

Badania i analiza naprężeń krytycznych w materiale skalnym wywołanych mechanicznym odspajaniem

mgr inż. Danuta Cebula
dr inż. Marek Kalita
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie:

W artykule omówiono metodę mechanicznego odspajania calizny skalnej przy użyciu kotew rozprężnych pod kątem możliwości zastosowania do wykonywania tuneli ratowniczych. Przedstawiono analizę wyników badań in situ i laboratoryjnych. Badania zrealizowano w ramach projektu europejskiego INREQ, w Skansenie Górniczym Królowa Luiza. Wyniki badań umożliwiły weryfikację modelu zniszczenia materiału skalnego dla mechanicznego odspajania. Wyznaczono również kierunki dalszych prac.

Słowa kluczowe: technologia drażenia chodnika, odspajanie skał, badanie geometrii odspojenia, badania wytrzymałościowe skał

Keywords: technology of roadway development, rocks falling off, testing the falling off geometry, rock strength tests

Abstract:

Method for rock falling off with use of expanding bolts in the case of development of rescue tunnels is discussed. Analysis of in situ and laboratory test results is presented. Tests were realized within the INREQ project in Skansen Górniczy Królowa Luiza (Mining Heritage Park Queen Luiza). Test results enabled verification of the model of rock material destruction in the case of mechanical falling off process. Direction of further research work have been determined.

1. Wprowadzenie

Koncepcja metody mechanicznego odspajania skał oraz badania mające na celu ocenę możliwości jej zastosowania do drażenia wyrobisk ratunkowych były przedmiotem prac prowadzonych w ramach projektu INREQ. Metoda oparta jest na wykorzystaniu lekkich i łatwych w transporcie narzędzi ręcznych. Ze względu na zastosowane narzędzia, stężenie metanu w wyrobisku nie ogranicza możliwości stosowania proponowanej metody urabiania. Ponadto nie powoduje destrukcji górotworu, poza ściśle wyznaczoną strefą i pozwala na wykonywanie wyrobisk w skałach zwięzłych [3].

Metoda może znaleźć znacznie szersze zastosowanie do urabiania skał zwięzłych, jako alternatywna do technologii urabiania materiałami wybuchowymi. Ewentualny rozwój tej technologii będzie jednak uzależniony od przeprowadzenia prac badawczo-rozwojowych mających na celu wyznaczenie empirycznego modelu niszczenia różnego typu skał i m.in. wyznaczanie geometrii odspojenia, siły krytycznej P powodującej destrukcję materiału oraz efektywności tego procesu.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę wyników badań in situ i laboratoryjnych zrealizowanych w ramach projektu INREQ [6].

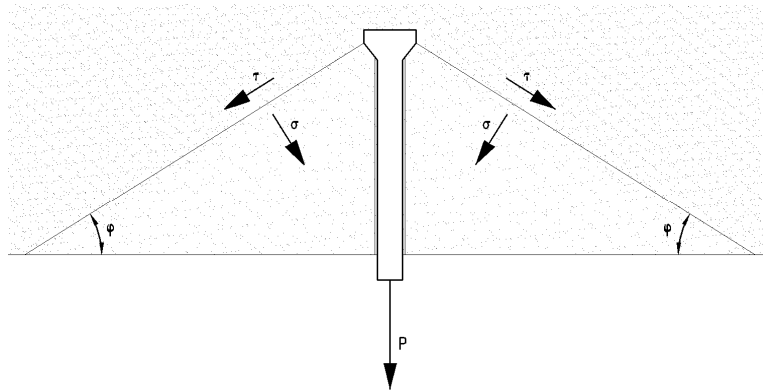
2. Analiza stanu wyteżenia w materiale skalnym wywołanego mechanicznym odspajaniem

Omawiana metoda mechanicznego odspajania skał polega na tym, że w czole urabianego wyrobiska wiercony jest otwór, w którym za pomocą elementu rozpiernającego mocowane jest

ciągnie. Następnie na utwardzone w skale ciągnie oddziałuje siła powodująca odspojenie fragmentu skały od masywu [9]. W przypadku skał nie sformułowano uniwersalnego kryterium wytrzymałościowego. Należy zatem posługiwać się kilkoma kryteriami do oceny wytrzymałości, uwzględniając mechanizmy niszczenia przez ścisnienie, ścinanie i rozciąganie [12]. Wybrane kryterium wytrzymałościowe powinno być zgodne z wynikami doświadczeń [8, 11]. Dla zagadnień takich jak skrawanie skał, stateczność kopalnianych wyrobisk pionowych i poziomych, urabianie materiałami wybuchowymi, czy wytrzymałość zakotwienia, opracowano empiryczne zależności pozwalające na rozwiązywanie konkretnych problemów technicznych [1, 2, 8, 10, 12, 13].

Do opisu stanu wytrzymałości skał w otoczeniu ciągnie zamocowanego elementem rozprężnym i obciążonego siłą przyjęto hipotezę Coulomba-Mohra. Jej podstawowym założeniem jest to, że zniszczenie materiału w złożonym stanie naprężenia zachodzi przez poślizg w płaszczyźnie maksymalnych naprężeń stycznych [5].

Na rysunku 1 przedstawiono założony model zniszczenia skał w otoczeniu ciągnie zamocowanego elementem rozprężnym.



Rys. 1. Zakładany model zniszczenia skał w otoczeniu ciągnie zamocowanego elementem rozprężnym, P – siła wrywania, τ – naprężenia styczne do powierzchni ścinania, σ – naprężenia normalne do powierzchni ścinania, φ – kąt płaszczyzny ścinania

Zakładając równomierny rozkład naprężeń, naprężenia normalne i styczne do powierzchni ścinania można wyznaczyć z zależności:

$$\sigma = \frac{N}{F} \quad [MPa]$$

$$\tau = \frac{T}{F} \quad [MPa]$$

gdzie:

N – składowa siły P normalna do powierzchni ścinania, $P \cdot \cos\varphi$ [N],

T – składowa siły P styczna do powierzchni ścinania, $P \cdot \sin\varphi$ [N],

F – pole powierzchni ścinania [mm^2],

φ – kąt płaszczyzny ścinania [$^\circ$].

Według zmodyfikowanego warunku Coulomba-Mohra naprężenia normalne do powierzchni ścinania zwiększają opór ścinania wprost proporcjonalnie do swojej wartości [12].

Rozpatrując zadanie dwuwymiarowe, równanie stanu granicznego Coulomba-Mohra przyjmuje postać (rys. 2):

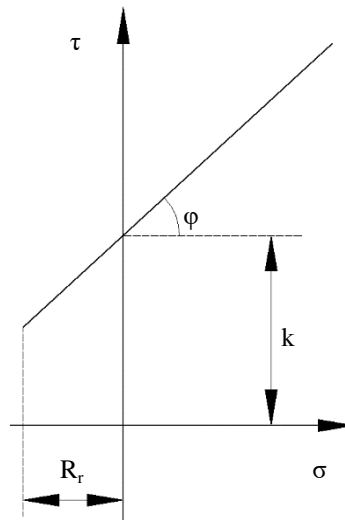
$$|\tau| = k + \sigma \tan \varphi$$

gdzie:

τ – naprężenia styczne do powierzchni ścięcia,

σ – naprężenia normalne do powierzchni ścięcia,

k – kohezja.



Rys. 2. Graficzny obraz hipotezy Coulomba-Mohra - na podstawie [12]

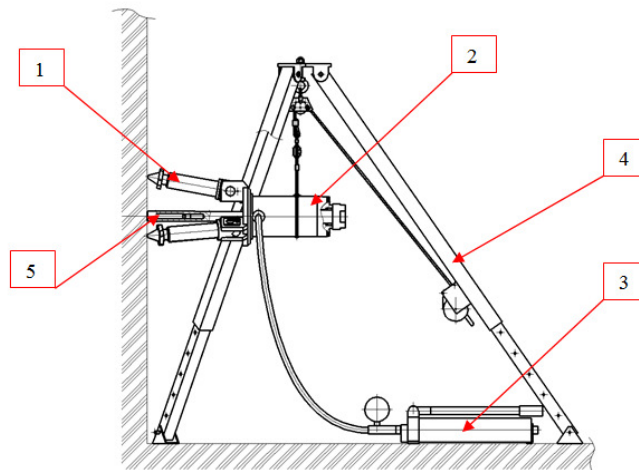
3. Badania mechanizmu niszczenia calizny skalnej

W Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, w ramach projektu europejskiego o akronimie INREQ, prowadzono badania mechanizmu odspajania calizny skalnej przy pomocy urządzenia UDWR-1. Próby prowadzono w warunkach dołowych, w Skansenie Górniczym Królowa Luiza w Zabrze, w wyrobisku kamiennym (piaskowiec). Celem badań było sprawdzenie możliwości zastosowania technologii mechanicznego odspajania skał do drążenia wyrobisk ratowniczych, a w szczególności pomiar siły krytycznej, powodującej odspojenie oraz pomiar geometrii odspajanych fragmentów skalnych.

Urządzenie doświadczalne przeznaczone do badań metody mechanicznego odspajania skał (UDWR-1) składa się z następujących elementów (rys.3) [4]:

- podpora nośna (1),
- cylinder hydrauliczny (2),
- pompa ręczna (3),
- statyw (4),
- kotwa (5).

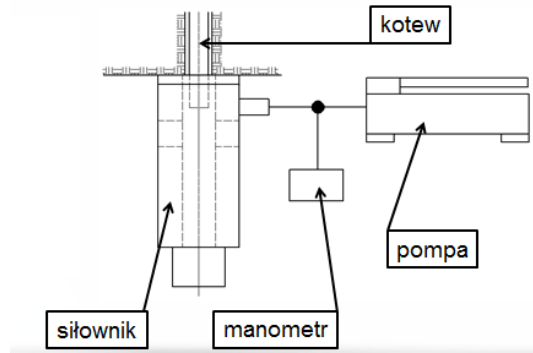
Dodatkowym wyposażeniem są wiertarka oraz żerdź z koronką.



Rys. 3. Model 3D urządzenia do drążenia wyrobisk ratowniczych UDWR-1 [4]

Opracowana w ITG KOMAG technologia mechanicznego odspajania skał z zastosowaniem urządzenia UDWR-1 (rys. 3) wymaga wywiercenia otworu i zakotwienia w nim kotwy (5). Następnie za pomocą statywu (4), na którym zawieszona jest podpora nośna (1) z cylindrem hydraulicznym (2), następuje mocowanie kotwy (5) do cylindra hydraulicznego (2). Po wstępnym rozparciu podpory nośnej (1), można zluźnić linę statywu (4) i za pomocą pompy ręcznej (3) zwiększać ciśnienie w cylindrze (2), aż do odspojenia fragmentu skały.

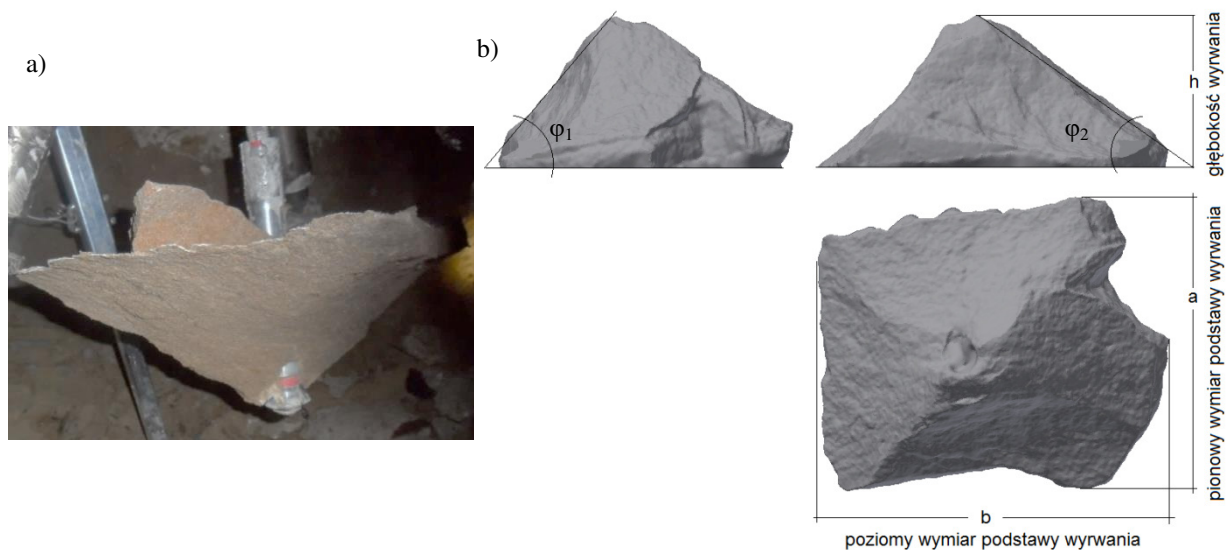
Kotwy mechaniczne zbudowane są najczęściej z gładkiego pręta stalowego, którego jeden koniec zaopatrzone jest w głowicę kotwiącą, natomiast drugi, zewnętrzny koniec, poprzez podkładkę i nakrętkę styka się z powierzchnią calizny skalnej (stropu). Dokręcając nakrętkę nadaje się kotwie wstępny naciąg. Jego zalecana wartość wynosi około 70% nośności kotwy [12]. Mechanizm wrywania kotwy z górotworu potwierdzono badaniami laboratoryjnymi i in situ, mającymi na celu określenie siły zakotwienia i wytrzymałości kotwy. Urządzenia do wrywania kotew charakteryzują się podobną zasadą działania. Na wystającą z otworu końcówkę kotwy zakłada się siłownik hydrauliczny urządzenia, a następnie zwiększa się stopniowo siłę osiową i rejestruje wysuw kotwy z otworu (rys. 4). W ten sposób doprowadza się do zniszczenia pręta lub zniszczenia jego zamocowania w otworze [2, 10, 12]. Budowa i zasada działania urządzenia do wrywania kotew powoduje w materiale skalnym naprężenia ściskające wynikające z podparcia urządzenia o caliznę w bliskiej odległości otworu, w którym zamocowana jest kotwa, jest to istotna różnica w stosunku do badań prowadzonych przy pomocy urządzenia UDWR-1.



Rys. 4. Schemat urządzenia do wykonywania prób wrywania kotwi - na podstawie: [2, 10, 12]

Istotny wpływ na wartość krytyczną siły P powodującej odspojenie materiału ma powierzchnia odspojenia (powierzchnia boczna stożka, którego wysokość jest uzależniona od głębokości zamocowania kotwy). W ramach projektu przeprowadzono badania mające na celu pomiar krytycznej siły P , powodującej odspojenie skały oraz geometrii odspojenia. Należy podkreślić, że wartość krytycznej siły P jest ograniczona przez wartość siły zrywającej zamocowanie końcówki kotwy w skałę i wytrzymałość ciągną na rozciąganie.

Przeprowadzone badania wykazały, że jest możliwe odspajanie calizny skalnej w formie regularnych stożków. Na rysunku 5a pokazano przykładowy wyrwany stożek skalny.



Rys. 5. Odspojony stożek skalny, a) fotografia, b) model 3D opracowany metodą fotogrametryczną [opracowanie własne]

W trakcie badań osadzano kotwy na różnej głębokości i rejestrowano ciśnienie w siłowniku urządzenia oraz mierzono wymiary geometryczne wyłomu skalnego powstałego w wyniku wrywania kotwy, wymiary podstawy wyrwania pionowo – a i poziomo - b oraz głębokość wyrwania – h (rys. 5b). Sporządzano również dokumentację fotograficzną oraz filmową obrazującą wykonywanie poszczególnych czynności.

Odspojone fragmenty skalne miały kształt stożków eliptycznych. Różne cechy geometryczne stożków (różne wartości kąta nachylenia płaszczyzny w poziomie – φ_2 i pionie – φ_1) mogły wynikać z anizotropowości materiału. Średni kąt pochylenia powierzchni odspojenia wyniósł $28,3^\circ$ (tab. 1). Kąt pochylenia płaszczyzny odspojenia określono na podstawie wymiarów wylomu. Zarejestrowane maksymalne wartości ciśnienia w siłowniku urządzenia, w odniesieniu do powierzchni roboczej tłoka siłownika, pozwoliły na obliczenie wartości krytycznej siły P [kN]. Wyniki badań i obliczone na ich podstawie wartości zestawiono w tabeli 1.

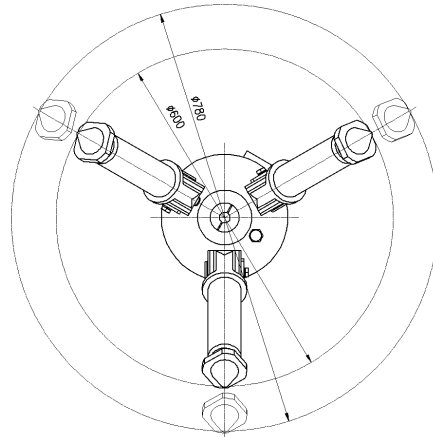
Wyniki badań mechanicznego odspajania skał w warunkach in situ [3]

Tabela 1

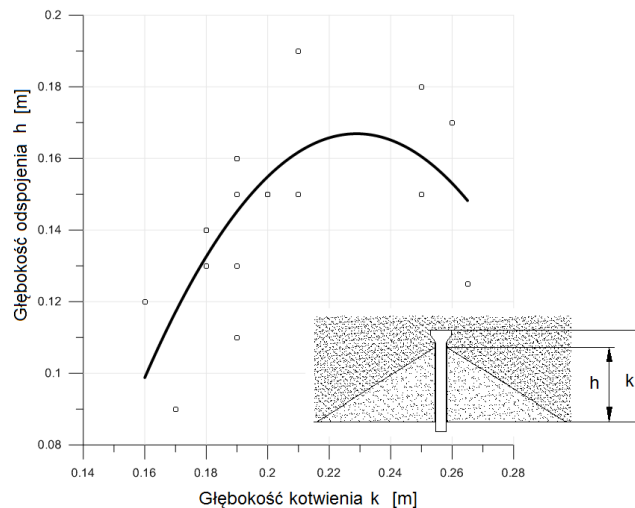
Poz.	Głębokość kotwienia k [m]	Głębokość odspojenia h [m]	Wymiary podstawy wyrwania [m]		Kąt φ_1 [°]	Kąt φ_2 [°]	Siła P [kN]
			pionowy a	poziomy b			
1	0,16	0,12	0,6	0,4	22	31	123,45
2	0,17	0,09	0,35	0,35	27	27	98,76
3	0,18	0,14	0,54	0,71	27	21	115,22
4	0,18	0,13	0,43	0,42	31	32	98,76
5	0,18	0,14	0,55	0,7	27	22	172,83
6	0,19	0,16	0,5	0,7	33	25	90,53
7	0,19	0,11	0,5	0,57	24	21	115,22
8	0,19	0,13	0,5	0,6	28	23	98,76
9	0,19	0,15	0,65	0,55	25	29	172,83
10	0,19	0,16	0,6	0,5	28	33	65,84
11	0,2	0,15	0,6	0,78	27	21	197,52
12	0,2	0,15	0,57	0,51	28	31	181,06
13	0,21	0,15	0,53	0,43	30	35	222,21
14	0,21	0,19	0,7	0,56	29	34	65,84
15	0,25	0,18	0,5	0,6	36	31	82,3
16	0,25	0,15	0,6	0,6	27	27	164,6
17	0,26	0,17	0,55	0,65	32	28	189,29
18	0,265	0,125	0,4	0,36	32	35	205,75
Śr.	0,20	0,14	0,53	0,5	28,5	28,1	136,71

Próby odspajania calizny skalnej za pomocą kotwy osadzonej na głębokości większej niż 0,22 m kilkakrotnie kończyły się zerwaniem kotwy lub jej wyciągnięciem. Było to najprawdopodobniej spowodowane geometrią podpory urządzenia UDWR-1 (rys. 6). Podpora ograniczała wymiary podstawy stożka odspojenia do 0,6 m. Powyżej tego wymiaru podpora powodowała ściskanie odspajanego materiału. Widoczna na rysunku 6 średnica ϕ 0,78 m odnosi się do regulacji długości nóg podpory, która służy głównie do jej dopasowania do nierówności calizny. Podczas prób, gdy dochodziło do zerwania kotwy lub przekroczenia wytrzymałości zakotwienia, siła P była większa od 200 kN. Najczęściej, przy głębokościach kotwienia powyżej 0,22 m, element rozprężny kotwy przesunął się w otworze, a następnie dochodziło do odspojenia stożka o znacznie mniejszej wysokości niż głębokość zakotwienia.

Na rysunku 7 przedstawiono zależność głębokości kotwienia i głębokości odspojenia dla poszczególnych prób (powyżej 0,22 m głębokości zakotwienia nie następował przyrost, lecz spadek głębokości odspojenia).



Rys. 6. Podpora silownika urządzenia UDWR-1 [3]



Rys. 7. Aproksymacja zależności głębokości kotwienia i odspojenia dla poszczególnych prób mechanicznego odspajania skał [opracowanie własne]

4. Analiza naprężeń krytycznych

Znając wymiary podstawy i wysokość wyrwania obliczono przybliżoną powierzchnię odspojenia, oraz normalną i styczną do tej powierzchni składową siły P. Pozwoliło to na oszacowanie krytycznych naprężeń stycznych i normalnych. Naprężenia normalne do powierzchni odspojenia mieściły się w przedziale $0,16 \div 1,33$ MPa, a naprężenia styczne do powierzchni odspojenia mieściły się w przedziale $0,11 \div 0,72$ MPa (tab. 2).

Wyniki obliczeń naprężeń krytycznych [3]

Tabela 2

Poz.	Składowa N siły P normalna do powierzchni ścinania [N]	Składowa T siły P styczna do powierzchni ścinania [N]	Pole powierzchni bocznej stożka [mm ²]	Naprężenie σ [MPa]	Naprężenie τ [MPa]
1	106911	61725	211502	0,51	0,27
2	85529	49380	108189	0,80	0,43
3	99783	57610	331488	0,30	0,16
4	85529	49380	166289	0,52	0,28
5	149675	86415	166289	0,91	0,49
6	78401	45265	314424	0,25	0,14
7	99783	57610	242245	0,41	0,22
8	85529	49380	261199	0,33	0,18
9	149675	86415	314560	0,48	0,26
10	57019	32920	273426	0,21	0,11
11	171057	98760	402429	0,43	0,23
12	156802	90530	261458	0,60	0,33
13	192439	111105	212010	0,92	0,50
14	57019	32920	361272	0,16	0,09
15	71274	41150	282611	0,25	0,14
16	142548	82300	316116	0,46	0,25
17	163930	94645	323519	0,51	0,28
18	178185	102875	135540	1,33	0,72
Śr.	118394	68355	260254	0,52	0,28

Przeprowadzono również badania laboratoryjne skał pobranych z przodka, w którym prowadzono badania in situ. Badania wytrzymałościowe wykonano w laboratorium Katedry Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Zarządzania Ochroną Powierzchni Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, zgodnie z sugestiami Międzynarodowego Towarzystwa Mechaniki Skał (ISRM) i normami dotyczącymi dokładności wykonania próbek [7, 14]. Z bryły piaskowca pobranej podczas badań in situ odwiercono, a następnie oszlifowano próbki walcowe o różnych, w zależności od przeznaczenia, wysokościach h i średnicy d . Wykonano 18 prób wytrzymałościowych: prób obciążania punktowego, oznaczania wytrzymałości granicznej na rozciąganie, wytrzymałości na ścinanie przy ściskaniu i ścinania bezpośredniego. Widok próbek foremnych po zniszczeniu przedstawiono na rysunku 8.



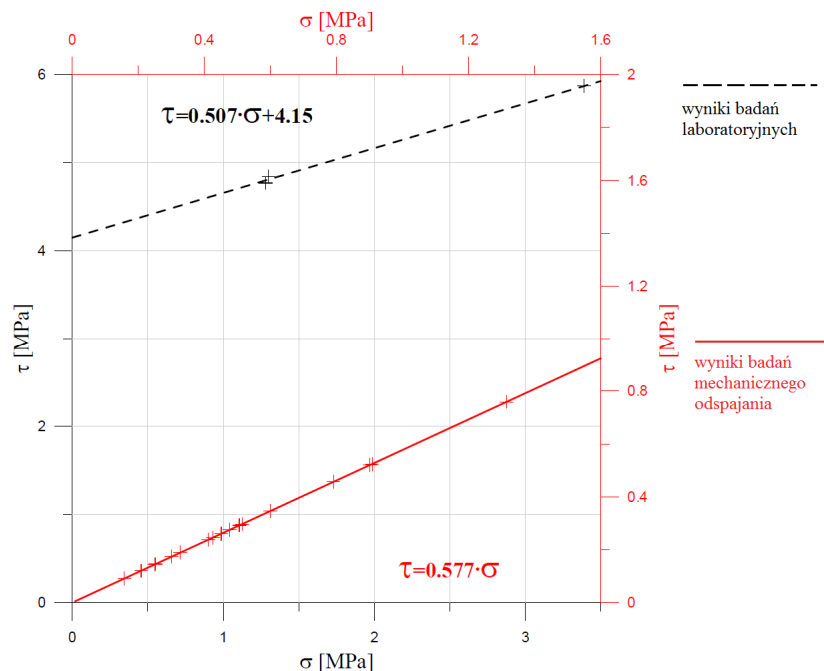
Rys. 8. Widok próbek foremnych piaskowca po przeprowadzeniu prób wytrzymałościowych [14]

Przeprowadzone badania pozwoliły na wyznaczenie [14]:

- wytrzymałości granicznej na jednoosiowe ściskanie, $\sigma_C \approx 20,1$ MPa,
- wytrzymałości granicznej na jednoosiowe rozciąganie, $\sigma_T \approx 1,8$ MPa,
- spójności w próbie ścinania przy ściskaniu, $c \approx 4,2$ MPa,
- spójności w próbie ścinania bezpośredniego $c \approx 2,9$ MPa,
- kąta tarcia wewnętrznego $\varphi = 27^\circ$.

Wartości spójności c i kąta tarcia wewnętrznego φ dla badanego piaskowca oznaczono w próbach ścinania przy ściskaniu. Badania przeprowadzono na próbkach o wymiarach: średnica $d \approx 42$ mm i wysokości $h \approx 50$ mm. Próbki umieszczono w przyrządach do przeprowadzania prób ścinania przy ściskaniu, w maszynach wytrzymałościowych typu EDB-60 [15]. Na podstawie maksymalnych wartości naprężeń normalnych σ i stycznych τ uzyskanych w próbach laboratoryjnych wyznaczono postać równania stanu granicznego Coulomba-Mohra. Wyznaczono również zależność maksymalnych naprężeń stycznych i normalnych otrzymanych podczas badań in situ (tab. 2). Porównanie wyników przedstawiono na rysunku 9. Otrzymane wartości współczynnika tarcia wewnętrznego – $\tan \varphi$, są zbliżone i wynoszą, dla badań laboratoryjnych 0,507 oraz dla badań mechanicznego odspajania 0,577. Wyznaczony kąt tarcia wewnętrznego φ odpowiednio dla badań laboratoryjnych i in situ wynosi $26,88^\circ$ i $29,88^\circ$. Natomiast otrzymano dużą rozbieżność odnośnie wartości spójności materiału – k . Spójność wyznaczona na podstawie prostej Coulomba-Mohra z badań laboratoryjnych wynosi 4,15 MPa, natomiast z badań mechanicznego odspajania jest bliska zeru. Zakładając, że w górotworze spękanym kohezja nie występuje [2], wówczas równanie Coulomba-Mohra przyjmuje postać:

$$|\tau| = \sigma \tan \varphi$$



Rys. 9. Porównanie prostej Coulomba-Mohra dla otrzymanych maksymalnych wartości naprężeń τ i σ z badań laboratoryjnych i badań mechanicznego odspajania

W świetle wyników badań prowadzonych w ramach projektu INREQ można stwierdzić, że znajomość kąta tarcia wewnętrznego materiału pozwala na przybliżone określenie geometrii płaszczyzny odspojenia. Należy mieć jednak na uwadze, że właściwości wytrzymałościowe materiału zależą od kierunku usytuowania tzw. płaszczyzn osłabienia (uwarstwienia, łupliwości itd.) [10], co w bezpośredni sposób wpływa na wielkość kąta tarcia wewnętrznego. Na geometrię płaszczyzny odspojenia, podobnie jak na parametry wytrzymałościowe skał wpływ może mieć również stan naprężenia calizny wynikający z głębokości zalegania skał. Określenie geometrii odspojenia i siły krytycznej podczas wrywania pozwoliło na oszacowanie naprężeń w urabianym materiale.

5. Podsumowanie

Badania przeprowadzone w ramach projektu INREQ pozwoliły określić geometrię odspojenia, co jest niezbędne do opracowania technologii drążenia chodnika o zadanych wymiarach i kształcie, wstępne oszacowanie metryki wiercenia otworów, jak również oszacowanie energochłonności i wydajności urabiania. Zmierzona podczas badań in situ średnia wartość kąta pochylenia powierzchni odspojenia wyniosła $28,3^\circ$, natomiast kąt tarcia wewnętrznego skał wyznaczony w badaniach laboratoryjnych wyniósł 27° . Może to wskazywać, że znajomość kąta tarcia wewnętrznego materiału pozwala na przybliżone określenie geometrii płaszczyzny odspojenia. Są to wyniki badań jednego typu skały (piaskowiec), a zastosowane prototypowe urządzenie badawcze UDWR-1 mogło wprowadzać w badanym materiale nie pożądane naprężenia ściskające wynikające z konstrukcji podpory nośnej. Mając powyższe na uwadze należy, dla określenia geometrii odspojenia, prowadzić dalsze badania w innych przodkach kamiennych, za pomocą urządzenia badawczego o zmodernizowanej konstrukcji. Badania laboratoryjne skał pod kątem wyznaczenia wewnętrznego kąta tarcia, spójności oraz wytrzymałości na rozciąganie pozwalają na odniesienie wyników badań in situ do parametrów skał wyznaczanych w podstawowych próbach wytrzymałościowych. Dalsze badania powinny pozwolić na opracowanie empirycznego modelu niszczenia skał w złożonym stanie naprężenia wywołanym mechanicznym odspajaniem.

Literatura

- [1] Borecki M., Chudek M.: Mechanika górotworu. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1972
- [2] Cała M., Flisiak J., Tajduś A.: Mechanizm współpracy kotwi z górotworem o zróżnicowanej budowie. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Seria z Lampką Górniczą nr 8, Kraków, 2001
- [3] Cebula D.: Wyniki badań dołowych technologii mechanicznego odspajania skał. Nowoczesne metody eksploatacji węgla i skał zwięzłych. Monografia, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków 2015 s. 212-222
- [4] Cebula D., Kalita M., Prostański D.: Próby dołowe technologii drążenia tuneli ratowniczych metodą niszczenia spójności skał. Maszyny Górnicze 2015 nr 1 s. 3-7
- [5] Derski W., Izbicki R., Kisiel I., Mróz Z.: Mechanika techniczna, Tom VII. Mechanika skał i gruntów. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1982
- [6] Drwięga A., Cebula D., Kalita M. i inni: Sprawozdanie za rok 2014 z realizacji projektu INREQ ITG KOMAG. Gliwice 2014 (materiały niepublikowane)

- [7] ISRM, Commission on Testing Methods: The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:1974-2006. Edited by R. Ulusay and J.A. Hudson. Ankara, Turkey 2007
- [8] Jonak J., Podgórski J.: Numeryczne badania procesu skrawania skał izotropowych. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin, 2006
- [9] Kalita K.; Prostański D.: Technologia drążenia tuneli ratowniczych metodą niszczenia spójności skał. Przegląd Górniczy 2012 nr 12 s. 86-91
- [10] Kidybiński A.: Podstawy geotechniki kopalnianej. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1982
- [11] Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice, 1994
- [12] Pytel W.: Geomechaniczne problemy doboru obudowy kotwowej dla wyrobisk górniczych. KGHM CUPRUM, Wrocław, 2012
- [13] Sałustowicz A.: Zarys mechaniki górotworu. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1986
- [14] Tomiczek K.: Sprawozdanie z badań laboratoryjnych piaskowca z ZKWK „Królowa Luiza”. Laboratorium Mechaniki Skał KGBPiZOP, Gliwice, 2015 (materiały niepublikowane)
- [15] Tomiczek K.: Badania wytrzymałości skał na ścinanie. Wydawnictwo Górnicze, Kwartalnik Budownictwo Górnicze i Tunelowe, nr 3, Katowice 2008, s. 11-20

Czy wiesz, że

... Węgiel kamienny jest piątym największym eksportowym surowcem Rosji. Rosja plasuje się na trzecim miejscu, tuż przed Indonezją i Australią, pod względem eksportu węgla. W 2015 roku eksport przyniósł 9.5 biliona dolarów, a w pierwszym kwartale 2016 roku – 1.9. Rosyjskie zakłady wydobywcze preferują eksport niż dostarczanie węgla na krajowy rynek, nawet kosztem efektywności. W 2015 roku wyeksportowano z Rosji 155 milionów ton węgla, co stanowi 40% całego wydobycia.

World Coal 7/2016