18,59	32,19	9,30	16,11
44,40	45,00	17,91	31,01	8,96	15,52
44,40	45,00	17,49	30,28	8,75	15,16
44,40	45,00	18,01	31,19	9,01	15,61
44,40	45,00	16,93	29,31	8,47	14,67

Dla kąta ścinania 30° średnia wartość krytycznych naprężeń stycznych wyniosła 15,38 MPa z odchyleniem standardowym 0,44 MPa, natomiast średnia wartość naprężeń normalnych 8,88 MPa przy odchyleniu standardowym 0,26 MPa.

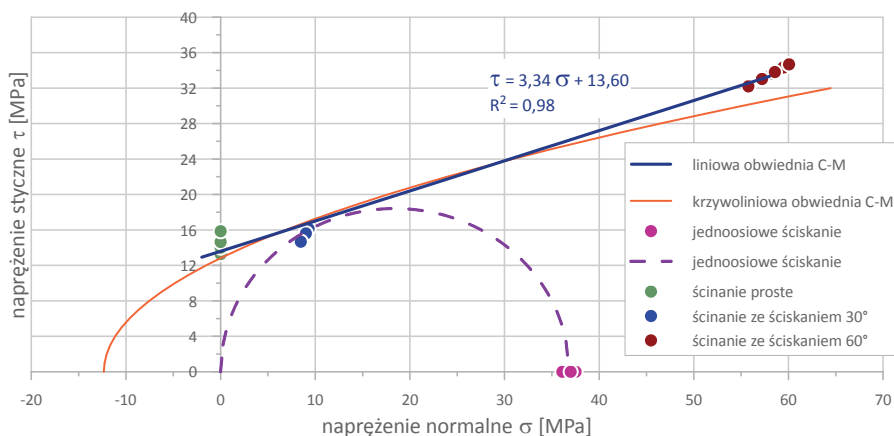
Tabela 4. Wyniki testu ścinania ze ściskaniem w uchwycie dla kąta ścinania 60°

d [mm]	h [mm]	N [kN]	T [kN]	σ [MPa]	τ [MPa]
44,40	45,00	116,47	67,25	58,29	33,66
44,40	45,00	114,30	65,99	57,21	33,03
44,40	45,00	111,42	64,33	55,77	32,20
44,40	45,00	118,78	68,58	59,45	34,32
44,40	45,00	117,01	67,56	58,56	33,81
44,40	45,00	120,01	69,29	60,06	34,68

Dla kąta ścinania 60° średnia wartość krytycznych naprężeń stycznych wyniosła 33,62 MPa z odchyleniem standardowym 0,82 MPa, natomiast średnia wartość naprężeń normalnych 58,22 MPa przy odchyleniu standardowym 1,42 MPa.

Wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych

Wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych jest podstawowym zagadnieniem opisu zachowania się górotworu w zakresie różnych stanów naprężenia. Zniszczenie powstaje na skutek przekroczenia możliwych do przeniesienia przez skałę naprężeń ścinających τ , zwykle

Rys. 4. Wykres zbiorczy τ - σ uwzględniający wyniki wszystkich testów wytrzymałościowych

towarzyszą mu naprężenia normalne σ . Najpowszechniej stosowanym kryterium wytrzymałościowym zarówno dla skał, jak i masywów skalanych jest kryterium Coulomba–Mohra posiadające dwa parametry wytrzymałościowe w postaci spójności c oraz kąta tarcia wewnętrznego ϕ . Na bazie testów wytrzymałościowych istnieje kilka technik określania spójności oraz kąta tarcia wewnętrznego (Sanetra, 2002; Bukowska i Sanetra, 2008; Kwaśniewski, 2013). W pracy parametry wytrzymałościowe kryterium Coulomba–Mohra wyznaczono poprzez zastosowania obwiedni kół Mohra z wyników jednoosiowego ściskania oraz poprzez linię trendu z wyników jednoosiowego ściskania z równoczesnym uwzględnieniem wyników testu ścinania ze ściskaniem i ścinania prostego cylindrycznego. Wszystkie wyniki badań zestawiono na rys. 4.

Podsumowanie

Na podstawie globalnego zestawienia wszystkich wyników testów wytrzymałościowych, co pokazano na rys. 4, ustalono dla łupka ilastego spójność wynoszącą 13,6 MPa oraz kąt tarcia wewnętrznego wynoszący 18,8°. Uzyskane parametry są porównywalne z wynikami archiwalnymi CUPRUM (KGHM, 1991), gdzie spójność wyznaczono na poziomie 13,0 MPa, a kąt tarcia wewnętrznego 27°.

Linie trendu, pokazującą na rys. 4 przebiegu kryterium Coulomba–Mohra, wkreślono dla wyników z badań jednoosiowego ściskania, ścinania prostego cylindrycznego oraz ścinania ze ściskaniem w uchwycie dla dwóch kątów ścinania: 30° i 60° metodą najmniejszych kwadratów z bardzo wysokim poziomem wpisania $R^2 = 0,98$. Dodatkowo zaprezentowano przebieg obwiedni koła Mohra bazującego na wynikach jednoosiowego ściskania. Na uwagę zasługuje fakt, że funkcja kryterium Coulomba–Mohra w postaci paraboli na znacznym fragmencie pokrywa się z liniową funkcją trendu wpisaną w wyniki testów wytrzymałościowych.

Należy podkreślić, że określona na bazie wszystkich wyników badań spójność osiąga wartość mniejszą, niż średnia wartość wytrzymałości na ścinanie proste, dlatego zdaniem autorów właściwsze jest wyznaczanie wartości spójności łupka, nie tylko na bazie pojedynczego rodzaju testu ścinania prostego, ale poprzez globalne połączenie wielu wyników z różnych badań.

Uwzględnienie, w przeprowadzonej analizie danych wyników z wielu testów równocześnie (rys. 4), pozwoliło na dokładne wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych łupka ilastego. Uzyskane wyniki mogą stać się wartościami charakterystycznymi stosowanymi w obliczeniach wytrzymałościowych.

Literatura

- BUKOWSKA M., SANETRA U., 2008. *Badania konwencjonalnego trójosiowego ściskania granitu i dolomitu w aspekcie ich własności mechanicznych*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 24.
- HOEK E., 2008. *Practical Rock Engineering*. Available from the publisher at <http://rocscience.com> (data dostępu: 01.07.2020).
- JARCZYK P., 2019. *Impact of confining pressure and orientation of discontinuities on the behaviour of jointed rock mass*. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 261, No. 1, p. 012014, IOP Publishing.
- KIDYBIŃSKI A., 1982. *Podstawy geotechniki kopalnianej*, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
- KOMBINAT GÓRNICZO-HUTNICZY MIEDZI (KGHM), Zakłady Badawcze i Projektowe Miedzi „Cuprum”, 1991. *Badania geotechniczne dla określenia fizyko-mechanicznych własności skał z otworów nr S-372A i S-372B w obszarze kopalni Rudna*.

- KWAŚNIEWSKI M., 2013. *Recent advances in studies of the strength of rocks under true triaxial compression conditions (Postępy w badaniach nad wytrzymałością skał w warunkach prawdziwego trójosiowego ściskania)*, Archives of Mining Sciences, 58(4), 1177–1200.
- PN-G-04301:1996. *Pobieranie i przygotowanie próbek do badań własności mechanicznych i technologicznych.*
- PN-G-04303:1997. *Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie z użyciem próbek foremnych.*
- PN-G-04304:1997. *Oznaczenie wytrzymałości na ścinanie proste.*
- SANETRA U., 2002. *Kąt tarcia wewnętrzznego i spójność skał zwięzłych i spękanych.* Warsztaty górnicze nt. Problematyka inżynierska z zakresu ochrony terenów górniczych. Sympozja i konferencje, (55), 393–404.
- TOMICZEK K., 2008. *Badania wytrzymałości skał na ścinanie.* Budownictwo Górnicze i Tunelowe, 3.