

(13) 低温下における岩石の破壊じん性試験

清水建設研究所 正会員○石塚与志雄
日比 一喜
正会員 木下 直人

1. はじめに

筆者らは、LPG、LNGなどの低温液化燃料の岩盤内貯蔵（低温常圧方式）の安定性を調べることを目的とした低温熱応力による岩石の破壊実験、および、岩盤空洞発破掘削の際の発破孔形状の効果を確認することを目的とした実験を行ってきた。その結果、両者とも円孔周辺の破壊現象は円孔面からのき裂発生・進展という形態をとり、き裂発生・成長を評価するための解析方法としては先なき裂での応力拡大係数解析が有効であることが分かった。しかし、低温での破壊じん性値（ K_{Ic} ）が未知のため、定量的なき裂発生評価解析を行うことができなかった。また、これらの実験では、岩石のき裂発生・進展を検知する目的でAE測定を実施し破壊き裂の位置評定をする事はできたが、模型実験のため、AEと岩石のき裂発生・進展との関係を明らかにするまでには到らなかった。そのため、今回、室温～低温での岩石の破壊じん性値、き裂発生・進展とAEの関係を把握する事を目的として破壊じん性試験（3点曲げ試験）を実施した。

2. 試験概要

2.1 試験片 岩石は低温熱応力による岩石の破壊実験で使用した稲田花崗岩A、B（AとBは採取場所が異なる）と発破孔形状の効果確認実験に使用した渡良瀬花崗岩の3種類の花崗岩を用いた。試験片形状はASTM E-399に準拠した3点曲げ試験用の形状とし、つぎの2種類を採った。

①寸 法：S=240mm， W=60mm， B=30mm

き裂形状：予め幅1mmのスリットをダイヤモンドソーで28～29mm切削し、1～2回繰返し載荷によって得られる天然き裂

②寸 法：S=180mm， W=45mm， B=22.5mm

き裂形状：幅1mmのスリットを18～19mm切削後、先端に幅0.1mmのスリットを2mm程度切削する人工き裂

ここで、S：荷重スパン， W：試験片幅， B：試験片厚さ

2.2 試験条件 試験条件は、表1に示すように、稲田花崗岩については温度を室温から低温（-10、-40、-60、-80℃の4段階）まで、含水状態を自然乾燥状態と含水飽和状態の2条件、渡良瀬花崗岩については室温での自然乾燥状態で3方向の異方性（岩目）を考慮した。ここで、自然乾燥状態とは室温で長期間放置したもの、含水飽和状態とは、真空デシケータ中で3日間脱気しながら含水させたものをいう。

2.3 試験方法 図1は室温下、図2は低温下での試験方法である。載荷はき裂開口変位の速度一定（0.004mm/min）条件の変位制御で実施した。所定の温度までの冷却は、液体窒素を用いて、-10℃までは15℃/hr、それ以下は、-30

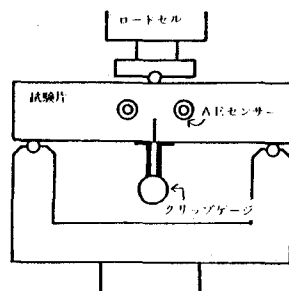


図1 室温下での試験

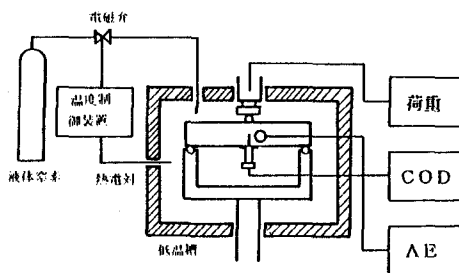


図2 低温下での試験

表1 試験条件

岩石	寸法 (mm)	室温	低温 (-10～-80℃)
稲田花崗岩A	S=240 W= 60 B= 30	・自然乾燥状態 ・含水飽和状態	(実施せず)
稲田花崗岩B	S=180 W= 45 B= 22.5	・自然乾燥状態 ・含水飽和状態	・自然乾燥状態 ・含水飽和状態
渡良瀬花崗岩	S=240 W= 60 B= 30	・自然乾燥状態で岩目 を考慮して3方向	(実施せず)

℃/hrの冷却速度で行った。試験片数は各試験条件で5個以上とした。なお、含水飽和試験片は水分の蒸発を防ぐため薄膜ポリエチレンシートで被覆した。低温時の初期き裂部分の凍結を防ぐため、その部分をコーティング剤で充填した。試験中は、荷重 P 、き裂開口変位 COD、温度および AE を計測した。

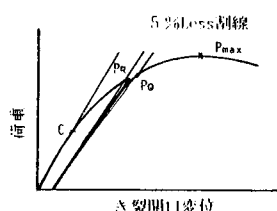
AE 計測には、2種類のセンサー（PAC社のR15 共振周波数 150KHz、ENDEVCO社のModel213E 共振周波数60KHz）を用いた。天然き裂は、最大荷重の約80%を載荷することにより作製した。また、 AE とき裂進展の関係を調べるために、載荷－除荷繰返し試験も実施した。

3. 試験結果および考察

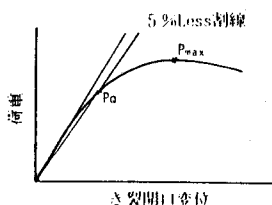
3.1 破壊じん性値の評価方法

図 5.7に室温、自然乾燥試験片の P -COD 曲線および AE 測定結果を示す。図 5では天然き裂挿入のために行った繰返し載荷部分の曲線は除く。ASTM基準では、図 3のように初期接線の95%勾配の直線（5%Less割線）と曲線との交点から得られる荷重 P_Q と天然き裂 a_1 から破壊じん性値 K_Q を計算するように定めている。しかし、岩石では非線形性が著しく、基準 $P_{max}/P_Q \leq 1.1$ を満足することは少ない。 a_1 については、金属材料と異なり破壊き裂と繰返しによるき裂とをストレッチゾーンで区別することができず、測定が難しい。それゆえ、今回はつぎのように破壊じん性値を評価した。

荷重の増加に伴い P -COD 関係は図 3に示すように非線形性を示し、最大荷重点以前にき裂の安定成長が生じているものと考え、き裂進展抵抗力を R 、き裂進展力を g とすると、 R 曲線はき裂長 a の関数として図 4(b)のようになる。 g は K_{Ic} と同様、 P と a の関数として、 P の増加に伴って大きくなる。点 A では $d/da (g - R) < 0$ で、き裂は成長するものの、エネルギー的には安定平衡状態にある。 g 曲線が R 曲線と接する点 B で試験片の不安定破壊となり、この点は、図 3の P -COD 曲線では最大荷重点に対応する。 K_Q は図 3では P_Q 、図 4では $g(a_0, P_Q)$ に対応する。つぎに天然き裂試験片では図 10のように繰返し載荷によりき裂が入り、 a と g 、 R の関係は図 4(a)のようになる。ここで、 a_c は不安定破壊時のき裂長である。今回の K_{Ic} の評価は、荷重を最大荷重、き裂長を天然き裂試験片については a_1 、人工き裂試験片については初期

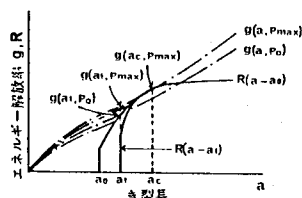


(a) 天然き裂試験片

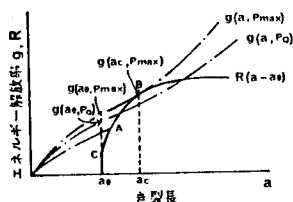


(b) 人工き裂試験片

図 3 荷重－き裂開口変位関係



(a) 天然き裂試験片



(b) 人工き裂試験片

図 4 き裂長と g 、 R の関係

き裂長 a_0 として、線形破壊力学により計算した。これらの K_{Ic} は、それぞれ図 4(a)の $g(a_1, P_{max})$ 、図 4(b)の $g(a_0, P_{max})$ に対応する。 a_1 は、 P -COD 曲線で 2 回目の初期

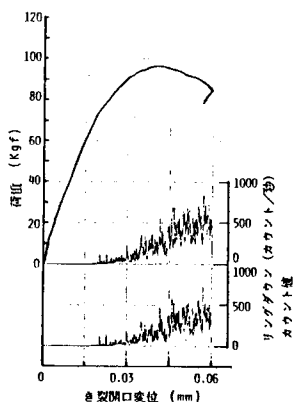


図 5 稲田 A (室温、乾燥)

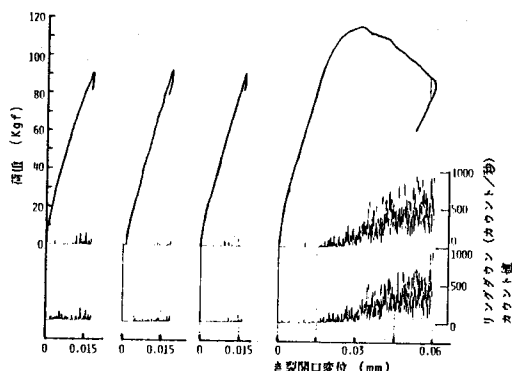


図 6 渡良瀬方向①、繰返し載荷

接線傾きがき裂長の増加によって、1回目よりも減少する(図3(a))ことから評価した。具体的には、き裂先端に特異要素を用いた有限要素解析によりき裂長と初期接線傾きの関係(図11)を求め、1回目と最後のP-COD曲線の初期接線傾きの差から増加き裂長を評価した。上記のようにして求めた室温での破壊じん性値 K_{Ic} 、 K_{Ic} と圧裂引張強度 σ_t を表2に示す。室温下では、含水状態での破壊じん性値は自然乾燥状態よりも小さくなる。一方、渡良瀬花崗岩の異方性に対する破壊じん性値の差は認められたものの、圧裂引張強度との間には図12に示すように相関は認められなかった。

3.2 き裂進展とAEの関係 P-COD曲線とAEリングダウンカウン트의発生率を比較する(図5)と、AEの発生時点は2種類のセンサー間の差はほとんど認められなかった。AE発生時点はいずれもP-COD曲線が非線形を示し始める変曲点に対応し、AE発生点が安定的なき裂成長開始に対応していることを示している。AE発生以後は、非線形に対応して発生率が増加する。数回繰返し载荷-除荷試験結果は図6に示すように、最初の载荷では、载荷直後からAEが発生するが、2回目以降は大幅に減少し、カイザー効果が確認された。これは、図10に示すように1回目の载荷により形成された破壊き裂 Δa が、2回、3回目の载荷では成長していないことに対応するものと考えられる。これに対して、m値(1AE事象内での振幅ピーク値の試験開始からの累積頻度分布の傾き)は、図7に示すようにAE発生開始から増加し始め、最大荷重点に到る前にピークを示し、その後は一定値となる。この現象は、安定き裂発生時には小振幅AEと大振幅AEがとも発生し、安定き裂成長時には小振幅AEが多く発生するためにAE発生開始からm値が増加し、その後、巨視的な破壊き裂の発生・成長に伴って大振幅AEが多く発生するためm値はピーク後急激に低下するものと解釈できる。そのため、m値が最大となり、その後急激に低下する点が試験片を不安定にするき裂の発生点と考えることができる。

低温でのAE測定では、岩石粒子、氷の線膨張係数の違いにより载荷によるき裂以外のAEが発生するため、リングダウンカウン트의発生率からき裂発生開始を評価することは難しくなった。これに対して、各試験ともm値のピークは観測された。これは、巨視的なき裂発生時には

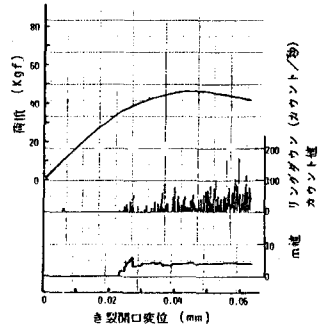


図7 稲田B (室温, 乾燥)

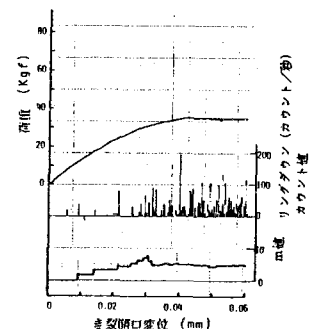


図8 稲田B (低温, 乾燥) -10°C

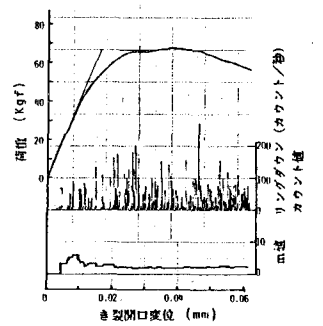


図9 稲田B (低温, 含水) -40°C

表2 室温での破壊じん性値と引張強度

岩石	試験条件	K_{Ic} (kgf/mm ^{3/2})	$K_{Ic(max)}$ (kgf/mm ^{3/2})	σ_t (kgf/cm ²)
稲田A	乾燥	3.002 (0.210)	3.470 (0.179)	68.6 (5.12)
稲田A	含水	2.945 (0.265)	3.253 (0.203)	—
稲田B	乾燥	—	2.987 (0.201)	82.5 (8.02)
渡良瀬	乾燥, 方向①	3.603 (0.248)	3.956 (0.232)	91.7 (9.28)
渡良瀬	乾燥, 方向②	3.953 (0.153)	3.840 (0.139)	86.4 (7.52)
渡良瀬	乾燥, 方向③	3.912 (0.187)	4.325 (0.219)	74.3 (10.67)

() 内標準偏差

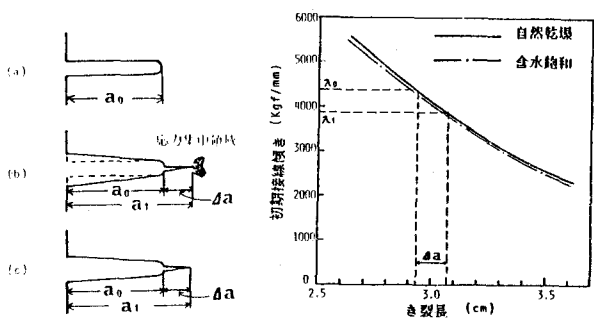


図10 载荷によるき裂の形成 図11 き裂長と初期接線傾き

線膨張係数の違いにより生じるAEよりも大振幅のAEが発生するためと考えられ、低温でのき裂発生を評価するパラメータとしてはリングダウンカウント発生率よりもm値の方が妥当と考える。

3.3 低温での破壊じん性値 低温での代表的な試験結果を図8.9に、P-COD 曲線から求められた K_{Ic} を表3.4に示す。なお、他の力学的物性との比較のために、一軸圧縮強度 σ_c 、圧裂引張強度 σ_t 、ぜい性度 σ_c/σ_t を付記する。また、図13は K_{Ic} の温度依存性をグラフにしたものである。 K_{Ic} は自然乾燥試験片の -10°C での値が室温より小さくなるが、これ以外の温度範囲では温度の低下に伴い増大し、含水飽和試験片の方が自然乾燥試験片よりも強い温度依存性を示す。この傾向は圧裂引張強度の特性と類似で、岩石中の間げき水が凍結し、粒子間で膠着物質と同じ作用をするためと考えられる。

4. 結論

今回の試験方法によりき裂の安定成長開始と不安定成長開始間の破壊じん性値を評価できる。試験結果としては、破壊じん性値の温度依存性が著しいことを明らかにし、き裂の発生・成長とAE（リングダウンカウントの発生率、m値）との関係を把握した。今回の試験の問題としては、破壊き裂長を測定できなかったため、安定成長開始、不安定成長開始に対する破壊じん性値が評価できなかったこと、非線形挙動する岩石に線形破壊力学を基礎としたASTM E-399を適用したことなどがある。そのため、き裂長長の測定方法の開発、弾塑性破壊じん性試験（例えば、 J_{Ic} 試験）の岩石への適用が必要になると考える。

謝 辞

この研究を遂行するにあたり御指導、御協力を頂いた通産省工業技術院公害資源研究所、厨川道雄氏、松永烈氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木下・石塚・日比：第14回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.181～185 (1982)
- 2) 石塚・嶋田・小林・石内：土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp.453～454 (1982)

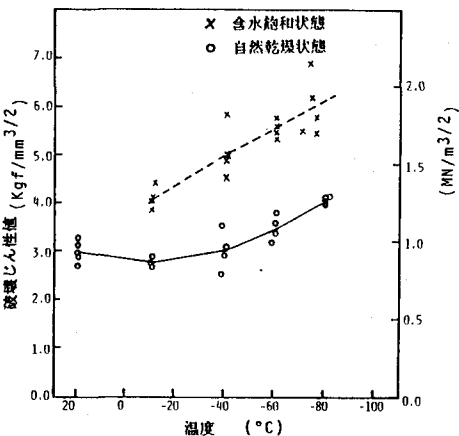


図13 温度と破壊じん性値の関係

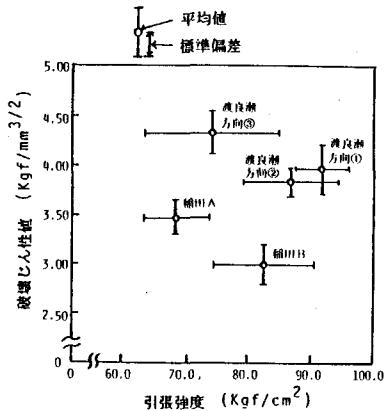


図12 破壊じん性値と引張強度

表3 低温での破壊じん性値 (自然乾燥)

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$K_{Ic}(\text{max})$ ($\text{Kg f/mm}^{3/2}$)	σ_c (Kg f/cm^2)	σ_t (Kg f/cm^2)	ぜい性度
20	2.987 (0.201)	1970 (94)	86.1 (16.0)	22.9
-10	2.778 (0.068)	1880 (212)	78.9 (17.1)	23.8
-40	3.021 (0.362)	2090 (109)	92.8 (13.1)	22.5
-60	3.457 (0.249)	—	—	—
-70	—	2280 (176)	90.7 (9.6)	25.1
-80	4.055 (0.050)	—	—	—
-100	—	2300 (109)	92.9 (11.5)	24.8

() 内標準偏差

表4 低温での破壊じん性値 (含水飽和)

温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$K_{Ic}(\text{max})$ ($\text{Kg f/mm}^{3/2}$)	σ_c (Kg f/cm^2)	σ_t (Kg f/cm^2)	ぜい性度
20	—	1300 (81)	61.4 (5.4)	21.2
-10	4.101 (0.122)	1360 (34)	82.1 (6.9)	16.6
-40	5.065 (0.435)	1580 (108)	102.0 (2.7)	15.5
-60	5.565 (0.150)	—	—	—
-70	—	1840 (88)	114.9 (11.8)	16.0
-80	5.979 (0.538)	—	—	—
-100	—	1950 (124)	124.4 (8.8)	15.7

(13) Fracture Toughness Test of Rocks Under Low Temperature

by Yoshio ISHIZUKA

Kazuki HIBI

Naoto KINOSHITA

The Research Institute of
Shimizu Construction Co., Ltd.

ABSTRACT

This paper describes the fracture toughness (K_{IC}) of rocks as a function of a temperature and the relationship between the fracture crack and acoustic emission (AE) events.

Inada granites and Watarase granites have been used for the fracture toughness test, the three points bending test in accordance with ASTM standards. Inada granites have been tested in a dried state and in a saturated state in the temperature range from room temperature to -80°C . As for Watarase granites, specimens collected in the different three directions have been tested in the room temperature to examine the anisotropy of K_{IC} . During testing, applied load, crack opening displacement and AE have been measured.

The findings are summarized below:

- (1) As the temperature is lowered the fracture toughness of rocks increases. Especially, marked temperature dependence of the fracture toughness is caused for saturated specimens. This result appears to be explained in terms of change from water to ice in rocks.
- (2) With regard to the relationship between fracture crack and AE, the initiation of stable fracture crack coincides the initiation of AE ringdown-count and the initiation of unstable fracture crack propagation corresponds with the point which m -value decreases from the peak point suddenly.