

Jerzy Cieślak, Jacek Jakubowski*, Antoni Tajduś**

ZMIANY OSIOWEJ SZTYWNOŚCI I ROZWÓJ USZKODZENIA PRÓBEK PIASKOWCA W TEŚCIE KONWENCJONALNEGO TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA**

1. Wprowadzenie

W referacie zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych, w których analizowano zmiany osiowej sztywności próbek piaskowca Wustenzeller poddanego konwencjonalnemu trójosiowemu ściskaniu. Sztywność skał poddanych mechanicznemu obciążeniu praktycznie w całym przedziale oddziaływania obciążenia ulega ciągłym zmianom. Zjawisko to jest efektem oddziaływania istniejących pierwotnie w skałach oraz nowo powstałych porów, spękań i szczelin. Opisem zjawisk powstawania i propagacji szczelin w ujęciu ciągłym, na poziomie reprezentatywnej objętości, zajmuje się kontynuualna mechanika uszkodzeń, ang. Continuum Damage Mechanics, w skrócie CDM [7, 9], a za miarę rozwoju uszkodzenia przyjmuje się zmianę sztywności ośrodka.

W prezentowanej pracy, na podstawie przeprowadzonych jedno i trójosiowych testów wytrzymałościowych, analizie poddano zmiany modułu sprężystości podłużnej, badane na różnych etapach obciążenia próbek, przy różnych ciśnieniach okólnych. Na podstawie badań dla analizowanych ciśnień wyznaczono warunek zapoczątkowania procesu uszkodzenia, który przedstawiono w płaszczyźnie południkowej przestrzeni naprężeń. Wyniki badań obrazują charakter dwóch różnych procesów zniszczenia, rozwoju spękań skutkującego degradacją sztywności (uszkodzenie), szczególnie widoczne w warunkach zbliżonych do jednoosiowego ściskania oraz przy wyższych ciśnieniach okólnych, coraz większego udziału efektów związanych z plastycznym płynięciem.

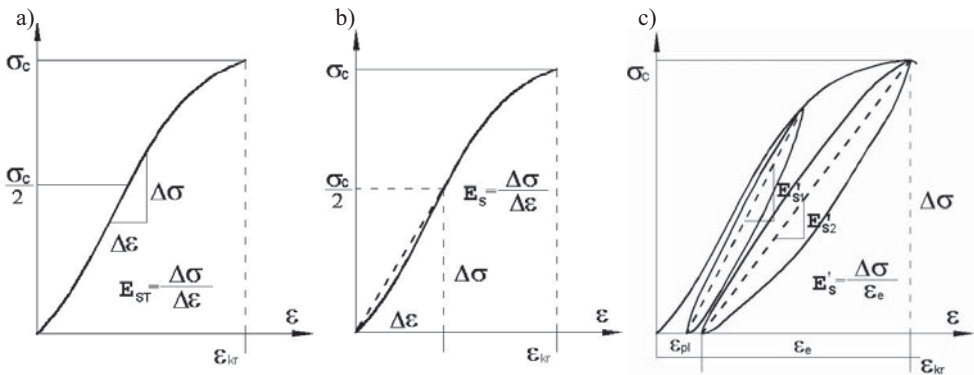
* Katedra Geomechaniki Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Praca powstała w ramach badań własnych o numerze 10.10.100.301

2. Miara osiowej sztywności próbek w próbie jedno- i trójosiowego ściskania

Zmiana sztywności skał w procesie mechanicznego obciążenia (ściskania) jest efektem nakładania się na siebie dwóch zjawisk. Z jednej strony sztywność wzrasta na skutek zamykania się istniejących pierwotnie w skale porów i szczelin, z drugiej zaś maleje na skutek zarodkowania i propagacji nowych szczelin. Zjawisko to znane jest od lat i może być obserwowane na charakterystyce σ - ε . Wyznaczone progi obciążenia odpowiadające zamykaniu się spękań w skałach, początkowi stabilnej i niestabilnej propagacji, w badaniach jednoosiowych jak i trójosiowych, zostały zaprezentowane w wielu pracach np. [1– 3, 5, 6]. Dodatkowe zjawiska będące efektem występowania w skałach spękań można obserwować również na pętli obciążenie–odciążenie, występującej w trakcie odciążania skał [3, 4]. Na tej podstawie można przyjąć, iż skały zachowują się jak typowy ośrodek z uszkodzeniami, w którym na skutek mechanicznych obciążeń uszkodzenie to ulega rozwojowi.

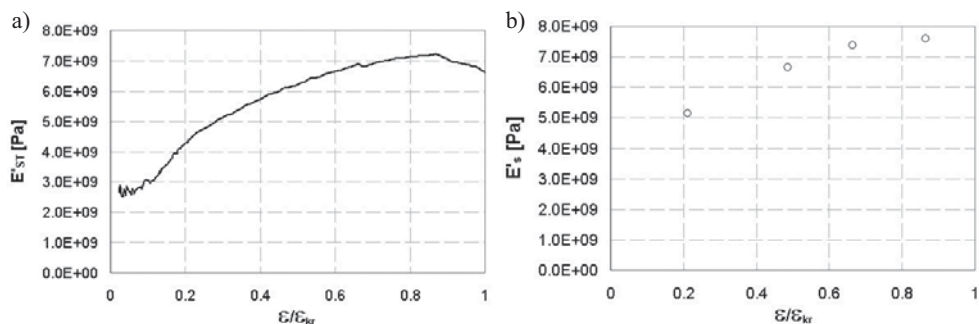
Sztywność badanych próbek piaskowca, na kierunku obciążenia (osiowym) określa moduł sprężystości podłużnej, wyznaczony na podstawie charakterystyki $\sigma_1 = f(\varepsilon_1)$, a dla testów w osiowo symetrycznym stanie naprężenia, gdzie $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ z charakterystyki $\sigma_1 - \sigma_3 = f(\varepsilon_1)$. Moduł ten można definiować w różny sposób np. jako moduł styczny E_{ST} określony dla naprężenia odpowiadającego 50% wytrzymałości skały (rys. 1a), sieczny E_s w przedziale od 0 do naprężenia odpowiadającego 50% wytrzymałości skały (rys. 1b), średni z prostoliniowego odcinka charakterystyki dotyczącej obciążenia próbkę.



Rys. 1. Różne definicje modułu sprężystości podłużnej (a i b wg zalecenISRM [10])

Z punktu widzenia analizy zmian osiowej sztywności w trakcie obciążania próbki odpowiedni wydaje się być moduł styczny wyznaczony lokalnie na małym przyroście osiowego naprężenia E'_{ST} (średnia ruchoma z niewielkiego przedziału) lub sieczny uzyskany z części charakterystyki z odciążenia próbki E'_s (rys. 1c). Obie te miary określają lokalną wartość modułu sprężystości podłużnej (rys. 2), przy czym wartość modułu stycznego będzie zawsze mniejsza niż modułu wyznaczonego z odciążenia, ze względu na odkształcenia niesprężyste towarzyszące procesowi obciążenia. W referacie również ze względu na analizę obejmującą

pokrytyczny zakres obciążenia próbek przyjęto miarę sprężystości podłużnej wyznaczoną z ścieżki odciążenia.



Rys. 2. Wykresy zmienności stycznego E'_{ST} , oraz siecznego z odciążenia E'_s modułu sprężystości podłużnej, wyznaczone w warunkach jednoosiowego ściskania piaskowca

3. Badania próbek piaskowca w warunkach jednoosiowego i konwencjonalnego trójosiowego ściskania

Piaskowiec Wustenzeller jest skałą osadową o strukturze średnio i drobno–ziarnistej i spoiwie krzemionkowo–żelazisto ilastym (tabela 1). Badania próbek piaskowca przeprowadzono w warunkach osiowosymetrycznego stanu naprężenia. Obciążenia tego typu zrealizowano za pomocą komory do badań trójosiowych firmy MTS typu 656.11 i maszyny wytrzymałościowej z sztywną ramą typu MTS 315 [8].

TABELA 1
Gęstość i porowatość piaskowca Wustenzeller

gęstość objętościowa	2260 [kg/m ³]
gęstość właściwa	2650 [kg/m ³]
porowatość	0,14

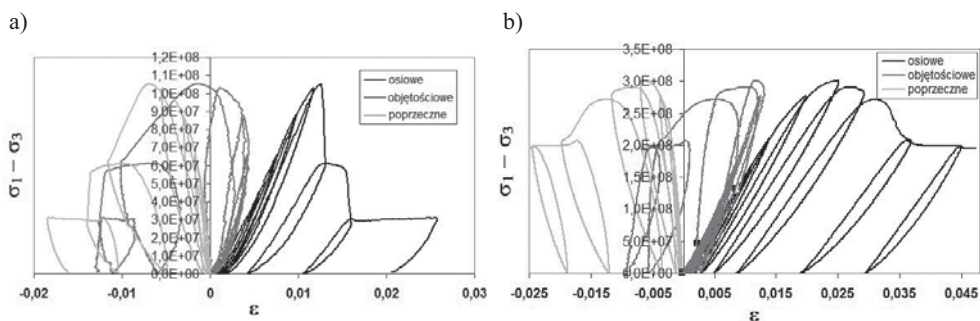
Pomiar siły osiowej dokonywany był za pomocą przetwornika siły zainstalowanego wewnątrz komory ciśnieniowej, przemieszczenia zaś mierzono ekstensometrami. Przemieszczenia radialne wyznaczano przez pomiar zmian obwodu próbki, łańcuszkiem opasanym wokół niej, osiowe na zewnątrz komory, dokonując pomiaru przemieszczenia tłoka komory trójosiowej.

Procedura badawcza stosowana dla piaskowców składała się z kilku kroków. Na wstępie, po zainstalowaniu próbki w komorze trójosiowej i wypełnieniu jej olejem mineralnym zadawano ciśnienie okólne działające na próbkę ze wszystkich stron, do żądanej wartości (5, 10, 20, 40, 70 MPa). Następnie zwiększano siłę osiową działającą na tłok komory, po czym na danym poziomie obciążenia osiowego redukowano ją prawie do zera (zwykle 6–10 cykli obciążeń osiowych). Przebadano 9 walcowych próbek piaskowca o wymiarach $h = 70$

i $d = 35$ mm, po dwie dla obciążenia jednoosiowego i ciśnień okólnych 20 i 40 MPa, oraz po jednej dla ciśnień 5, 10 i 70 MPa. Badania przeprowadzono w temperaturze i wilgotności pokojowej, a prędkość odkształcenia próbek we wszystkich doświadczeniach wynosiła $1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

4. Analiza wyników badań wytrzymałościowych

Zniszczenie badanego piaskowca w całym analizowanym przedziale ciśnień okólnych miało kruchy charakter (nawet dla ciśnienia okólnego 70 MPa). Świadczy o tym charakter wykresu $(\sigma_1 - \sigma_3) = f(\varepsilon_1)$, rysunek 3 oraz wartości odkształceń na granicy wytrzymałości próbek (tabela 2).



Rys. 3. Charakterystyka naprężenie różnicowe odkształcenie osiowe, poprzeczne i objętościowe uzyskane dla ciśnień okólnych $p = 5$ (a) i $p = 70$ [MPa] (b)

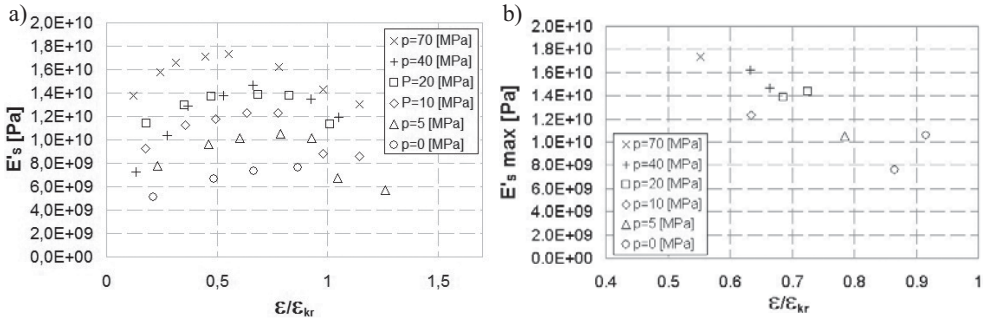
TABELA 2

Wartości osiowych odkształceń na granicy wytrzymałości próbek piaskowca

p [MPa]	0	5	10	20	40	70
ε_{kr}	0,0094 0,0101	0,0126	0,0146	0,0162 0,0164	0,022 0,019	0,025

Odształcenia krytyczne próbek piaskowca nie przekraczały wartości 0,025, przy dużych spadkach naprężeń różnicowych w części pokrytycznej. Dla testów jednoosiowych maksymalną wartość modułu sprężystości uzyskano w granicach 0,8–0,9 σ_c . Im większa wartość ciśnienia okólnego, tym próg zapoczątkowania procesu rozwoju uszkodzenia (redukcji sztywności) obniżał się (rys. 4).

Wy tłumaczenie tego zjawiska wydaje się leżeć w pierwotnych spękaniach i porach piaskowca, i zamykaniu się ich na skutek coraz większego ciśnienia okólnego. Przy coraz większych ciśnieniach okólnych początkowa sztywność próbek była coraz większa, a dalsze jej zmiany następowały w głównej mierze na skutek rozwoju spękań. Przyjęta miara sztywności nie opisuje więc tylko rozwoju spękań. Wynika stąd dość istotny wniosek, iż analiza rozwoju uszkodzenia dla badanego piaskowca przez określenie zmian



Rys. 4. Zmiany wartości modułu sprężystości podłużnej piaskowców na różnym etapie obciążenia dla wybranych próbek (a) oraz maksymalne wartości modułu sprężystości uzyskane dla poszczególnych ciśnień okólnych (b)

modułu sprężystości podłużnej nie jest precyzyjna i jednoznaczna, gdyż rejestrowane zmiany sztywności opisują dwa przeciwstawne zjawiska — zaciskanie porów i pierwotnych spękań, powodujące umocnienie, oraz rozwój nowych spękań, powodujących osłabienie struktury skały. Jedynie w skałach o małej porowatości i pierwotnie mało spękanymi wyznaczone zmiany modułu sprężystości będą głównie opisywały powstawanie i rozwój spękań.

5. Zmienna uszkodzenia zdefiniowana na podstawie zmian sztywności na kierunku osiowym próbek

W CDM zmianę sztywności ośrodka na skutek uszkodzenia opisuje się tzw. zmienną uszkodzenia, która w najprostszym przypadku opisuje izotropowy rozwój uszkodzeń i jest wtedy skalarną miarą uszkodzenia¹. Uszkodzenie może być badane za pomocą zmiany sztywności badanych próbek (miara cech mechanicznych — modułu sprężystości, lub miara geometryczna — analiza przestrzennego układu spękań), ale również przez zmianę prędkości przebiegu fal sprężystych, zmianę oporności elektrycznej, gęstości [7]. Zmienna uszkodzenia zdefiniowana na podstawie zmian modułu sprężystości podłużnej, wyznaczona według hipotezy równoważności odkształceń [7, 9] ma następującą postać:

dla

$$\tilde{\varepsilon}^e = \varepsilon^e \quad (1)$$

uzyskuje się

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (2)$$

1 Z doświadczeń laboratoryjnych wynika, że uszkodzenie materiałów z reguły ma charakter kierunkowy i nie jest izotropowe

oraz

$$\tilde{\sigma} = \frac{E}{\tilde{E}} \sigma \quad (3)$$

gdzie:

- D — zmienna uszkodzenia,
- $\tilde{\sigma}$ — naprężenie efektywne,
- σ — naprężenie Cauchy'ego (tzw. prawdziwe naprężenie),
- E — moduł sprężystości podłużnej ośrodka nieuszkodzonego,
- \tilde{E} — moduł sprężystości podłużnej materiału uszkodzonego,
- $\tilde{\varepsilon}^e$ — odkształcenie ośrodka pseudo nieuszkodzonego,
- ε^e — odkształcenie ośrodka uszkodzonego.

Według koncepcji Chaboche'a (1977) [9], naprężenie efektywne $\tilde{\sigma}$ to takie, które musiałoby być przyłożone do elementu materiału pseudo-nieuszkodzonego, aby deformował się on w taki sam sposób jak element materiału uszkodzonego $\tilde{\varepsilon}^e = \varepsilon^e$, poddanego działaniu naprężenia σ .

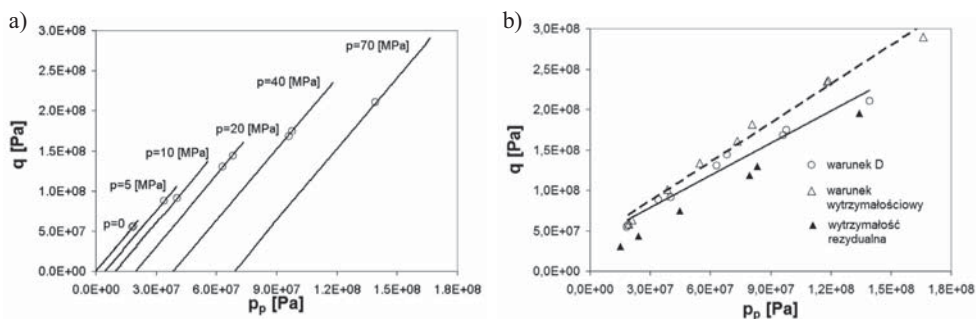
W CDM zakłada się, że wartość zmiennej uszkodzenia $D = 0$ oznacza brak uszkodzeń, zaś $D = 1$ całkowite zniszczenie ośrodka (w praktyce do tego nigdy nie dochodzi). Dla warunków testu jednoosiowego i trójosiowego ściskania, jako warunek zapoczątkowania procesu rozwoju uszkodzeń przyjęto sytuację, w której moduł sprężystości podłużnej E'_s przyjmował wartość największą E'_{smax} (rys. 4b), tak więc:

$$D = 1 - \frac{E'_s}{E'_{smax}} \quad (4)$$

Dalsze etapy obciążania próbek i zmiana (spadek) wartości modułów sprężystości (wzrost wartości zmiennej uszkodzenia) opisywał rozwój uszkodzeń. Na rysunku 5 w płaszczyźnie południkowej naprężeń, w układzie $p_p - q$, zaznaczono punkty, które odpowiadają warunkowi $D = 0$, czyli $E'_s = E'_{smax}$ (początek bezwzględnej redukcji sztywności) Dla wszystkich przyjętych ciśnień okólnych uzyskane punkty naniesiono na realizowane w badaniach ścieżki naprężeń (rys. 5a).

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad \text{oraz} \quad p_p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (5)$$

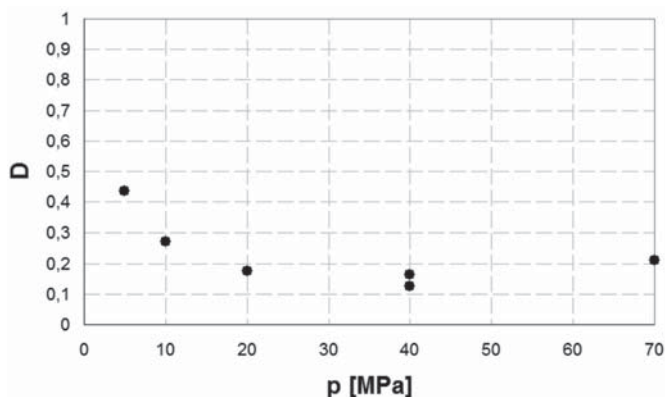
Wyznaczone punkty $D = 0$ naniesione na poszczególne ścieżki naprężeń (rys. 5a) definiują warunek zapoczątkowania procesu uszkodzenia (rys. 5b, linia ciągła), na tle warunku wytrzymałościowego (linia przerywana). W analizowanym przedziale ciśnień okólnych oba warunki, z dobrą dokładnością mogą być przyjęte jako liniowe. Jak można zauważyć przy obciążeniach jednoosiowych, bądź małych wartościach ciśnienia okólnego ($p = 0$, $p = 5$, $p = 10$ MPa), warunek zapoczątkowania procesu uszkodzenia (początek bezwzględnej redukcji sztywności) prawie pokrywa się z warunkiem wytrzymałościowym, co sugeruje, iż



Rys. 5. Warunek bezwzględnej redukcji sztywności na poszczególnych ścieżkach naprężeń (a) oraz na tle warunku wytrzymałościowego i wytrzymałości rezydualnej (b)

zniszczenie nastąpiło bezpośrednio po uruchomieniu tego procesu i wystąpiło głównie na jego skutek. W przypadku większych ciśnień okólnych 20, 40 i 70 MPa, rozwój spękań (uszkodzenia) pojawia się na wcześniejszym etapie obciążenia i wyraźnie widać, iż zapoczątkowanie procesu degradacji sztywności nie jest bezpośrednią przyczyną zniszczenia, a jedynie towarzyszy temu zjawisku (jest jego częścią).

Wartości zmiennej uszkodzenia D uzyskane dla wytrzymałości rezydualnej dla wszystkich stosowanych ciśnień okólnych przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wartość zmiennej uszkodzenia D uzyskana dla różnej wartości ciśnień okólnych

Ze względu na brak wyników w zakresie pokrytycznym dla testów jednoosiowych, wartości zmiennej D dla tych testów na rysunku 6 nie naniesiono. Ze względu na charakter pozostałych wyników należy jednak przypuszczać, iż zmienna D dla $p = 0$ może się mieścić przedziale od $D = 0,6$ do $D = 0,8$ ($D = 1$ nigdy nie jest osiągnięta). Najmniejszą wartość zmiennej uszkodzenia, przy wytrzymałości rezydualnej próbek, uzyskano dla $p = 40$ MPa, jednak można przyjąć, iż od wartości ciśnienia okólnego $p = 20$ MPa, zmienna ta stabilizuje się na poziomie ok. $D = 0,2$.

6. Podsumowanie i wnioski

W prezentowanej pracy, na podstawie przeprowadzonych jedno i trójosiowych testów wytrzymałościowych, analizie poddano zmiany modułu sprężystości podłużnej, jako miary zmian sztywności badanego piaskowca. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie warunku zapoczątkowania procesu uszkodzenia, który przedstawiono w płaszczyźnie południkowej przestrzeni naprężeń. Wyniki badań obrazują charakter dwóch odmiennych procesów zniszczenia, w których, w pierwszym przypadku dominuje rozwój spękań skutkujący degradacją sztywności, wyraźnie widoczny w warunkach jednoosiowego i zbliżonych do jednoosiowego ściskania. W tym przypadku rozwój uszkodzenia wydaje się być główną przyczyną zniszczenia próbek. Przy wyższych ciśnieniach okólnych, poczynając już od $p = 20$ MPa zmieniająca się w procesie obciążenia sztywność osiowa próbek piaskowca, na etapie wytrzymałości rezydualnej, stabilizuje się na pewnym poziomie (zmienna uszkodzenia $D = 0,2$) i obrazuje zmiany zachodzące głównie w strefie ścinania. Zniszczeniu zaś towarzyszą efekty związane z plastycznym płynięciem.

LITERATURA

- [1] *Bieniawski Z.T.*: Mechanism of Brittle Fracture of Rock. Parts I, II, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 4, 1967
- [2] *Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., Read R.S.*: Identifying Crack Initiation and Propagation Thresholds in Brittle Rock. Can. Geotech. J., 35, 1998, pp. 222–223
- [3] *Gustkiewicz J.*: Właściwości fizyczne wybranych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Praca zbiorowa pod redakcją naukową Jerzego Gustkiewicza. Wydawnictwo PAN IGSMiE, Kraków, 1999
- [4] *Jaeger J.C., Cook N.G.*: Fundamentals of rock mechanics. Methuen & Co Ltd, 1969
- [5] *Kwaśniewski M.*: Dylatacja jako zwiastun zniszczenia skały. Cz. 1 Fizykalna istota zjawiska dylatacji. Przegląd Górniczy, 42, 1986, s. 42–49
- [6] *Kwaśniewski M.*: Dylatacja jako zwiastun zniszczenia skały, Cz. 2 Mechanizm zjawisk poprzedzających zniszczenie, Przegląd Górniczy, 42, 1986, s. 184–190
- [7] *Lemaitre J.*: A Course of Damage Mechanics, Springer, 1992
- [8] MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems, MTS System Corporation, http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev_002698.pdf
- [9] *Skrzypek J.*: Podstawy Mechaniki Uszkodzeń. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2006
- [10] *Ulusay R., Hudson J.A.*: The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization Testing and Monitoring 1974–2006. Editors R. Ulusay & J.A. Hudson. Kozan Ofset Matbaacilik San. ve Tic. Sti, 2007