

Nowa metoda badania kruchego pęknięcia skał

Artur Dziedzic*

Znajomość parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych skał jest niezbędnym elementem w realizacji zadań z zakresu geologii inżynierskiej. Zniszczenie materiału skalnego następuje często w wyniku kruchego pęknięcia. Stosowane w laboratoriach geomechanicznych klasyczne testy wytrzymałościowe nie dostarczają pełnego spektrum informacji o właściwościach skał i ich odporności na działanie tego procesu. Wydaje się więc konieczne stosowanie dodatkowych metod badawczych umożliwiających analizę tego zjawiska i określenie wielkości wskaźnika odporności na kruche pęknięcie (K_{IC}). Jedną z nich jest zalecana przez Międzynarodową Organizację Mechaniki Skał (ISRM) metoda „chevron bend”.

Słowa kluczowe: geomechanika, wytrzymałość skał, rozciąganie, kruche pęknięcie, laboratorium

Artur Dziedzic — A new method of study of fracture toughness of rocks. *Prz. Geol.*, 47: 927–932.

S u m m a r y. Paper introduces a methodology of fracture toughness (K_{IC}) testing recommended by International Society for Rock Mechanics (ISRM) as a „chevron bend” method. It is presented basic theory of fracture mechanics and fracture energy (Irwin's criterion). It describes the process of preparation and installation of a rock samples in the special equipment produced by American company MTS.

Words key: geomechanic, rocks strength, extension, fracture toughness, laboratory

Jednym z ważniejszych problemów geomechaniki i geotechniki w odniesieniu do skał jest określenie ich właściwości wytrzymałościowych i odporności na działanie czynników zewnętrznych. Pomimo tego, że w geologii inżynierskiej najważniejsze są cechy masywów skalnych, to także materiał skalny sam z siebie i jego właściwości mają istotne znaczenie przy rozwiązywaniu praktycznych zadań. Mechanika pęknięcia jest dyscypliną, która za cel stawia sobie podanie ilościowego opisu przeobrażeń zachodzących wewnątrz ciała niszczonego, w wyniku rozrostu powierzchni nieciągłości w nim się znajdujących. Istotne jest określenie relacji pomiędzy maksymalnym dopuszczalnym naprężeniem a rozmiarami i położeniem szczelin (ISRM, 1988). Zagadnienie to jest szeroko poznane i badane w odniesieniu do różnych sztucznych materiałów: metali, tworzyw plastycznych, ceramiki, a także ma zastosowanie w badaniu właściwości betonów (Ouchterlony, 1989). W odniesieniu do skał, które charakteryzują się specyficzną, nieregularną strukturą zjawisko kruchego pęknięcia jest ciągle jeszcze nie do końca przeanalizowane. Niemniej jednak wydaje się konieczne, aby ta dziedzina geomechaniki odgrywała istotną rolę w badaniach cech wytrzymałościowych skał, ze względu na to, że tradycyjne metody laboratoryjne nie dają pełnego spektrum cech wytrzymałościowo-odkształceniowych skał.

W wyniku oddziaływania na ośrodek skalny czynników zewnętrznych (mechanicznych lub termicznych) dochodzi w nim do wielu przeobrażeń. Często odzwierciedlają się one w postaci zaburzenia ciągłości jego struktury. Skały z natury rzeczy są ośrodkami niejednorodnymi i quasiciągłymi. Występują w nich liczne, często małych rozmiarów defekty, które stanowią miejsca koncentracji naprężeń powstających w wyniku działania sił zewnętrznych (Griffith, 1920). Jeżeli przekroczona zostanie graniczna wartość tych naprężeń następują zmiany w strukturze ośrodka, wyrażające się rozwojem szczelin, co w efekcie może doprowadzić do zniszczenia materiału na skutek pęknięcia. W zależności od tego jakie są właściwości

ośrodka i w jaki sposób działają na niego czynniki zewnętrzne, można wyróżnić pęknięcie kruche, plastyczne, quasikruche i zmęczeniowe.

Pęknięcie kruche występuje wtedy, gdy rozwój szczeliny zachodzi przy pomijalnie małych odkształceniach plastycznych. Po rozpadzie ciało może zostać złożone do swojego pierwotnego kształtu. Pęknięcie plastyczne zachodzi wtedy, gdy zanim dojdzie do defragmentacji ośrodka, występują znaczne odkształcenia plastyczne. Pęknięcie quasikruche polega na tym, że do momentu kiedy nastąpi propagacja szczeliny to wokół jej końców dochodzi do pewnych odkształceń plastycznych, niemniej jednak odkształcenia sprężyste obejmują znaczną część ciała. Natomiast ostatni rodzaj pęknięcia, pęknięcie zmęczeniowe występuje w sytuacji, gdy ciało poddawane jest wielokrotnym, powtarzającym się obciążeniami, w następstwie czego dochodzi do nieodwracalnych uszkodzeń i rozwoju szczelin.

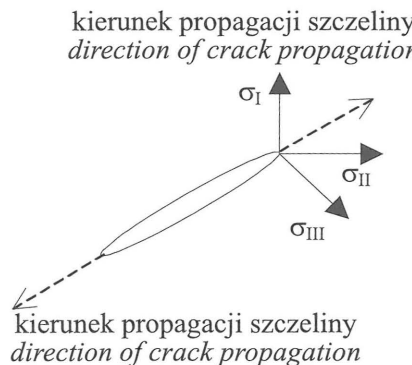
Głównym procesem, który powoduje zniszczenie materiału jest pęknięcie kruche. Jest ono z reguły poprzedzone niewielkim odkształceniem trwałym, wynikającym z właściwości plastycznych skał. Jednakże odkształcenie sprężyste poprzedzające pęknięcie jest zdecydowanie większe i to ono decyduje o powstaniu dwóch przystających do siebie powierzchni zniszczenia (Gustkiewicz, 1997). Mimo wszystko nie należy zapominać o odkształceniach plastycznych, bo w zależności od właściwości danej skały występują one w różnej skali. Można więc uznać, że w skałach, czyli w niejednorodnych ośrodkach rzeczywistych mamy do czynienia z pękaniem quasikruchym.

Poznanie tego zjawiska jest bardzo istotne przy próbie pełnego opisu właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych skał. W warunkach laboratoryjnych wykorzystuje się różne metody badawcze zalecane przez ISRM. Jedną z takich metod jest metoda „chevron bend”.

Podstawy teoretyczne

Zniszczenie materiału w wyniku pęknięcia jest efektem dostarczenia na tyle dużej energii zewnętrznej, aby przezwyciężyła ona oddziaływanie sił wewnątrz struktury i spowodowała powstanie rozległych powierzchni nieciągłości. W efekcie tego następuje rozpad ciała. Poznanie

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa



Ryc. 1. Schemat obrazujący rozkład naprężeń na brzegu mikroszczeliny (σ_I — rozciąganie, σ_{II} — ścinanie proste, σ_{III} — ścinanie czyste)
Fig. 1. Scheme of stress distribution on the microcrack edge (σ_I — tension, σ_{II} — transverse shear, σ_{III} — longitudinal shear)

krytycznej wielkości tej energii jest istotne dla klasyfikacji właściwości wytrzymałościowych skał i ich podatności na kruche pęknięcie.

Energia zewnętrzna dostarczona do ciała skalnego powoduje powstanie lokalnych pól naprężeń o trzech głównych składowych: σ_I , σ_{II} , σ_{III} w miejscach istniejących osłabień struktury materiału (ryc. 1). Mogą to być inkluzje, kawerny lub inne lokalne niejednorodności ośrodka, np. punkty styku twardych ziaren. Wzrost dostarczanej energii generuje na powierzchni pęknięcia siły rozciągające, a czoło szczeliny przesuwa się w ślad za przemieszczającym się polem koncentracji naprężeń (Pinińska, 1995).

Jeżeli weźmiemy pod uwagę dowolną mikroszczelinę, to składowe te będą przyczyną powstawania następujących procesów: rozciągania, ścinania prostego i ścinania czystego. Gdy dojdzie do przekroczenia krytycznych wartości tych naprężeń nastąpi rozwój szczeliny. Praca jaka jest potrzebna do rozwoju szczeliny o daną powierzchnię może być opisana za pomocą kryterium Irwina jako:

$$\sigma_{\Gamma} = G \cdot \sigma_s$$

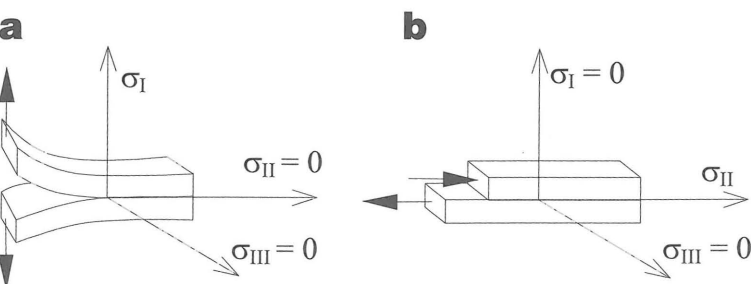
gdzie:

σ_{Γ} — praca zniszczenia potrzebna do wytworzenia powierzchni szczeliny σ_s

G — strumień energii w wierzchołku szczeliny odniesiony do jednostki powierzchni.

Wartość G jest funkcją naprężeń σ_I , σ_{II} , σ_{III} jakie tworzą się wokół brzegu szczeliny i właściwości odkształceniowych materiału skalnego opisanych modułem Younga i współczynnikiem Poissona. Miarą naprężeń są wskaźniki intensywności naprężenia, odpowiednio K_I , K_{II} , K_{III} . Wobec tego można strumień energii zdefiniować jako:

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2$$



Ryc. 2. Schemat mechanizmów powstawania szczelin różnej genezy: a) z rozciągania, b) ze ścinania prostego, c) ze ścinania czystego

Fig. 2. Fracturing modes of fissures: a) tension mode, b) sliding mode, c) shearing mode

gdzie:

ν — współczynnik Poissona

E — moduł Younga

Gdy strumień energii przekroczy wartość krytyczną następuje rozwój szczeliny. Wobec tego wartość tego strumienia (G_c) może zostać określona jako:

$$G_c = \frac{1-\nu^2}{E} (K_{Ic}^2 + K_{IIc}^2) + \frac{1+\nu}{E} K_{IIIc}^2$$

gdzie:

ν — współczynnik Poissona,

E — moduł Younga,

K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} — wskaźniki odporności na kruche pęknięcie, odpowiednio: z rozciągania, ścinania prostego i ścinania czystego

Skoro pęknięcie następuje wtedy gdy zostaje osiągnięta krytyczna wartość energii, to można uznać, że wskaźniki K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} charakteryzują właściwość danego materiału na pęknięcie i można wyznaczyć je doświadczalnie. Określenie jednocześnie tych trzech parametrów jest raczej niemożliwe i dlatego próbuje się tworzyć metody badawcze umożliwiające wyznaczenie ich wartości dla trzech typów szczelin o różnej genezie: z rozciągania, ze ścinania prostego, ze ścinania czystego (ryc. 2; Miħn, 1989).

Badania te polegają na poddaniu próbek skalnych odpowiednim procesom niszczenia: rozciąganiu, ścinaniu prostemu i ścinaniu czystemu. Na podstawie otrzymanych wartości wytrzymałości i dzięki znanym stałym materiałowym można, poprzez zastosowanie odpowiednich formuł, obliczyć wartości K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} .

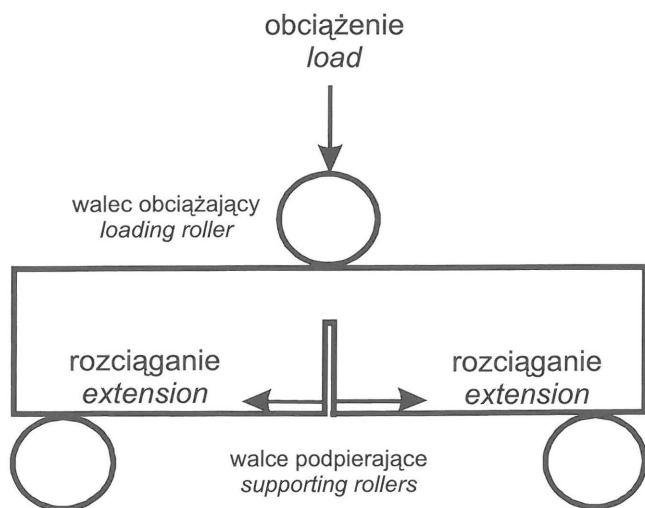
Opis metody

Metoda *chevron bend* polega na zginaniu walcowej próbki z nacięciem inicjalnym w kształcie klina w maszynie wytrzymałościowej (ryc. 3). W trakcie wykonywania testu próbka spoczywa na dwóch stalowych walcach podpierających, a siła wywołująca zginanie jest podawana od góry poprzez walec obciążający znajdujący się dokładnie nad szczeliną inicjalną. Dzięki wzrostowi przykładanego obciążenia następuje propagacja tej szczeliny, co w efekcie prowadzi do zniszczenia badanej próbki wzdłuż jednej powierzchni. Kształt klina w nacięciu inicjalnym generuje relatywnie długi okres stabilnego rozwoju szczeliny, a to daje możliwość kontrolowania całego procesu zniszczenia.

Ze względu na często występującą w skałach anizotropię kierunkową, badania powinny być wykonywane zarówno na próbkach zorientowanych równolegle, jak i prostopadle do stwierdzonych w materiale skalnym powierzchni strukturalnych.

W trakcie badania mierzonych i rejestrowanych jest pięć

parametrów: obciążenie (F), przemieszczenie tłoka (LPD), głębokość propagującej szczeliny w dwóch punktach ($LVDT_1$, $LVDT_2$) oraz szerokość rozwarcia szczeliny ($CMOD$).



Ryc. 3. Schemat ideowy badania metodą *chevron bend*
Fig. 3. *Chevron bend* test idea

Metoda *chevron bend* oferuje dwa rodzaje testów. Pierwszy z nich (Level 1) daje możliwość szybkiego wyznaczenia wartości wskaźnika odporności na kruche pękanie z rozciągania K_{IC}^I (indeks „1” oznacza badanie pierwszego rodzaju) na podstawie zanotowanej wartości maksymalnego, niszczącego obciążenia (F_{max}). Ten rodzaj badania jest więc przydatny dla określenia właściwości materiałowych badanej skały, a otrzymane wartości mogą służyć celom klasyfikacyjnym. Drugi rodzaj badania (Level 2) jest znacznie bardziej skomplikowany i wymaga ciągłych pomiarów i rejestracji wartości obciążenia (F) oraz przemieszczenia tłoka (LPD).

Należy także zaznaczyć, że aby poprawnie wykonać badanie metodą *chevron bend* trzeba zwrócić szczególną uwagę na dokładne zachowanie odpowiednich wymiarów próbki. Przy wykonywaniu obliczeń wartości te mają decydujące znaczenie i w dużym zakresie wpływają na otrzymane wyniki. Warunek ten sprawia, że zarówno próbka jak i zestaw badawczy muszą być bardzo dokładnie przygotowane.

Próbka

Próbka, która ma być poddana badaniu powinna być wykonana według ściśle określonych założeń. Po pierwsze, jak już wcześniej wspomniano, należy mieć na uwadze anizotropię materiału skalnego, wyrażoną np. uławiceniem, powierzchniami nieciągłości itp. W przypadku, gdy taka niejednorodność zostanie stwierdzona należy wykonać co najmniej dwie próbki zorientowane prostopadle i równoległe do kierunku anizotropii, a jeżeli jest to możliwe to nawet trzy zorientowane wzdłuż osi X, Y, Z.

Rozmiary próbki są ściśle określone pewnymi zależnościami. Jej średnica (D) jest uzależniona od wielkości ziaren mineralnych i powinna być co najmniej dziesięciokrotnie większa od wymiarów największego

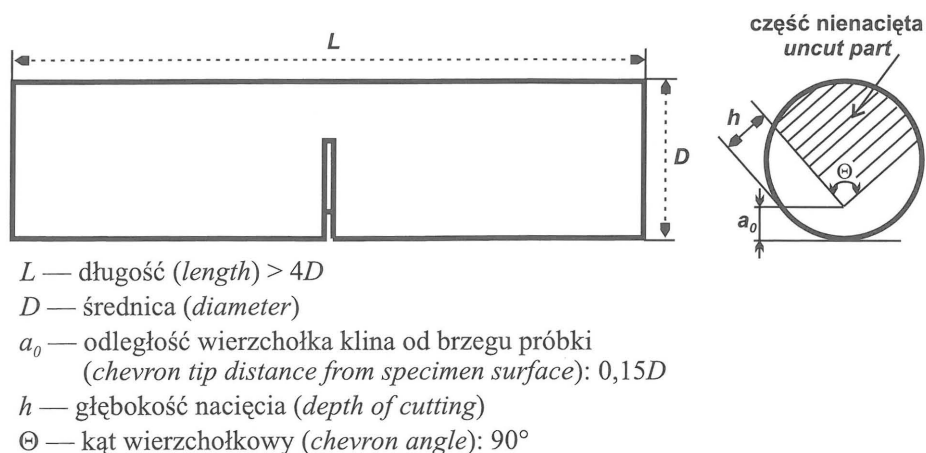
z nich. Z kolei długość (L) powinna być co najmniej 4 razy większa od średnicy. Bardzo istotną rzeczą jest także wykonanie właściwego nacięcia inicjalnego. Musi być ono zorientowane dokładnie prostopadle do osi podłużnej próbki, a jego głębokość (h) musi być tak dobrana aby wierzchołek części nie naciętej (a_0) znajdował się w odległości $0,15 D$ od powierzchni próbki. Szerokość nacięcia nie może być większa niż $0,03 D$, a jeżeli nie jest to możliwe to nie może przekraczać 1 mm. Kąt wewnętrzny wierzchołka (Θ) powinien wynosić 90° (ryc. 4).

W trakcie wykonywania testu badawczego mierzona jest za pomocą ekstensjometru szerokość rozwijającej się szczeliny. Ekstensjometr powinien być zaczepiony do próbki za pomocą dwóch wsporników, wykonanych z metalowych blaszek. Blaszki te należy przykleić do powierzchni próbki po obu stronach nacięcia w odległości około 5 mm.

Stanowisko

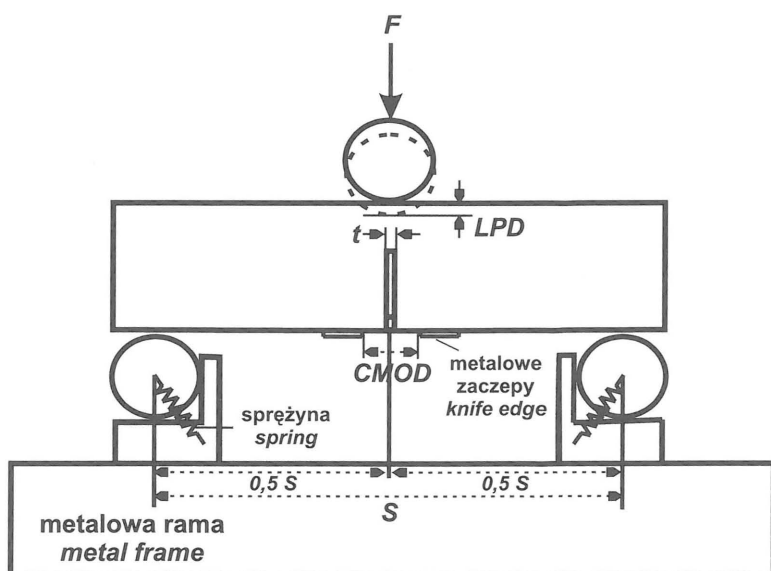
Wyposażenie do badania wskaźnika odporności na kruche pękanie z rozciągania K_{IC} współpracuje z zestawem badawczym MTS-815 amerykańskiej firmy MTS System Corporation przeznaczonym do badań wytrzymałości skał. Zestaw wytrzymałościowy składa się z ramy obciążeniowej, układu zasilania hydraulicznego z serwowzorem, elektronicznego układu sterowania analogowego, układu sterowania komputerowego oraz oprzyrządowania uzupełniającego. Rama obciążeniowa pozwala na zastosowanie maksymalnej siły ściskającej do 2669 kN i rozciągającej do 1335 kN. Jest to konstrukcja o dużej sztywności, przez co zapewnia minimalne gromadzenie się energii w odkształceniach własnych. System sterujący MTS umożliwia ciągłą rejestrację stanu naprężeń i odkształceń oraz pozwala na prowadzenie badań przy różnych prędkościach obciążenia próbki w nawiązaniu do zróżnicowanych zadań badawczych.

Przy wykonywaniu testów zginania maksymalne siły niszczące dochodzą do wartości nie większych niż kilkanaście kN, toteż do pomiarów obciążenia (F) stosuje się czujniki do małych sił o zakresach do 10 lub 50 kN. Dokładność tych czujników nie przekracza 0,1%, a wartość przemieszczenia tłoka (LPD) jest mierzona z dokładnością do 0,5%. Do badania głębokości szczeliny stosuje się dwa indukcyjne czujniki odkształceń ($LVDT_1$ i



Ryc. 4. Rozmiary próbki i parametry nacięcia inicjalnego
Fig. 4. Specimen dimensions and parameters of initial cut

- L — długość (*length*) $> 4D$
- D — średnica (*diameter*)
- a_0 — odległość wierzchołka klina od brzegu próbki (*chevron tip distance from specimen surface*): $0,15D$
- h — głębokość nacięcia (*depth of cutting*)
- Θ — kąt wierzchołkowy (*chevron angle*): 90°



F — obciążenie (load)

LPD — przemieszczenie tłoka (stroke displacement)

t — szerokość szczeliny (notch width): $0,03 D$ lub 1 mm

$CMOD$ — szerokość rozwarcia szczeliny (realitive opening of knife edges)

S — odstęp między walcami podpierającymi (distance between support points): $3,33 D$

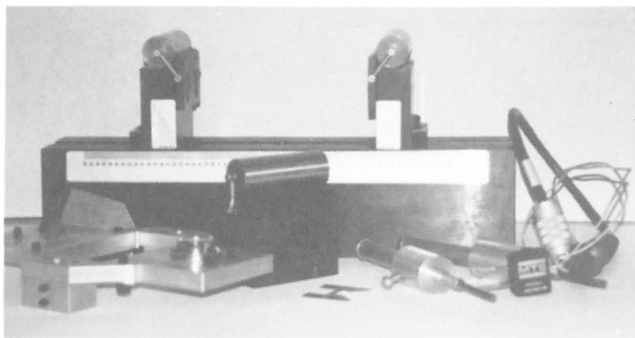
Ryc. 5. Schemat przedstawiający sposób umieszczania próbki w jarzmie
Fig. 5. Diagram of placing the specimen in a yoke

$LVDT_2$). Szerokość rozwarcia szczeliny jest określana dzięki zastosowaniu ekstensjometru firmy MTS.

Elektroniczny układ sterujący umożliwia wykonywanie badań przy zadeklarowanej stałej sile obciążającej lub ze stałą prędkością przemieszczenia tłoka. Zastosowane oprogramowanie umożliwia ciągłą rejestrację wszystkich mierzonych parametrów.

Przebieg badania

W prasie umieszcza się specjalnie skonstruowane jarzmo składające się z kilku elementów (ryc. 5, 6). Pierwszy z nich to metalowa rama, która jest przytwierdzana centralnie do elementu ściskającego maszyny wytrzymałościowej. Są na niej zamontowane dwa walce podpierające, które można przesuwać i ustawiać we właściwej odległości od siebie, wynikającej ze średnicy próbki. Przymocowana



Ryc. 6. Specjalne jarzmo do zamontowania próbki w testach metodą chevron bend

Fig. 6. Special installation of the sample in chevron bend test

do ramy linijka umożliwi dokładne pozycjonowanie walców. Walce podpierające spoczywają na bloczkach i są do nich przytwierdzone za pomocą sprężyn tak, aby miały możliwość obracania się w trakcie wykonywania badania, co umożliwi swobodne przemieszczanie się po nich próbki.

Na walcach podpierających umieszcza się poprawnie przygotowaną próbkę. Ważne jest, aby nacięcie inicjalne znajdowało się dokładnie w połowie odległości między walcami a wierzchołek klina znajdował się w pozycji najniższej. Następnie na próbce umieszcza się specjalny stolik, w którym są zamocowane czujniki mierzące w dwóch miejscach głębokość rozwijającej się szczeliny ($LVDT_1$ i $LVDT_2$; ryc. 7). Stolik ten musi być dokładnie spoziomowany za pomocą zamontowanej na nim poziomicy, a jego położenie jest korygowane śrubami nastawczymi. Punkty podpierające stolik muszą znajdować się dokładnie nad środkami walców podpierających. W szczelinie inicjalnej umieszcza się specjalnego kształtu wskaźnik głębokości szczeliny oparty w dwóch punktach klina. Wskaźnik ten jest przymocowany do stolika za pomocą sprężystych gumek i w trakcie badania podnosi się do góry, w ślad za rozwojem szczeliny. Na końcach wskaźnika oparte są czujniki mierzące głębokość rozwijającej się szczeliny ($LVDT_1$ i $LVDT_2$). Obecność

dwóch czujników jest konieczna za względu na to, że próbka w trakcie badania obraca się wokół własnej osi, wobec czego należy uwzględnić różne przemieszczenia punktów oparcia wskaźnika, a całkowita wielkość propagacji szczeliny jest wartością średnią. W stoliku znajduje się otwór umożliwiający przemieszczanie się walca obciążającego, na sztywno zamocowanego do górnej części elementu ściskającego maszyny wytrzymałościowej i przylegającego do próbki dokładnie nad szczeliną.

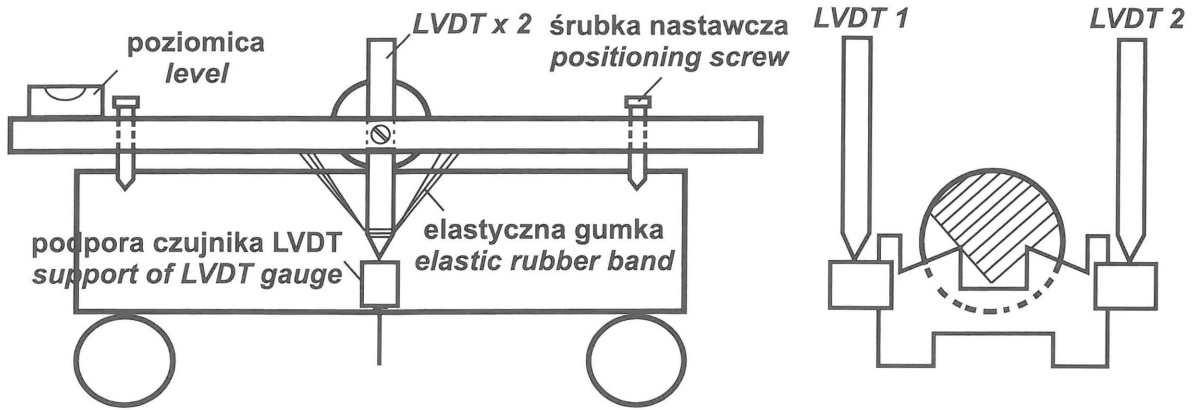
Do wsporników przyklejonych po obu stronach nacięcia inicjalnego zamocowany jest ekstensjometr mierzący szerokość rozwarcia szczeliny ($CMOD$).

Przygotowaną do badania maszynę wytrzymałościową z zamontowanym jarzmem i z umieszczoną w nim próbką przedstawiono na ryc. 8.

Badanie

Przed przystąpieniem do wykonywania testu należy skalibrować wszystkie czujniki pomiarowe. Wskazane jest, żeby każdy z nich miał nastawione elektryczne zero.

Badanie pierwszego rodzaju (Level 1) jest przeprowadzane pod kontrolą obciążenia. Prędkość przyrostu obciążenia powinna być dobrana tak, żeby średni wskaźnik intensywności naprężenia w trakcie badania nie był mniejszy niż $0,25 \text{ MPa m}^{1/2} / \text{sec}$. Jeśli nie jest możliwe określenie tej wartości można przyjąć, że badanie będzie wykonane poprawnie jeśli zniszczenie materiału nastąpi wcześniej niż po 10 sekundach od przyłożenia obciążenia. Badanie trwa do momentu, kiedy próbka ulegnie rozszczepieniu na dwie części. Przy wykonywaniu badania pierwszego rodzaju nie ma potrzeby ciągłej rejestracji danych, ponieważ do obliczenia wartości K_{IC}^I wystarczająca jest znajomość maksymalnej siły niszczącej (F_{max}).



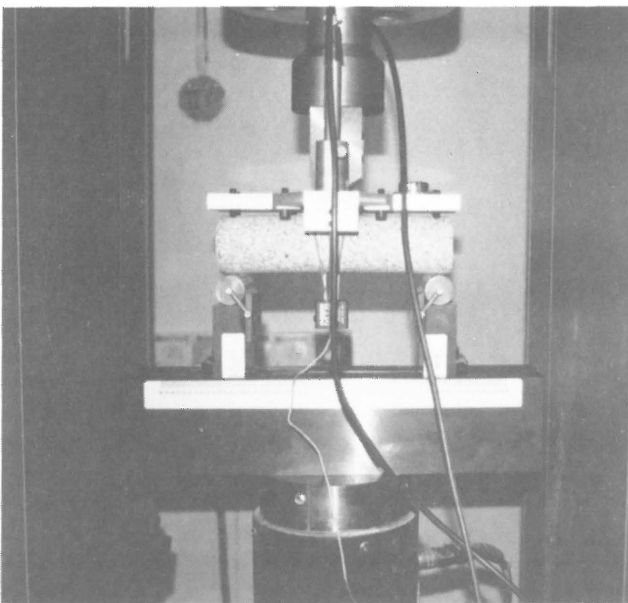
Ryc. 7. Schemat obrazujący montowanie stolika i wskaźnika głębokości szczeliny
Fig. 7. Diagram of assembling of a table and the indicator of the crew's depth

Przy wykonywaniu testów drugiego rodzaju (Level 2) istotne jest, aby prędkość propagacji szczeliny była większa niż 1 mm/s. Takie tempo rozwoju szczeliny wystąpi wtedy, gdy prędkość przesuwu tłoka (LPD) lub prędkość poszerzania szczeliny ($CMOD$), wyrażona w m/s, będzie większa od wartości wyliczonej na podstawie wzoru:

$$LPD \text{ lub } CMOD > 0,006 \cdot \frac{K_{IC}^1}{E \cdot \sqrt{D}}$$

gdzie: K_{IC}^1 — wskaźnik odporności na kruche pękanie z rozciągania wyliczony na podstawie F_{max}
 E — moduł Younga,
 D — średnica próbki.

Jak widać do określenia tej wartości niezbędne jest poznanie wielkości wskaźnika K_{IC}^1 otrzymanego w wyniku wcześniej wykonanego na tym samym materiale skalnym badania pierwszego rodzaju. Deklarowana prędkość przemieszczenia (LPD lub $CMOD$) jest rzędu kilku tysięcznych części milimetra na sekundę.



Ryc. 8. Stanowisko badawcze do testów metodą *chevron bend* zestawione w Zakładzie Geomechaniki UW

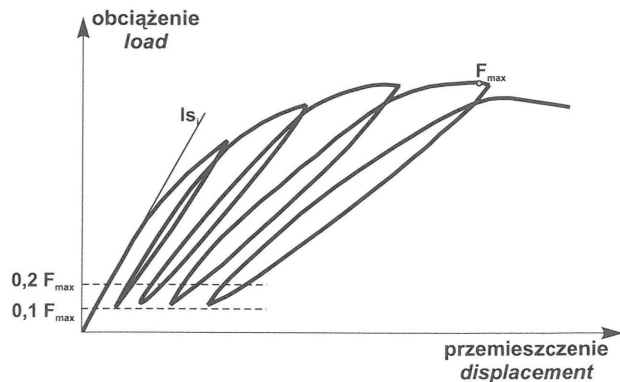
Ryc. 8. *Chevron bend* tests installation set in Zakład Geomechaniki UW

W trakcie badania powinny wystąpić co najmniej 4 cykle odciążenie-obciążenie, przy czym przynajmniej jeden z nich powinien powstać także po osiągnięciu maksymalnej wartości obciążenia (F_{max} ; ryc. 9). Należy dążyć do tego, aby cykle te były w miarę równomiernie rozmieszczone wzdłuż krzywej obciążenie–przemieszczenie. Przejście z etapu odciążania w etap wzrostu obciążenia w poszczególnych cyklach powinno nastąpić wtedy, gdy wartość obciążenia znajdzie się w granicach 10–20% wartości maksymalnego obciążenia. Należy także zwrócić uwagę na początkowe ułożenie krzywej obciążenie–przemieszczenie. Wskazane jest, aby tangens kąta nachylenia odcinka stycznego do krzywej i przechodzącego przez początek układu (s_i) zawierał się w przedziale 0,7–1,5, przy czym zalecane jest, aby wartość ta zbliżała się do górnej granicy przedziału. Warunek ten powinien być spełniony w celu zagwarantowania właściwej ewolucji krzywej obciążenie–przemieszczenie. Rejestracja danych powinna być prowadzona po przekroczeniu maksymalnego obciążenia, do momentu, gdy przemieszczenie jest co najmniej 1,5 razy większe niż w punkcie maksymalnego obciążenia. Badanie powinno zostać powtórzone, gdy odchylenie szczeliny od symetrii płaszczyzny zdefiniowanej przez początkowe nacięcie jest większe niż 0,05 D w zakresie 0,3 D od jego wierzchołka.

Podsumowanie

Badania wskaźnika odporności na kruche pękanie z rozciągania K_{IC} zajmują dużo czasu i są pracochłonne. Bez względu na zastosowaną metodę zawsze trzeba pamiętać o dokładnym wykonaniu próbki i precyzyjnym zestawieniu aparatury badawczej. Zachowanie właściwych rozmiarów poszczególnych elementów jest istotne ze względu na to, że mają one bezpośredni wpływ na wynik końcowy testu. Należy także zaznaczyć, że niezbędne jest dysponowanie odpowiednim sprzętem. Badania drugiego rodzaju (Level, 2) muszą być wcześniej zaprojektowane, tak aby była dobrana odpowiednia prędkość przyrostu szczeliny. Wymusza to zastosowanie maszyny wytrzymałościowej umożliwiającej deklarowanie różnych prędkości przyrostu obciążenia. Ponadto wymagane jest, aby w trakcie badania była możliwa ciągła rejestracja mierzonych parametrów.

Niemniej jednak wydaje się konieczne, aby w laboratoriach geomechanicznych przeprowadzano tego rodzaju badania w celu uzupełnienia informacji o cechach wytrzymałościowych i odkształceniowych skał. Tradycyjne



Ryc. 9. Wyidealizowana krzywa obciążenie-przemieszczenie
Fig. 9. Idealized load-displacement curve

metody badań, chodzi tu przede wszystkim o ściskanie jednoosiowe, nie dostarczają pełnej informacji o odporności materiału skalnego na kruche pęknięcie. Trzeba bowiem pamiętać, że efektem takiego procesu niszczenia są często różnego rodzaju katastrofy, które zdarzają się w praktyce inżynierskiej. Poznanie zjawiska kruchego pęknięcia i określenie maksymalnej wielkości energii jaka może być dostarczona do materiału skalnego będzie bez wątpienia przydatne w realizacji różnych zadań z zakresu geologii inżynierskiej. Należy zwrócić tutaj szczególną uwagę na procesy zachodzące podczas podziemnej eksploatacji kopalni. Wokół wyrobisk górniczych tworzą się nowe spę-

kania co wpływa negatywnie na pierwotną równowagę górotworu. Może to być często przyczyną gwałtownych tąpnięć, którym towarzyszy wyzwolenie dużej ilości energii sprężystej zgromadzonej w skale. Także przy eksploatacji materiału skalnego w kamieniołomie, gdzie za pomocą materiałów wybuchowych uzyskuje się nowe powierzchnie spękań, poznanie zjawiska kruchego pęknięcia ma istotne znaczenie. Ponadto w górnictwie naftowym, gdzie stosuje się szczelinowanie, znajomość wskaźnika odporności na kruche pęknięcie skał zbiornikowych jest jednym z podstawowych warunków jego poprawnego wykonania.

Literatura

- GRIFFITH A.A. 1920 — Phenomenon of rupture and flow of solids. Trans. Roy. Soc. London. A, 221: 163–168
- GUSTKIEWICZ J. 1997 — Co to jest kruche pęknięcie? XX Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Szklarska Poręba.
- ISRM 1988 — Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 25: 71–96.
- MINH V. C. 1989 — Energy analysis of deformation and failure of rocks. Rozprawa habilitacyjna. Uniw. Warsz. Warszawa.
- OUCHTERLONY F. 1989 — Fracture toughness testing of rock with core based specimens, the development of an ISRM standard. Fracture Toughness and Fracture Energy. Test methods for concrete and rock. Balkema. Rotterdam: 231–251.
- PINIŃSKA J. 1995 — Procesy kruchego pęknięcia w skałach osadowych przy jednoosiowym ścisnieniu ze stałą prędkością odkształcenia. Prz. Geol., 43: 546–553.