Badania i analiza naprężeń krytycznych w materiale skalnym wywołanych mechanicznym odspajaniem

Streszczenie:

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.

Słowa kluczowe: technologia drążenia chodnika, odspajanie skal, badanie geometrii odspojenia, badania wytrzymałościowe skal

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

1. Wprowadzenie

Koncepcja metody mechanicznego odspajania skał oraz badania mające na celu ocenę możliwości jej zastosowania do drążenia 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 znaczenie 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. wyznaczenie 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 wytężenia w materiale skalnym wywołanego mechanicznym odspajaniem

Omawiana metoda mechanicznego odspajania skał polega na tym, że w czołu urabianego wyrobiska wiercony jest otwór, w którym za pomocą elementu rozpiecającego mocowane jest
cięgno. Następnie na utwierdzone w skale cięgno oddziałuje siła powodująca odspojenie fragmentu skały od masywu [9]. W przypadku skał nie sformułowano uniwersalnego kryterium wytężeniowego. Należy zatem posługiwać się kilkoma kryteriami do oceny wytężenia, uwzględniając mechanizmy niszczenia przez ściskanie, ściśnanie 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 rozwiązania konkretnych problemów technicznych [1, 2, 8, 10, 12, 13].

Do opisu stanu wytężenia skał w otoczeniu cięgna 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 cięgna zamocowanego elementem rozprężnym.

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

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

\[ \sigma = \frac{N}{F} \text{ [MPa]} \]
\[ \tau = \frac{T}{F} \text{ [MPa]} \]

gdzie:

N – składowa siły P normalna do powierzchni ściśnania, P\cdotcosφ [N],
T – składowa siły P styczna do powierzchni ściśnania, P\cdotsinφ [N],
F – pole powierzchni ściśnania [mm²],
φ – kąt płaszczyzny ściśnania [°].

Według zmodyfikowanego warunku Coulomba-Mohra naprężenia normalne do powierzchni ścięcia zwiększają opór ściśnania wprost proporcjonalnie do swojej wartości [12].
Rozpatrując zadanie dwuwymiarowe, równanie stanu granicznego Coulumb-Mohra przyjmuje postać (rys. 2):

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

gdzie:

$\tau$ – naprężenia styczne do powierzchni ścięcia,

$\sigma$ – naprężenia normalne do powierzchni ścięcia,

$k$ – kohezja.

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

3. Badania mechanizmu niszczenia calizny skalnej

W Instytucie Techniki Górnictzej 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 Górnictzym 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 odpuszczenie 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.
Opracowana w ITG KOMAG technologia mechanicznego odpajania 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 złuzować linię 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 zaopatrzony 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 wyrywania kotwy z górotworu potwierdzono badaniami laboratoryjnymi i in situ, mającymi na celu określenie siły zakotwienia i wytrzymałości kotwy. Urządzenia do wyrywania 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 wyrywania 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 wyrywania 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 skale i wytrzymałość cięgna 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 osadzono kotwy na różnej głębokości i rejestrowano ciśnienie w silowniku urządzenia oraz mierzono wymiary geometryczne wyłomu skalnego powstałego w wyniku wyrywania 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 – \(\varphi_2\) i pionie – \(\varphi_1\)) mogły wynikać z anizotropowości materiału. Średni kąt pochylenia powierzchni odspojenia wyniósł 28,3° (tab. 1). Kąt pochylenia płaszczyzny odspojenia określono na podstawie wymiarów wyłomu. 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]

<table>
<thead>
<tr>
<th>Poz.</th>
<th>Głębokość kotwienia k [m]</th>
<th>Głębokość odspojenia h [m]</th>
<th>Wymiary podstawy wyrwania [mm]</th>
<th>Kąt (\varphi_1) [°]</th>
<th>Kąt (\varphi_2) [°]</th>
<th>Siła P [kN]</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td>Wymiary podstawy wyrwania [mm]</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>pionowy a</td>
<td>poziomy b</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>1</td>
<td>0,16</td>
<td>0,12</td>
<td>0,6</td>
<td>0,4</td>
<td>22</td>
<td>31</td>
</tr>
<tr>
<td>2</td>
<td>0,17</td>
<td>0,09</td>
<td>0,35</td>
<td>0,35</td>
<td>27</td>
<td>27</td>
</tr>
<tr>
<td>3</td>
<td>0,18</td>
<td>0,14</td>
<td>0,54</td>
<td>0,71</td>
<td>27</td>
<td>21</td>
</tr>
<tr>
<td>4</td>
<td>0,18</td>
<td>0,13</td>
<td>0,43</td>
<td>0,42</td>
<td>31</td>
<td>32</td>
</tr>
<tr>
<td>5</td>
<td>0,18</td>
<td>0,14</td>
<td>0,55</td>
<td>0,7</td>
<td>27</td>
<td>22</td>
</tr>
<tr>
<td>6</td>
<td>0,19</td>
<td>0,16</td>
<td>0,5</td>
<td>0,7</td>
<td>33</td>
<td>25</td>
</tr>
<tr>
<td>7</td>
<td>0,19</td>
<td>0,11</td>
<td>0,5</td>
<td>0,57</td>
<td>24</td>
<td>21</td>
</tr>
<tr>
<td>8</td>
<td>0,19</td>
<td>0,13</td>
<td>0,5</td>
<td>0,6</td>
<td>28</td>
<td>23</td>
</tr>
<tr>
<td>9</td>
<td>0,19</td>
<td>0,15</td>
<td>0,65</td>
<td>0,55</td>
<td>25</td>
<td>29</td>
</tr>
<tr>
<td>10</td>
<td>0,19</td>
<td>0,16</td>
<td>0,6</td>
<td>0,5</td>
<td>28</td>
<td>33</td>
</tr>
<tr>
<td>11</td>
<td>0,2</td>
<td>0,15</td>
<td>0,6</td>
<td>0,78</td>
<td>27</td>
<td>21</td>
</tr>
<tr>
<td>12</td>
<td>0,2</td>
<td>0,15</td>
<td>0,57</td>
<td>0,51</td>
<td>28</td>
<td>31</td>
</tr>
<tr>
<td>13</td>
<td>0,21</td>
<td>0,15</td>
<td>0,53</td>
<td>0,43</td>
<td>30</td>
<td>35</td>
</tr>
<tr>
<td>14</td>
<td>0,21</td>
<td>0,19</td>
<td>0,7</td>
<td>0,56</td>
<td>29</td>
<td>34</td>
</tr>
<tr>
<td>15</td>
<td>0,25</td>
<td>0,18</td>
<td>0,5</td>
<td>0,6</td>
<td>36</td>
<td>31</td>
</tr>
<tr>
<td>16</td>
<td>0,25</td>
<td>0,15</td>
<td>0,6</td>
<td>0,6</td>
<td>27</td>
<td>27</td>
</tr>
<tr>
<td>17</td>
<td>0,26</td>
<td>0,17</td>
<td>0,55</td>
<td>0,65</td>
<td>32</td>
<td>28</td>
</tr>
<tr>
<td>18</td>
<td>0,265</td>
<td>0,125</td>
<td>0,4</td>
<td>0,36</td>
<td>32</td>
<td>35</td>
</tr>
<tr>
<td>Śr.</td>
<td>0,20</td>
<td>0,14</td>
<td>0,53</td>
<td>0,5</td>
<td>28,5</td>
<td>28,1</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Próby odspajania calizny skalnej za pomocą kotwy osadzonej na głębokości większej niż 0,22 m kilkucośnie 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 \(\phi\) 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 przesuwał 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).

![Diagram](image)

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

![Graph](image)

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÷1,33 MPa, a naprężenia styczne do powierzchni odspojenia mieściły się w przedziale 0,11÷0,72 MPa (tab. 2).
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 Górniczego i Geologii Politechniki Śląskiej, zgodnie z sugestiami Międzynarodowego Towarzystwa Mechaniki Skal (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 ścinaniu 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,
- spóźności w próbie ściskania przy ściskaniu, $c \approx 4,2$ MPa,
- spóźności w próbie ściskania bezpośredniego $c \approx 2,9$ MPa,
- kąta tarcia wewnętrznych $\varphi = 27^\circ$.

Wartości spóźności $c$ i kąta tarcia wewnętrznego $\varphi$ dla badanego piaskowca oznaczono w próbach ściskania przy ściskaniu. Badania przeprowadzono na próbkach o wymiarach: średnica $d=42$ mm i wysokości $h=50$ mm. Próbkę umieszczono w przyrządach do przeprowadzania prób ściskania przy ściskaniu, w maszynach wytrzymałościowych typu EDB-60 [15]. Na podstawie maksymalnych wartości napięć normalnych $\sigma$ i stycznych $\tau$ uzyskanych w próbach laboratoryjnych wyznaczono postać równania stanu granicznego Coulomba-Mohra. Wyznaczone również zależność maksymalnych napięć 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 $\varphi$ odpowiednio dla badań laboratoryjnych i in situ wynosi $26,88^\circ$ i $29,88^\circ$. Natomiast otrzymano dużą rozbieżność odnośnie wartości spóźności materiału – $k$. Spóźność 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 spękany kohezja nie występuje [2], wówczas równanie Coulomba-Mohra przyjmuje postać:

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

Rys. 9. Porównanie prostej Coulomba-Mohra dla otrzymanych maksymalnych wartości napięć $\tau$ i $\sigma$ 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 (uwarsztwienia, łupliwości itd.) [10], co w bezpośredni sposób wpływa na wielkość kąta tarcia wewnętrznego. Na geometrii płaszczyzny odspojenia, podobnie jak na parametry wytrzymałościowe skal wpływa może mieć również stan naprężenia calizny wynikający z głębokości zalegania skał. Określenie geometrii odspojenia i siły krytycznej podczas wyrywania 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°, natomiast kąt tarcia wewnętrznego skala 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 skala pod kątem wyznaczenia wewnętrznego kąta tarcia, spójności oraz wytrzymałości na rozciąganie pozwalają na odniesienie wyników badań in situ do parametrów skala wyznaczanych w podstawowych próbach wytrzymałościowych. Dalsze badania powinny pozwolić na opracowanie empirycznego modelu niszczenia skała w złożonym stanie naprężenia wywołanym mechanicznym odspajaniem.

Literatura


---

*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 billiona dolarów, a w pierwszym kwartale 2016 roku – 1.9. Rosyjskie zakłady wydobycie 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*