

Danuta Krzysztoń, Ryszard Wosz*, Jerzy Cieślik*, Robert Klisowski**

OKREŚLENIE SKŁONNOŚCI SKAŁ DO TĄPAŃ NA PODSTAWIE BADAŃ PRÓBEK SKALNYCH Z KOPALŃ PERU W SZTYWNEJ MASZYNIE WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ**

1. Wprowadzenie

Przewidywanie tąpań jest bardzo trudne, ponieważ zjawisko to zależy od wielu czynników: naturalnych warunków geologicznych (litologia, tektonika), geomechanicznych warunków (rozkład naprężeń wokół wyrobisk), metod eksploatacji (maszyny udarowe albo materiały wybuchowe), ale także od własności naprężeniowo-odkształceniowych. Własności te są określane laboratoryjnie na zwięzłych próbkach skalnych, a następnie dostosowywane do masywu skalnego z uwzględnieniem strukturalnych osłabień i naturalnych warunków [2].

Własności naprężeniowo-odkształceniowe są określane na podstawie kilku parametrów otrzymanych z całkowitej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej opisującej zachowanie się skał zarówno w przedkrytycznej, jak i pokrytycznej części. Charakterystyka ta otrzymana jest z badań próbek skalnych w sztywnej maszynie wytrzymałościowej, przy zadanej stałej prędkości odkształcenia podłużnego próbki [20].

Niniejsza praca jest wynikiem badań prowadzonych w ramach umowy pomiędzy Zjednoczeniem Kopalń „Buenaventura” w Uchucchama w Peru a Fundacją Nauka i Tradycje Górnicze z siedzibą na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Umowa dotyczyła określenia skłonności do tąpań przesłanych próbek kopalnianych dwóch rodzajów skał: wapienia i złoża mineralnego.

Z próbek kopalnianych wykonano próbki laboratoryjne (rozd. 2.1.), które następnie były badane w sztywnej maszynie wytrzymałościowej MTS-815 w warunkach jednoosiowego ściskania (rozd. 2.2.). Dokładny opis metodyki prowadzenia badań przedstawia rozdział 2.3.

Wynikiem badań każdej próbki była charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa, na podstawie której określono przedkrytyczne i pokrytyczne własności próbki skalnej (rozd. 3.1.). Charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa przedstawia również energię właściwą użytą w poszczególnych zakresach odkształcenia podłużnego próbki (rozd. 3.2.).

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Badania zrealizowano w ramach badań statutowych, nr umowy w AGH: 11.11.100.277

Skłonność skał do tępaków charakteryzują różne wskaźniki obliczone na podstawie znanych wzorów [11] uwzględniających parametry naprężeniowo-odkształceniowe i energii właściwe wyznaczone z całkowitej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej (rozdz. 3.3).

Wszystkie dane i wyniki uzyskane w przypadku każdej badanej próbki zestawiono na jednej karcie zwanej specyfikacją próbki (rys. 12).

Wyniki zbiorcze badań wszystkich próbek wapienia przedstawiają rysunki 13–15, a jeżeli chodzi o złoża mineralne rysunki 16–18.

2. Badania laboratoryjne próbek skalnych z kopalń Peru

Próbki kopalniane ze skał wapienia oraz złoża mineralnego zostały dostarczone w postaci fragmentów rdzeni wiertniczych o różnych średnicach, pochodzących z trzech kopalń: Carmen, Huantajalla i Socorro, znajdujących się na terenie Peru. Z próbek tych wykonano próbki laboratoryjne.

2.1. Sposób wykonania próbek laboratoryjnych

Próbki laboratoryjne zostały wykonane metodą obróbki mechanicznej na sucho. Obróbka wstępna rdzeni polegała na pocięciu rdzeni za pomocą piły mechanicznej na mniejsze fragmenty. Następnie, za pomocą tokarki dokonano dalszej obróbki – polegającej na dokładnej obróbce podstaw tak, aby spełniały wymagania ISRM [5] dotyczące ich gładkości oraz równoległości. W ten sposób otrzymano próbki walcowe o smukłości 2, będącej ilorzem wysokości próbki do jej średnicy. Zalecenia ISRM dotyczące badań pozniszczeniowych sugerują badanie próbek o smukłościach 2÷3. Ze względu na spodziewane gwałtowne niszczenie badanego materiału przyjęto smukłość odpowiadającą dolnej granicy tego przedziału. Średnice próbek uwarunkowane były średnicami otrzymanych rdzeni.

Próbki zostały oznaczone w sposób pozwalający na jednoznaczny identyfikację próbki za pomocą rodzaju skały, numeru fragmentu rdzenia, z którego zostały wykonane, a po myślniku dodano numer kolejnej próbki; np.: oznaczenie „wapień 30-2” przedstawia próbkę wapienia nr 2 powstałą z fragmentu rdzenia o numerze 30. Wygląd próbek przed badaniem przedstawiają rysunki 1, 2, 3.

Ogółem wykonano 63 próbki, w tym:

- próbki wapienia:
 - 19 próbek o średnicach $d \approx 48$ mm,
 - 6 próbek o średnicach $d \approx 63$ mm,
 - 1 próbka o średnicy $d \approx 35$ mm;
- próbki złoża mineralnego:
 - 8 próbek o średnicach $d \approx 30$ mm,
 - 29 próbek o średnicach $d \approx 42$ mm.

Wszystkie próbki zostały zmierzone, a ich wymiary zaokrąglono do 0,1 mm zgodnie z zaleceniami ISRM. Przed badaniem każda próbka została zważona w celu wyznaczenia jej gęstości objętościowej. Badania były prowadzone na próbkach w stanie powietrzno-suchym.



Rys. 1. Próbkki wapienia przygotowane do badań (19 próbek o średnicy 48 mm)



Rys. 2. Próbkki wapienia (6 próbek o średnicy 63 mm) i próbkki złoża mineralnego (8 próbek o średnicy 30 mm) przygotowane do badań



Rys. 3. Próbkki złoża mineralnego przygotowane do badań (29 próbek o średnicy 42 mm)

2.2. Aparatura badawcza

Badania laboratoryjne zostały wykonane w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii AGH, Kraków. Zastosowano serwo sterowaną maszynę wytrzymałościową MTS-815 z systemem sterowania TestStar, zapewniającym utrzymanie stałej prędkości przyrostu przemieszczenia lub naprężenia i automatyczną rejestrację pomiarów.

Sposób działania większości maszyn serwo sterowanych jest podobny. Kontroler cyfrowy porównuje sygnał zwrotny używany do sterowania z sygnałem błędu – proporcjonalnym do jego wielkości. Sygnał błędu jest przetwarzany przez wzmacniacz PID i służy jako sygnał sterujący serwozaworem, który kontroluje ruch tłoka w taki sposób, aby w efekcie zredukować błąd do minimum [9].

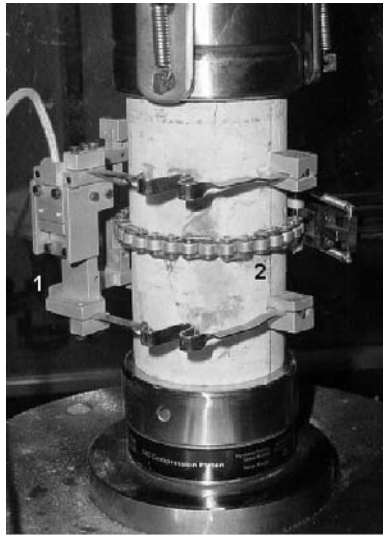
Podana przez producenta sztywność ramy maszyny wynosi 11 GN/m i spełnia zalecenia ISRM [5], według których powinna być większa od 5 GN/m.

Wygląd stosowanej do badań maszyny wytrzymałościowej przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Widok sztywnej maszyny MTS-815 w Laboratorium Katedry Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH

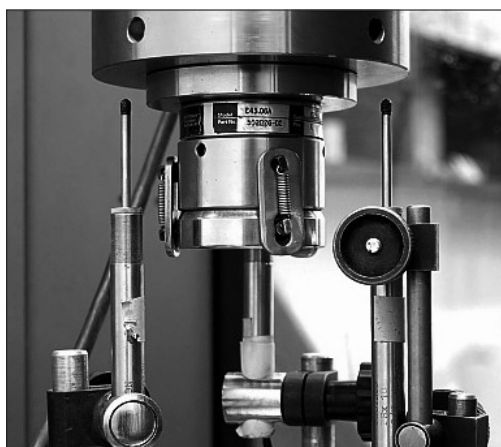
Na zmierzoną oraz zważoną próbkę, w połowie jej wysokości, zakładany był ekstensometr łańcuszkowy (oznaczenie 2 na rysunku 5), za pomocą którego mierzone były odkształcenia obwodowe (poprzeczne), a także, gdy wymiary próbki to umożliwiały – ekstensometr odkształceń podłużnych (oznaczenie 1 na rysunku 5), mierzący odkształcenia na długości odcinka bazowego równej 50 mm w środkowej części próbki. Przykład ocujnikowanej w ten sposób próbki przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Próbka skalna z założonymi czujnikami:

1 – ekstensometr podłużny, 2 – ekstensometr obwodowy, pomiędzy płytami maszyny MTS-815

Pomiar odkształceń podłużnych za pomocą ekstensometru montowanego na próbce był czasami niemożliwy, ponieważ średnice próbek nie były standardowe ($d = 54 \text{ mm}$). Z tego względu zdecydowano się na pomiar globalny odkształceń na całej wysokości próbki za pomocą trzech czujników liniowych zamontowanych pomiędzy płytami maszyny (rys. 6). Ponieważ pomiar tymi czujnikami obejmował także skrócenie stalowych elementów bezpośrednio dociskających próbkę, dokonano pomiaru sztywności tych elementów, a następnie korekty otrzymanych charakterystyk.



Rys. 6. Sposób usytuowania czujników odkształceń podłużnych w maszynie wytrzymałościowej

2.3. Metodyka przeprowadzonych badań

Stosowane w nowoczesnych maszynach wytrzymałościowych sterowanie w obwodzie zamkniętym wykorzystuje ciągłą rejestrację zmian siły, odkształcenia osiowego i odkształcenia poprzecznego. Każda z tych wielkości jest mierzona za pomocą odpowiedniego przetwornika i może być użyta do kontroli procesu obciążania próbki. Wybrany sygnał zwrotny staje się wtedy niezależną zmienną kontrolującą ten proces. Zasady prowadzenia tego typu badań zostały opisane przez Hudsona i in. [8].

Nowoczesne maszyny wytrzymałościowe dzięki wykorzystaniu serwohydraulicznych systemów sterowania ze sprzężeniem zwrotnym umożliwiają realizację praktycznie dowolnego schematu obciążania próbki, pozwalają więc na badania skał zachowujących się zarówno według klasy I, jak również klasy II według Wawersika [20]. Jeśli czynnikiem sterującym sprzężeniem zwrotnym jest mierzona wielkość przemieszczenia osiowego próbki, to badanie odpowiada testowi w klasycznej maszynie ze sterowaniem kinematycznym. Metodą obejmującą również skały klasy II jest ta, w której czynnikiem sterującym jest mierzona na próbce wartość przemieszczenia obwodowego. Badanie sposobem drugim jako bardziej uniwersalne jest preferowane zarówno przez producentów maszyn, jak i większość badaczy. Jednak warto zauważyć, że w pozniszczeniowej fazie eksperymentu (zwłaszcza przy próbkach klasy II) system sterujący musi cyklicznie zmniejszać i zwiększać siłę wywieraną na próbkę, aby zapewnić zadaną stałą prędkość obwodowych przemieszczeń próbki. Fakt ten z całą pewnością wpływa na postać uzyskanej charakterystyki. Ponadto warunki eksperymentu znacznie odbiegają od warunków rzeczywistego niszczenia skał (np. warstwy skał obciążające filar nie mogą przemieścić się w górę, odciążając filar), co powoduje, że zastosowanie uzyskanych wyników w praktyce może prowadzić do błędów [6]. Z tego też względu w badaniach próbek przyjęto tryb sterowania w fazie pozniszczeniowej stałą prędkością odkształceń podłużnych. Tryb sterowania prasą przy stałej prędkości odkształcenia osiowego (podłużnego) polega na takim zaprogramowaniu pracy tłoka, aby utrzymywał on stałą prędkość i kierunek przemieszczeń osiowych na założonej bazie pomiarowej [15, 9].

W tym przypadku sterowanie tłokiem odbywało się za pomocą uśrednionej wartości wskazań trzech czujników przemieszczeń osiowych opisanych powyżej.

Obciążanie ocujnikowanej próbki odbywało się w czterech etapach:

- W pierwszym etapie obciążano próbkę w trybie stałej prędkości przyrostu naprężeń normalnych, która wynosiła $\dot{\sigma} \approx 0,3$ MPa/s. Obciążanie kontynuowano do poziomu naprężenia przekraczającego wartość 75% spodziewanego naprężenia niszczącego. Sterowanie naprężeniem normalnym polega na ustawieniu parametrów doświadczenia, aby zmiana siły przykładanej do powierzchni próbki (a więc zmiana naprężenia) była stała w czasie. Elementem kontrolującym pomiar i zadaną prędkość obciążenia jest wtedy dynamometr zamontowany bezpośrednio przy próbce. Kontrola procesu obciążania w tym trybie możliwa jest jedynie do wartości obciążenia krytycznego [15, 9].
- Etap drugi polegał na odciążaniu próbki, z wymienioną wcześniej prędkością naprężenia $\dot{\sigma} \approx 0,3$ MPa/s.

- Kiedy naprężenia osiągnęły wartość bliską zeru, rozpoczynano etap trzeci, polegający na ponownym obciążeniu próbki w trybie stałej prędkości naprężeń normalnych, tak jak w etapie pierwszym.
- W etapie czwartym – kiedy zachowanie charakterystyki odkształceń poprzecznych i podłużnych wskazywało osiągnięcie fazy zaawansowanego pęknięcia – przełączano sterowanie na tryb stałej prędkości odkształceń podłużnych, których wartość wynosiła $\dot{\varepsilon}_z \approx 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

W tym trybie prowadzono obciążanie z zadaną prędkością odkształcenia do chwili, kiedy próbka osiągnęła poziom naprężeń resztkowych lub następował całkowity spadek przenoszonych naprężeń.

W trakcie obciążania rejestrowane były następujące wielkości:

- siła (naprężenie) działająca na próbkę,
- przemieszczenie (odkształcenie) podłużne z ekstensometru założonego na próbce,
- wartości przemieszczenia (odkształcenia) podłużnego z każdego z trzech ekstensometrów,
- przemieszczenie (odkształcenie) obwodowe,
- czas.

Zapis dokonywany był z częstotliwością nie mniejszą niż 1 Hz.

Zniszczone próbki fotografowano oraz opisywano mechanizm ich niszczenia. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przykładowe zdjęcia mechanizmów niszczenia próbek.



Rys. 7. Zniszczona próbka nr: złożo mineralne 38-1



Rys. 8. Zniszczona próbka nr: wapień 25-1

W przypadku złoża mineralnego widać wyraźnie, że o zniszczeniu zadecydowała przewaga procesów ścinania (*simple shear*), natomiast próbka wapienia została zniszczona wskutek przewagi naprężeń rozciągających (*multiple extension*) [19].

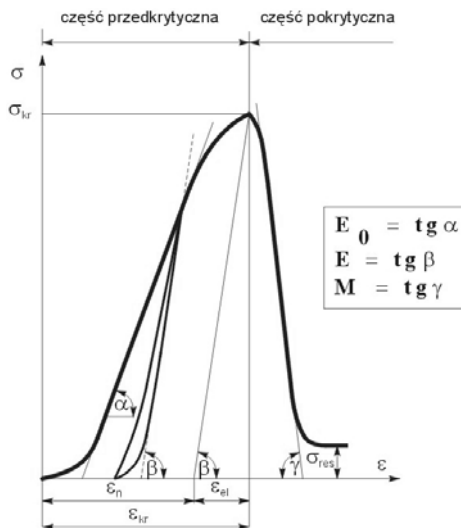
3. Wyniki badań

Próbka, zaopatrzona w czujniki pomiarowe (rys. 5), była ściskana w sztywnej maszynie wytrzymałościowej i podczas całego eksperymentu niszczenia próbki rejestrowano: obciążenie, przemieszczenie osiowe i przemieszczenie poprzeczne. Program komputerowy TESTSTAR II, współpracujący z maszyną wytrzymałościową, przekształca otrzymane krzywe: obciążenie siłą – odkształcenie bezwzględne w charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe: naprężenie-odkształcenie osiowe (podłużne) oraz naprężenie-odkształcenie poprzeczne.

3.1. Określenie własności naprężeniowo-odkształceniowych

Na podstawie charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej określone są następujące parametry (rys. 9):

- naprężenie krytyczne σ_{kr} (jednoosiowa wytrzymałość na ściskanie),
- naprężenie reszkowe σ_{res} ,
- moduł odkształcenia $E_o = \text{tg } \alpha$,
- moduł sprężystości $E = \text{tg } \beta$,
- moduł spadku (osłabienia) $M = \text{tg } \gamma$,
- liczba Poissona $\nu = \varepsilon_{poprzeczne} / \varepsilon_{podłużne}$,
- odkształcenia: krytyczne ε_{kr} , sprężyste ε_{sp} , nieodwracalne ε_n .



Rys. 9. Schemat wyznaczenia parametrów naprężeniowo-odkształceniowych na podstawie całkowitej charakterystyki σ - ε

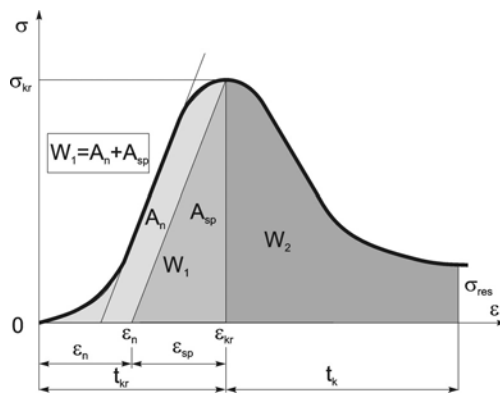
W celu określenia liczby Poissona odkształcenie poprzeczne mierzono ekstensometrem obwodowym, usytuowanym w środkowej części badanej próbki.

Według zaleceń ISRM zarówno liczba Poissona, jak i moduł sprężystości powinny być mierzone w zakresie wartości równej 35–75% jednoosiowej wytrzymałości na ściskanie R_c .

3.2. Określenie energii właściwej podłużnego odkształcenia próbki

Charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe próbek skalnych badanych w sztywnej maszynie wytrzymałościowej mają na ogół kształt odpowiadający przypadkowi statecznego niszczenia próbki skalnej.

Typową charakterystykę otrzymaną w badaniach przedstawia rysunek 10.



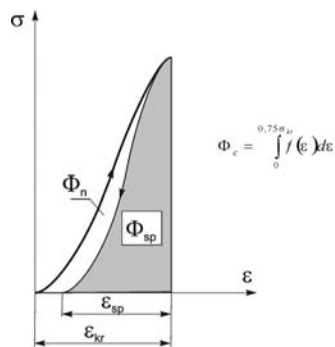
Rys. 10. Podział energii właściwej odkształcenia podłużnego na energie składowe [7]

Pole zawarte między charakterystyką i osią odkształcenia określa energię właściwą odkształcenia podłużnego próbki. Pole to zostało podzielone na dwie części, na pole pod wznoszącą W_1 i opadającą W_2 częścią charakterystyki. Następnie pole pod wznoszącą częścią charakterystyki zostało podzielone na pola odpowiadające sprężystemu A_{sp} i nieodwracalnemu A_n odkształceniu na granicy wytrzymałości próbki [7]. Podział ten przeprowadzono w następujący sposób: z punktu określającego granicę wytrzymałości skały wykreślono prostą równoległą do prostoliniowej części charakterystyki. Punkt przecięcia tej prostej z osią odkształcenia odcina wartości odkształcenia nieodwracalnego ϵ_n i odkształcenia sprężystego ϵ_{sp} , odpowiadające granicy wytrzymałości. Wprowadzony podział powierzchni, zawartej między charakterystyką naprężenia i osią odkształcenia, odpowiada podziałowi energii na energię W_1 potrzebną do osiągnięcia granicy wytrzymałości i na energię W_2 statecznego niszczenia próbki, jak również na energię sprężystego odkształcenia A_{el} i energię nieodwracalnego odkształcenia A_n na granicy wytrzymałości próbki.

W eksperymentach prowadzonych ze stałą prędkością odkształcenia zmiana naprężenia może być analizowana jako funkcja odkształcenia albo jako funkcja czasu. Na wykresach zaznaczono czas obciążania próbki do krytycznej (maksymalnej) wartości obciążenia

t_{kr} i czas niszczenia próbki skalnej, w którym zachodzi spadek naprężenia od maksymalnej wartości do resztkowej wartości, zwany czasem rozpadu t_r .

Podział energii właściwej w przedkrytycznej części charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej, gdy próbka była odciążana przy $0,75 \sigma_{kr}$, jest przedstawiony na rysunku 11.



Rys. 11. Podział energii właściwej w przedkrytycznej części przy odciążaniu próbki od naprężenia $0,75 \sigma_{kr}$

Wówczas całkowita energia odpowiadająca wartości $0,75 \sigma_{kr}$ jest podzielona na energię odkształcenia sprężystego Φ_{sp} i energię zużytą na odkształcenia nieodwracalne Φ_n .

Na podstawie charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej określono następujące energie właściwe:

- | | |
|---|-------------|
| — energię odkształcenia sprężystego w przedziale naprężeń do $0,75 \sigma_{kr}$ | Φ_{sp} |
| — energię odkształcenia nieodwracalnego w przedziale naprężeń do $0,75 \sigma_{kr}$ | Φ_n |
| — energię odkształcenia sprężystego na granicy wytrzymałości | A_{sp} |
| — energię odkształcenia nieodwracalnego na granicy wytrzymałości | A_n |
| — energię odkształcenia potrzebną do osiągnięcia granicy wytrzymałości | W_1 |
| — energię pokrytycznego niszczenia próbki | W_2 |

3.3. Określenie wskaźników skłonności skał do tępów

Wskaźniki skłonności skał do tępów obliczono na podstawie parametrów wyznaczonych z całkowitej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej i energii właściwych w poszczególnych zakresach odkształcenia podłużnego próbki skalnej.

Obliczono następujące wskaźniki:

- Wskaźnik energetycznej skłonności naturalnej węgla do tępów W_{ET} [18]:

$$W_{ET} = \Phi_{sp} / \Phi_n$$

- Wskaźnik energetyczny tępań na granicy wytrzymałości [7]:

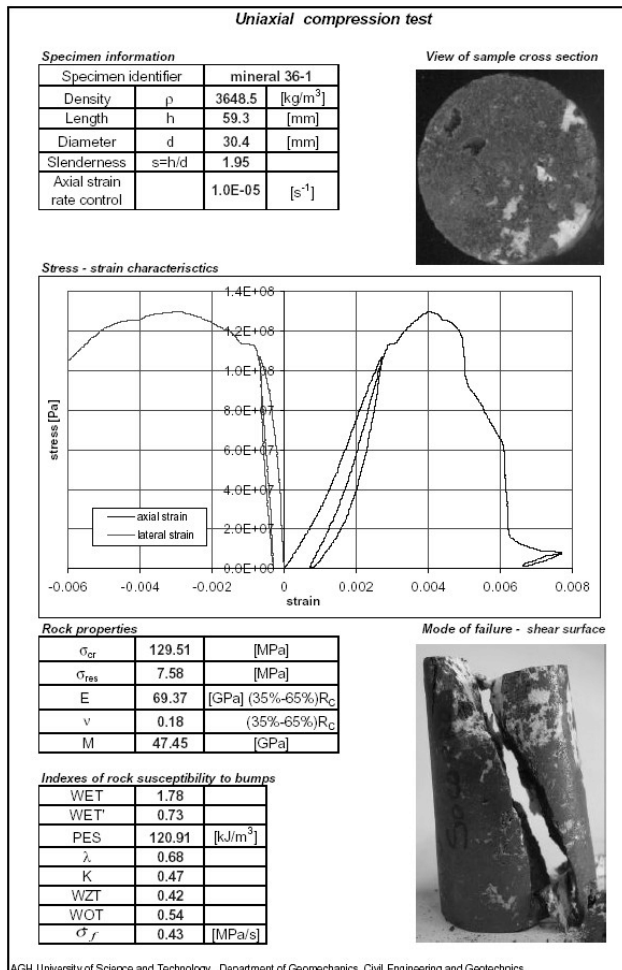
$$W'_{ET} = A_{sp} / A_n$$

- Wskaźnik potencjalnej energii sprężystej PES [16]:

$$PES = 500R_c^2 / E \quad [\text{kJ/m}^3]$$

- Wskaźnik potencjalnej tężliwości K [1]:

$$K = \varepsilon_{sp} / \varepsilon_{kr}$$



Rys. 12. Specyfikacja próbki nr: złożone mineralne 36-1

- Wskaźnik dynamicznego rozpadu λ [14]

$$\lambda = M / E$$

- Wskaźnik zagrożenia tapaniami WZT [7]:

$$WZT = A_{sp} / W_1$$

- Wskaźnik osłabienia tąpnięcia WOT [10]:

$$WOT = A_{sp} / W_2$$

- Wskaźnik prędkości niszczenia, zwany wskaźnikiem prędkości rozpadu [17]:

$$\dot{\sigma}_r = (\sigma_{kr} - \sigma_r) / t_r$$

Przykładowe wyniki jednoosiowego ściskania próbki: złoża mineralne 36-1 są przedstawione na rysunku 12.

Wszystkie dane i wyniki uzyskane w przypadku badanej próbki są zestawione na tym rysunku, stąd wprowadzono nazwę: specyfikacja próbki złoża mineralne 36-1. Na rysunku 12 przedstawiono również wygląd przekroju poprzecznego próbki i sposób jej zniszczenia.

Wyniki pomiarowe w przypadku wszystkich badanych próbek (63 próbek) w postaci specyfikacji próbek są zestawione w załączniku pracy [13].

4. Analiza wyników

Uzyskane wyniki analizowano na podstawie danych przedstawionych w specyfikacjach próbek i zestawionych w tabelach.

Kształt charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej, załączony w specyfikacji każdej próbki, wykazuje szybki spadek pokrytycznej części do naprężenia resztkowego o bardzo małej wartości, co świadczy o gwałtownym niszczeniu próbek.

Moduł spadku w wielu przypadkach nie mógł być określony, ponieważ pokrytyczna część charakterystyki często ma kształt linii prostej o bardzo dużym nachyleniu, co oznacza, że parametr ten zmierza do nieskończoności.

Naprężenie resztkowe ma bardzo małą wartość, która na ogół występuje w próbach jednoosiowego ściskania. Badania prowadzone w przypadkach próbek różnych typów skał, w trójosiowym konwencjonalnym stanie naprężenia ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$), wykazały istnienie naprężenia resztkowego o wartości zależnej od wartości ciśnienia okólnego [12].

Najbardziej niebezpieczny przypadek z punktu widzenia zjawiska tapani występuje w jednoosiowym stanie naprężenia. Pierwsze badania próbek skalnych z kopalni w Peru przeprowadzono w jednoosiowym ściskaniu. Ponadto znaczna liczba próbek była pobrana z małych głębokości (120 m, 180 m), na których konwencjonalne ciśnienie poziome ma stosunkowo małą wartość, która nie powodowałaby większego przyrostu naprężenia resztkowego.

Wartości parametrów naprężeniowo-odkształceniowych mają wpływ na energie odkształcenia podłużnego i wskaźniki skłonności skał do tępań. W niniejszych badaniach tylko te wskaźniki mają wartości, które są obliczane na podstawie przedkrytycznych parametrów i przedkrytycznych energii odkształcenia podłużnego próbki: wskaźnik potencjalnej energii sprężystej PES , wskaźnik energetyczny tępań W_{ET} , wskaźnik energetyczny tępań na granicy wytrzymałości W'_{ET} , wskaźnik potencjalnej tąpliwości K i wskaźnik zagrożenia tąpniętami WZT . Bardzo ważne wskaźniki, określane na podstawie pokrytycznej charakterystyki, jak wskaźnik dynamicznego rozpadu λ i wskaźnik prędkości rozpadu (niszczenia) σ_r , wykazują duże rozrzuty.

Naprężenie krytyczne, będące najbardziej charakterystyczną własnością skał, zostało włączone do wskaźników skłonności skał do tępań.

Wskaźnik energetyczny tępań na granicy wytrzymałości W'_{ET} jest znacznie mniejszy niż konwencjonalny W_{ET} , co może być spowodowane zużytą energią na odkształcenia nieodwracalne, jak również trwałymi odkształceniami spowodowanymi mikrozniszczeniem struktury skalnej w przedkrytycznej części charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej, w pobliżu naprężenia krytycznego.

Wskaźnik potencjalnej energii sprężystej PES , określony w przypadku skał stropowych pokładów węglowych, tąpających i nietąpających, w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym wykazał pewną regularność. W związku z tym zaproponowano czterostopniową skalę klasyfikowania skał płonnych do tępań [17]:

- Klasa I: $PES < 50 \text{ kJ/m}^3$ skały niesklonne do tępań;
- Klasa II: $50 < PES < 100 \text{ kJ/m}^3$ skały słabo sklone do tępań;
- Klasa III: $100 < PES < 200 \text{ kJ/m}^3$ skały o znacznej skłonności do tępań;
- Klasa IV: $PES > 200 \text{ kJ/m}^3$ skały bardzo silnie sklone do tępań.

Według tej klasyfikacji obydwa rodzaje badanych skał: wapień i złoże mineralne kwalifikują się do skał o znacznej skłonności do tępań lub charakteryzują się bardzo silną skłonnością do tępań.

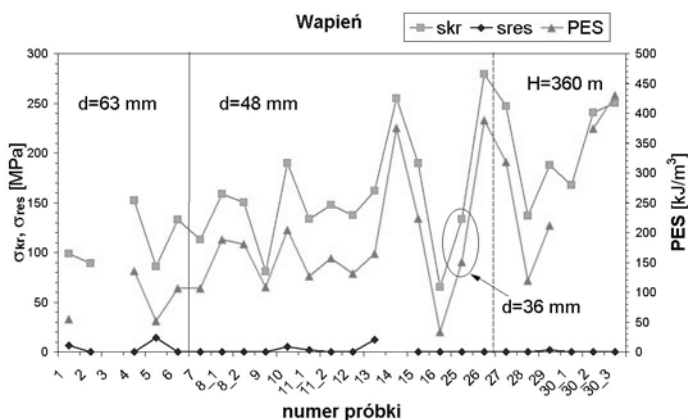
Wartości wskaźnika dynamicznego rozpadu nie są zróżnicowane w przypadku badanych skał ze względu na wartości modułu spadku.

Wskaźnik potencjalnej tąpliwości wykazuje wysokie wartości w przypadku wszystkich próbek skalnych. Wskaźnik ten był zdefiniowany przy uwzględnieniu odkształcenia sprężystego występującego w początkowej części charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej i odkształcenia krytycznego, odpowiadającego naprężeniu krytycznemu.

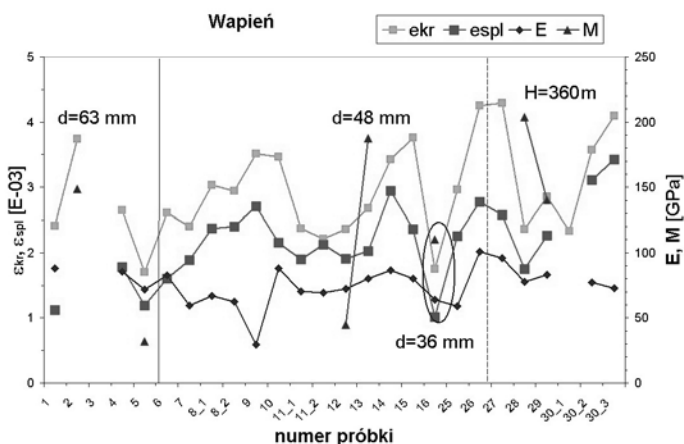
Wskaźnik zagrożenia tąpniętami w przypadku wszystkich badanych próbek jest mniejszy od jedności, to jest wartości określającej kruchy rozpad skały. Ponadto wskaźnik ten jest w przybliżeniu równy wskaźnikowi potencjalnej tąpliwości, co sugeruje, że odkształcenie skały ma znaczny wpływ na skłonność do tępań.

Również ważnym czynnikiem jest czas, w którym zachodzi akumulacja, a następnie wyzwalenie energii. Wprowadzenie osi czasu na wykresach naprężeniowo-odkształceniowych może wnieść pewne informacje dotyczące zjawiska tępań.

Wizualną prezentację otrzymanych wyników przedstawiają rysunki 13–15 jeżeli chodzi o próbki wapienia i rysunki 16–18 jeżeli chodzi o próbki złoże mineralnego, na których wprowadzono oznaczenia średnic próbek i głębokości pobrania próbek.



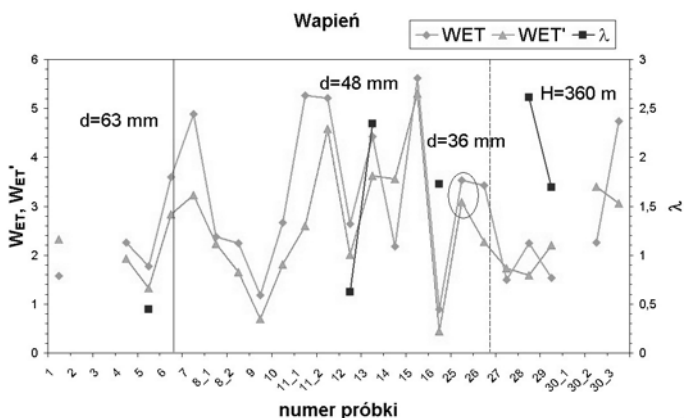
Rys. 13. Napężenie krytyczne, napężenie resztkowe i PES dla próbek wapienia



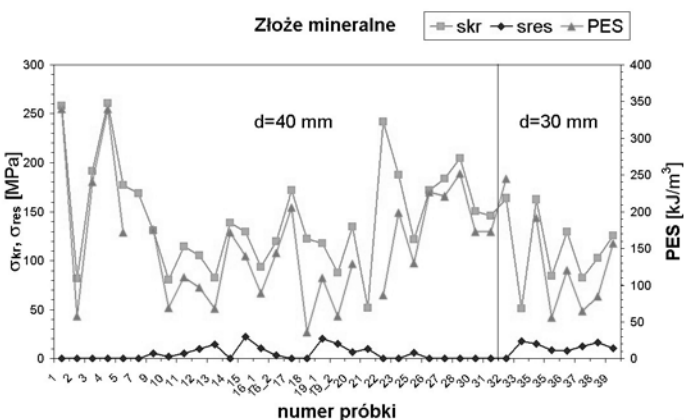
Rys. 14. Odształcenie sprężyste, odształcenie krytyczne, moduł sprężystości i moduł spadku w przypadku poszczególnych próbek wapienia

Otrzymane wyniki mają znaczne rozrzuty, co jest charakterystyczne w przypadku zachowania się skał. Jednakże można zauważyć ogólną tendencję zmian wartości poszczególnych parametrów badanych skał. Mianowicie jeżeli chodzi o próbki wapienia (rys. 13–15):

- Średnie wartości napężenia krytycznego w przypadku mniejszych próbek ($d = 48$ mm) są większe niż w przypadku próbek większych ($d = 63$ mm). Zwiększenie poziomu głębokości pobrania próbek wpływa na zmniejszenie napężenia krytycznego (rys. 13).
- Odształcenia sprężyste mają znaczne wartości w porównaniu z odształceniami krytycznymi, wykazując dużą sprężystość skały (rys. 14). Wartości odształceń krytycznych zmieniają się w zakresie od $1,5 \cdot 10^{-3}$ do $4,0 \cdot 10^{-3}$, co świadczy o kruchości skały.



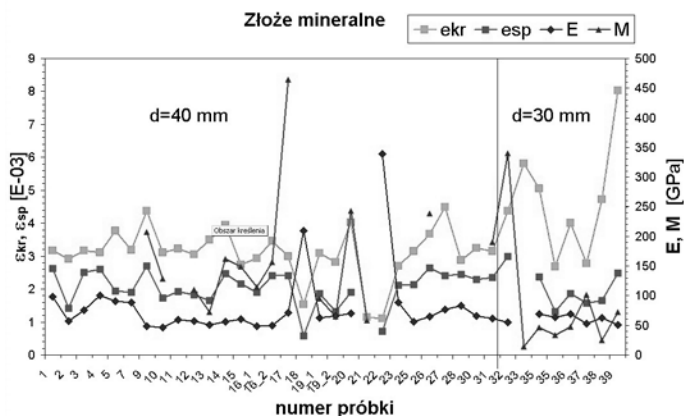
Rys. 15. Wskaźniki: λ , W_{ET} , W'_{ET} odnośnie do poszczególnych próbek wapienia



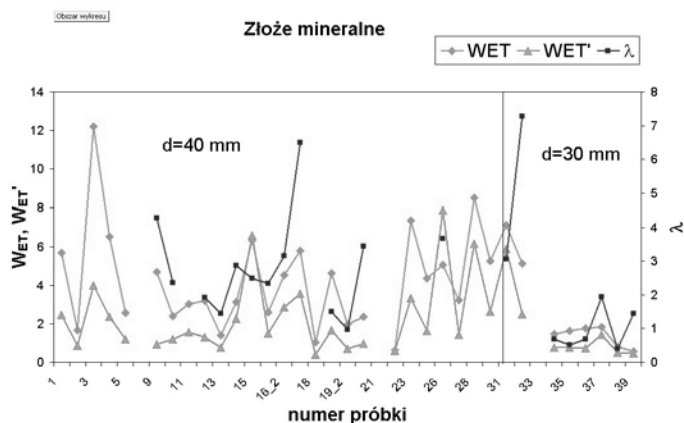
Rys. 16. Naprężenie krytyczne, naprężenie resztkowe i PES odnośnie do poszczególnych próbek złoża mineralnego

Wskaźniki W_{ET} i W'_{ET} zmieniają się w podobny sposób (rys. 15), jednakże wartość wskaźnika W'_{ET} , określana na granicy wytrzymałości próbki, jest znacznie mniejsza od wartości W_{ET} , określanego w zakresie sprężystej części charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej próbki. Tąpnięcie zachodzi w fazie naprężeń przekraczających wytrzymałość doraźną, stąd powszechnie stosowany wskaźnik W_{ET} nie może być jednoznaczną miarą skłonności węgla do tupań [4].

Wyniki jeżeli chodzi o próbki złoża mineralnego (rys. 16–18) są podobne do wyników dotyczących próbek wapienia (rys. 13–15). Różnice występujące w wartościach przedstawionych wielkości mogą być spowodowane, między innymi, pochodzeniem próbek z różnych kopalń.



Rys. 17. Odształcenie sprężyste, odształcenie krytyczne, moduł sprężystości i moduł spadku dotyczące poszczególnych próbek złoże mineralnego



Rys. 18. Wskaźniki: λ , W_{ET} , W'_{ET} dotyczące poszczególnych próbek złoże mineralnego

5. Ogólne konkluzje

Gwałtowny rozpad badanych próbek skalnych świadczy o dużej skłonności skał do tapan. Energia sprężysta skumulowana w próbce, która znajduje się w fazie przedkrytycznej (przedkrytyczna część charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej) jest wyzwolona w pobliżu krytycznego naprężenia w bardzo krótkim czasie niszczenia. Należy zaznaczyć, że wyniki badań uzyskano przy jednej prędkości odształcenia podłużnego próbek, rzędu 10^{-5} s^{-1} i z uwzględnieniem jednej smukłości próbek równej 2.

W praktyce oznacza to, że eksploatacja złoże mineralnego powinna być prowadzona z małą prędkością, wywołującą prędkość odształcenia skał rzędu 10^{-5} s^{-1} . Ponadto

smukłość filarów powinna być mała, około 2, gdyż zniszczenie filara może spowodować wyzwolenie dużej ilości energii sprężystej zakumulowanej w skałach nadkładu.

Zapobieganie tapaniom wymaga analizy poszczególnych przypadków eksploatacji i stosowania odpowiedniej prędkości eksploatacji, wpływającej na prędkość odkształcenia skał, jak również kontroli skał stropowych złoża, w których zakumulowana energia może być zmniejszona przez wymuszone wstrząsy lub przez nawilżanie skał.

LITERATURA

- [1] *Bicz J.A.*: Opredelenije udaropasnosti ugotnych płastov. Trudy WNIMI, sb. XLIX, Leningrad 1962
- [2] *Bukowska M.*: Prognozowanie skłonności do tapani górotworu metodą wskaźnikowej oceny geologiczno-geomechanicznej w warunkach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, 2005
- [3] Prace Naukowe GIG, No 866, Katowice, 1962
- [4] *Dubiński J., Konopko W.*: Tapania. Ocena, prognoza, zwalczanie. Główny Instytut Górnictwa, Katowice, 2000
- [5] *Fairhurst C. E., Hudson J. A.*: Draft ISRM suggested methods for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 36 (1999) 279–289, Pergamon Press, 1999
- [6] *Flisiak D., Klisowski R., Szumiński A.*: Metodyka badań a uzyskiwane charakterystyki pozniszczeniowe – uwagi o potrzebie standaryzacji. Geotechnika i budownictwo specjalne 2002, Wydawnictwo KGBiG AGH, Kraków, 2002
- [7] *Gustkiewicz J. i inni*: Wpływ wody na mechaniczne własności skał tąpających. Sprawozdanie etapowe. Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Kraków, 1987
- [8] *Hudson J.A., Brown E.T., Fairhurst C.*: Optimizing the Control of Rock Failure in Servo-Controlled Laboratory Tests. Rock Mechanics vol. 3/4, 217–224, 1971
- [9] *Klisowski R., Flisiak D., Szumiński A.*: Uwagi na temat sposobu prowadzenia testu jednoosiowego ściskania w serwosterowalnej maszynie wytrzymałościowej. Geotechnika i budownictwo specjalne. Wydawnictwo KGBiG AGH, Kraków, 2002
- [10] *Krzysztoń D.*: Badanie energii odkształcenia podłużnego suchych i mokrych próbek piaskowca. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, z. 145, s. 215–230, Kraków, 1989.
- [11] *Krzysztoń D. i inni*: Analiza porównawcza oceny skłonności węgla i skał do tapani na podstawie różnych parametrów. Praca nr 2144012 BT, GIG, Katowice, 1992
- [12] *Krzysztoń D., Sanetra U.*: Investigations of rocks under triaxial compression at confining pressure from 0 to 70 MPa. Archives of Mining Sciences 48, no 2 (2003), 231–253
- [13] *Krzysztoń D., et al.*: Susceptibility of rocks to bumps. The results of rock samples investigation in a stiff-testing machine. Foundation of Science and Mining Traditions, Faculty of Mining and Geoen지니어ing, AGH University of Science and Technology, Cracow, 2007
- [14] *Minh V.C.*: Energy analysis of deformation and failure of rocks. Rozprawa habilitacyjna, Wydział Geologii UW, Warszawa, 1989
- [15] *Nowakowski A.*: Wpływ sposobu obciążania próbki w sztywnej maszynie wytrzymałościowej na wynik testu jednoosiowego ściskania. Materiały konferencyjne XXV ZSMG, Wrocław, 1997
- [16] *Smolka J. i inni*: Metoda określenia skłonności do tapani zwięzłych piaskowców i łupków piaszczystych (mułowców) otaczających pokłady węglowe. Prace GIG, Katowice, 1978
- [17] *Smolka J. i inni*: Badania własności węgla i skał w zróżnicowanych układach obciążeniowych. Projekt Badawczy KBN, nr 900779101, GIG, Katowice, 1994
- [18] *Szczółka Z.S., Domżał J., Ożana P.*: Energetyczny wskaźnik skłonności naturalnej węgla do tapani. Prace GIG, Komunikat nr 594, Katowice, 1973
- [19] *Szwedzicki T.*: A Hypothesis on Modes of Failure of Rock Samples Tested in Uniaxial Compression. Rock Mech. Rock Engng. (2007) 40 (1), 97–104
- [20] *Wawersik W.R.*: Detailed analysis of rock failure in laboratory compression tests. Ph. D. Thesis, Univ. Minnesota, Minneapolis, 1968
- [21] *Wawersik W.R., Fairhurst C.*: A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., No 6, Vol. 7, 561–575, 1970