周辺環境の変化を考慮した岩石のサブクリティカルき裂進展に基づく 長期強度の評価

奈良 禎太* 大江 悠真** 村田 澄彦*
石田 毅* 金子 勝比古***, ****

Evaluation of Long-Term Strength of Rock with Considering Changes of Surrounding Environment Based on Subcritical Crack Growth

by

Yoshitaka NARA*, Yuma OE**, Sumihiko MURATA*,
Tsuyoshi ISHIDA* and Katsuhiko KANEKO***, ****

It is important to evaluate the long-term stability of rock materials for the purpose of ensuring the long-term integrity of structures in a rock mass. In this study, we showed an evaluation method of the long-term strength of rock considering the change of the surrounding environmental conditions. It was shown that the long-term strength of rock decreased remarkably when the environmental condition changed from air to water condition and from low temperature to high temperature condition. This is due to the acceleration of subcritical crack growth in rock, because the relationship between the crack velocity and the stress intensity factor for subcritical crack growth is dependent on the temperature and existence of water. It is also recognized that the values of long-term strength of rock are affected significantly by the highest temperature and water if the rock can be surrounded by water. It is concluded that the long-term strength of rock under water environment with high temperature is important for ensuring the long-term integrity of structures in a rock mass.

Key words:

Long-term strength, Time-to-failure, Rock, Subcritical crack growth, Temperature, Water

1 緒 言

岩石の長期強度を評価することは、岩盤構造物の長期安定性を確保する上で極めて重要である。長期強度を評価するためには、岩石の変形・破壊挙動の時間依存性に関する情報が必要である。特に、き裂進展の時間依存性の代表的なものとして挙げられるサブクリティカルき裂進展に関する情報は、長期強度を評価する上で重要であり、これまで多くの研究が行われてきた^{1)~3)}。

サブクリティカルき裂進展は、外力のみならず、周辺環境にも影響を受けることがこれまでの研究で明らかになっている。花崗岩、安山岩、玄武岩、砂岩等の岩石においては、大気中よりも水中でき裂進展速度が高くなることが示されている^{4)~6)}。また、花崗岩、安山岩、砂岩において、相対湿度の増加に伴いき裂進展速度が増加することが明らかになっている^{6)~7)}。さらに安山岩を用いた試験により、大気および水中環境下の双方において、温度の増加に伴いき裂進展速度が増加することが明らかになっている⁷⁾。最近では、温度が高い環境下や、湿度が高い環境下および水中にある火成岩において、サブクリティカルき裂進展に対する抵抗性を示す「サブクリティカ

ルき裂進展指数」が低くなり、外力が低い場合に周辺環境がき裂進展速度上昇により強く影響することが示されている⁸⁾。このように、岩石のサブクリティカルき裂進展は、温度や水の影響を受けることが明らかになっている。

なお、サブクリティカルき裂進展の測定結果を基に、岩石の長期強度を評価することができる^{8),9)}。これまで行われてきた岩石の長期強度評価は、周辺環境が一定であることを条件として行われてきた。しかしながら、放射性廃棄物処分のような長期にわたる工学プロジェクトを考える場合、岩盤がさらされる周辺環境の変化を避けることは不可能である。したがって、岩石の長期強度を評価する上では、周辺環境の変化を考慮することは極めて重要であると考えられる。しかしながら、周辺環境の変化を考慮した長期強度評価はまだ行われていない。

そこで本研究では、大気および水中環境下において測定した岩石のサブクリティカルき裂進展の結果を基にして、岩石の長期強度を評価した。特に、周辺環境が変化する場合の長期強度の評価法を示し、長期強度を評価することにより、岩石がさらされる周辺環境条件の変化が長期強度に及ぼす影響について調べた。

† 原稿受理 平成25年6月24日 Received June 24, 2013

©2014 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 京都大学 大学院工学研究科 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Graduate School of Eng., Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540

** 京都大学 大学院工学研究科 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂, Graduate School of Eng., Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540

*** 正 会 員 北海道大学 大学院工学研究院 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目, Faculty of Eng., Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo, 060-8628

**** 正 会 員 幌延地圏環境研究所 〒098-3221 北海道天塩郡幌延町, Horonobe Research Institute for the Subsurface Environment, Teshio-gun, Hokkaido, 098-3221

2 長期強度の評価方法

2.1 長期強度の評価式

サブクリティカルき裂進展とは、き裂先端の応力拡大係数が破壊じん性に満たないレベルで起こる緩やかなき裂進展現象であり、き裂進展速度 da/dt と応力拡大係数 K_I の関係は次のように表わされる¹⁰⁾。

$$\frac{da}{dt} = AK_I^n \quad (1)$$

ここで、 A と n は定数である。特に n はサブクリティカルき裂進展指数と呼ばれている^{1),2)}。本研究では、 A と n をまとめてサブクリティカルき裂進展パラメータと呼ぶ。

単一き裂を含む平面に無限遠から一様な一定応力 σ が作用するとき、き裂長 a と応力拡大係数 K_I の関係は次のように表される。

$$K_I = \sigma(\pi a)^{1/2} \quad (2)$$

き裂長 a が無限大に発散したときに材料が破断したとみなし、その破断に至る時間を求め、そのとき作用していた応力を長期強度とする。このとき、長期強度は次の式で表される⁹⁾。

$$S(x) = \left\{ \frac{1}{3.15 \times 10^7 x} \frac{2}{(n-2)\pi A} \right\}^{1/n} \left(\frac{K_{IC}}{S_t} \right)^{(2-n)/n} \quad (3)$$

ここで、 x は破断時間（材料が破断するときの時間（年））、 $S(x)$ は長期強度である。 K_{IC} は破壊靱性、 S_t は引張強度であり、この両者には、 $K_{IC} = S_t(\pi a_0)^{1/2}$ の関係が成り立つ。

$\{t | t_{k-1} \leq t \leq t_k\}$ で表される区間 k (k は自然数) において、環境条件は一定で、 $t = t_{k-1}, t_k$ で周辺環境が変化すると仮定すると、区間 k では式(1)より、次式が成り立つ。

$$\frac{da}{d\tau} = A_k K_I^{n_k} \quad (\tau = t - t_{k-1}) \quad (4)$$

ここで、 A_k と n_k は、区間 k の環境条件により決定される。式(4)と式(2)より、次式が得られる。

$$\frac{da}{d\tau} = \pi^{n_k/2} A_k \sigma^{n_k} a^{n_k/2} \quad (5)$$

式(5)の一般解は、積分定数を c_k とすると、次式となる。

$$\frac{1}{1-n_k/2} a^{1-n_k/2} = \pi^{n_k/2} A_k \sigma^{n_k} \tau + c_k \quad (6)$$

初期条件は、次のように与えられる。

$$a = a(t_{k-1}) \quad (\because \tau = 0) \quad (7)$$

ここで、 $a(t_{k-1})$ は $t = t_{k-1}$ におけるき裂長であり、 $a(t_0) = a_0$ である。 a_0 は式(2)により与えられる初期き裂長である。式(6)及び式(7)より、次式が得られる。

$$a^{(2-n_k)/2} = \frac{2-n_k}{2} \pi^{n_k/2} A_k \sigma^{n_k} \tau + (a(t_{k-1}))^{(2-n_k)/2} \quad (8)$$

$\tau = t - t_{k-1}$ より、式(8)は次のように変形できる。

$$+ \frac{2}{(n_k-2)\pi^{n_k/2} A_k} \frac{(a(t_{k-1}))^{(2-n_k)/2}}{\sigma^{n_k}} \left\{ 1 - \left(\frac{a}{a(t_{k-1})} \right)^{(2-n_k)/2} \right\} \quad (9)$$

岩石では $n_k > 2$ が一般に成り立つため¹⁾、き裂長 a が発散する時間 $t_{k\infty}$ は次のようになる。

$$t_{k\infty} = t_{k-1} + \frac{2}{(n_k-2)\pi^{n_k/2} A_k} \frac{(a(t_{k-1}))^{(2-n_k)/2}}{\sigma^{n_k}} \quad (10)$$

式(8)または式(9)は、 $t = t_{k-1}$ において、周辺環境が変化した後、き裂長 a と時間 t の関係を表している。区間 k におけるき裂進展には、環境の変化後にき裂進展が加速し、区間 k 内でき裂長 a が発散する場合と、区間 k 内ではき裂長 a は発散せず、き裂が安定的に伸長する場合の2通りの場合が考えられる。前者の場合、時間 $t_{k\infty}$ が区間 k の範囲内 ($t_{k-1} \leq t_{k\infty} \leq t_k$) にあれば、その時間が破断時間 t_f に相当する。一定作用応力下で、 x_{k-1} 年 ($3.15 \times 10^7 x_{k-1}$ 秒) において周辺環境が変化し、 x 年後に材料が破断に至るとすると、作用応力は x 年強度 $S(x)$ と定義できる。ゆえに、式(10)から次式が得られる。

$$x = x_{k-1} + \frac{1}{3.15 \times 10^7} \frac{2}{(n_k-2)\pi^{n_k/2} A_k} \frac{(a(x_{k-1}))^{(2-n_k)/2}}{(S(x))^{n_k}} \quad (11)$$

一方、後者の場合、つまり $x_k \leq x_{k\infty}$ のとき、式(8)より、区間 k の終了時間 x_k でのき裂長 $a(x_k)$ は次のようになる。

$$a(x_k) = \left\{ 3.15 \times 10^7 \times \frac{2-n_k}{2} \pi^{n_k/2} \times A_k \sigma^{n_k} (x_k - x_{k-1}) + (a(x_{k-1}))^{(2-n_k)/2} \right\}^{2/(2-n_k)} \quad (12)$$

このき裂長 $a(x_k)$ を用いて、次の区間の計算を同様の方法で行う。この一連の操作より、周辺環境が変化する場合の長期強度を評価することができる。なお、区間 k が最終区間の場合、 $x_k = \infty$ となる。よって、それ以前の区間においてき裂長 a が発散しない場合、最終区間で発散する。

2.2 岩石試料

本研究では、熊本安山岩と大島花崗岩において長期強度を評価した。熊本安山岩は、斜長石が 50~60%、角閃石および輝石が 2~3%、その他はガラス質の石基で構成されており、空隙率は約 7% である¹¹⁾。この岩石は等方的であり、複数の方向で測定した P 波速度はいずれも 4.8km/s であった。大島花崗岩の造岩鉱物は、石英が 36%、斜長石が 37%、カリ長石が 22%、黒雲母が 4%、角閃石が 1% 以下である¹²⁾。また、鉱物粒子の平均粒径は 1mm 程度である。大島花崗岩には先在微視き裂の選択的配向性に起因した異方性が認められ、異方性の主軸に沿った方向の P 波速度は、速度の高い順に、4.9km/s、4.6km/s、4.5km/s である¹³⁾。Nara and Kaneko¹³⁾では、これらの方向はそれぞれ軸 1、軸 2、軸 3 方向と呼ばれ、これらの軸に垂直な面はそれぞれ面 1、面 2、面 3 と呼ばれている。面 1、面 2、面 3 はそれぞれ、採石場にて「しわ」「二番」「目」と呼ばれる面に相当する。大島花崗岩においては、面 3 に沿ってき裂進展が生じる場合の長期強度を評価した。

Table 1 に、大気中で求めた熊本安山岩および大島花崗岩の破壊じん性値と引張強度を示す。破壊じん性値は変位速度 0.23mm/s の定変位速度ダブルトーション試験^{14),15)}により、引張強度は載荷方向のひずみ速度を $10^{-5}s^{-1}$ とした圧裂試験¹⁶⁾により求めた。

Table 1 Fracture toughness and tensile strength of rock samples.

Rocks	Fracture toughness [MN/m ^{3/2}]	Brazilian tensile strength [MPa]
Kumamoto andesite	2.10	9.5
Oshima granite (fracturing parallel to plane-3)	2.15	6.14

2.3 計算条件

岩石のサブクリティカルき裂進展が温度上昇^{7), 9)}と水の存在^{4), 5), 8)}により著しく促進されることが知られている。そのため、岩石の長期強度の評価においては温度と水の影響を考慮することが極めて重要と考えられる。

水の影響は、周辺環境が大気環境下から水中環境下へ変化することを考慮することによって調べた。さらに、周辺環境が大気から水中環境下へ変化した後、再び水中から大気環境下へ変化するということを繰り返した場合の長期強度も評価した。これらは、岩石を人為的に乾燥状態に保つことによって、破壊時間 (time-to failure) がどの程度増加するかを調べるために行うものである。

また、温度変化が与える影響は、岩石のさらされる環境が低温から高温へ変化する場合を考えることによって調べた。これは、岩石の温度を人為的に低温に保つことによって、破壊時間がどの程度増加するかを調べることを目的としている。また、岩石が季節変化による温度の変化を長期間繰り返し受けた場合についても調べた。このとき、最低温度を冬に観測される温度である 273K(0℃)、最高温度を夏の温度に相当する 313K(40℃)とし、273K~313K の間を温度が 1 年周期の正弦関数で変化するという条件で評価を行った。また、温度が変化する期間を離散化し、Fig. 1 のように階段関数で近似した。温度変化の時間間隔は 0.1 年とした。この条件で長期強度を評価するためには、任意の温度でのサブクリティカルき裂進展パラメータが必要である。Nara et al.⁸⁾によって得られた熊本安山岩と大島花崗岩でのサブクリティカルき裂進展パラメータと温度との関係を Fig. 2 に示す。Fig. 2 中の 2 点を通る直線の式は、次のようになる。

Fig. 1 Schematic diagram of temporal change of temperature.

Fig. 2 Relationship between subcritical crack growth parameters and temperature. (a) n for Kumamoto andesite, (b) $\log A$ for Kumamoto andesite, (c) n for Oshima granite fracturing parallel to plane-3, (d) $\log A$ for Oshima granite fracturing parallel to plane-3.

Fig. 3 Relationship between normalized long-term strength and time-to-failure when surrounding environment changes from air to water. (a) Kumamoto andesite, (b) Oshima granite fracturing parallel to plane-3.

$$\left. \begin{array}{l} n = -0.25T + 127 \\ \log A = 0.060T - 32.3 \end{array} \right\} \text{ (大気中の熊本安山岩) } \quad (13)$$

$$\left. \begin{array}{l} n = -0.26T + 112 \\ \log A = 0.033T - 16.9 \end{array} \right\} \text{ (水中の熊本安山岩) } \quad (14)$$

$$\left. \begin{array}{l} n = -0.24T + 120 \\ \log A = 0.084T - 39.0 \end{array} \right\} \text{ (大気中の大島花崗岩) } \quad (15)$$

$$\left. \begin{array}{l} n = -0.40T + 168 \\ \log A = 0.080T - 35.5 \end{array} \right\} \text{ (水中の大島花崗岩) } \quad (16)$$

なお、上式に示されている関係は、定変位ダブルトーション試験によって求められたものである。特に、水中でのサブクリティカルき裂進展パラメータは、蒸留水で飽和された条件の定変位ダブルトーション試験で得られたものをを用いた。よって、水中環境下における長期強度は、岩盤構造物が淡水系の地下水面以下に存在している状況を想定したものである。

また、Fig. 2 中に示されている温度、相対湿度、pH の値は、ダブルトーション試験装置が設置されている恒温室内で測定したものであり、それぞれ恒温室内の温度と相対湿度を一定に保った条件下で、別途用意した温湿度計や pH 計で記録した値を示している。

Fig. 4 Relationship between normalized long-term strength and time-to-failure under change of environment from air to water every 1 day or 1 year. (a) Kumamoto andesite, (b) Oshima granite fracturing parallel to plane-3.

3 結 果

Fig. 3 に、温度一定で周辺環境が大気から水中に変化する場合の長期強度の評価結果を示す。長期強度は Table 1 に示した引張強度の値で正規化している。また、環境を大気中に保つ時間として、1 年と 100 年の 2 つを考慮した。さらに Fig. 3 では、周辺環境が変化せず、材料が破断に至るまで水中に保たれた場合の結果も示す。Fig. 3 より、周辺環境が 1 年後に大気から水中に変化する場合、岩石の長期強度はその後低下し、数年後には水中一定環境下での長期強度にほぼ一致するという結果が得られた。また、100 年後に変化する時も同様に、数百年後には水中一定環境下での長期強度にほぼ一致するという結果になる。これより、大気から水中へ周辺環境が変化した後の長期強度は、急激に低下した後、水中一定環境下での長期強度に収束するといえる。

次に、周辺環境が大気から水中へ変化した後、水中から大気へ変化するという、乾湿を繰り返した場合を考慮して長期強度を評価した。その結果を Fig. 4 に示す。乾湿繰り返しの時間間隔としては、短時間で乾湿を繰り返す場合と長期間一定に保つ場合を比較するために、1 日と 1 年の 2 通りを考えた。また、Fig. 4 においても、長期強度

の値を Table 1 の引張強度の値で正規化した。さらに、周辺環境が変化せず、材料が破断に至るまで水中に保たれた場合の結果も示す。Fig. 4 より、1 日ごとに变化する場合の長期強度は、時間によらず水中一定環境下での長期強度にほぼ一致する。1 年ごとに变化する場合でも、1 年後には水中一定環境下での長期強度にほぼ一致するという結果が得られた。これより、乾湿をそれぞれ同じ時間間隔で繰り返した場合の長期強度は、水中一定環境下での長期強度にほぼ一致するように低下することがわかる。

続いて、温度上昇が及ぼす影響を調べる。Fig. 5 と Fig. 6 にそれぞれ、大気中および水中環境下で温度が上昇する場合の長期強度評価結果を示す。ここでは、1 年後と 100 年後に温度が上昇する場合の 2 通りの結果を示している。また、周辺環境が変化せず、材料が破断に至るまで高い温度環境に保たれた場合の結果も示す。図より、大気中と水中ともに、1 年後に温度が上昇する場合、岩石の長期強度はその後低下し、数年後には、高い温度で一定に保たれた場合での長期強度にほぼ一致することが示された。また、100 年後に温度上昇する時も、数百年後には高温一定環境下での長期強度にほぼ一致することがわかる。

Fig. 5 Relationship between normalized long-term strength and time-to-failure in air under change of temperature and constant high temperature condition. (a) Kumamoto andesite, (b) Oshima granite fracturing parallel to plane-3.

また、岩石が季節による温度変化を受けることを想定し、大気中と水中で温度が冬の温度 273K(0°C)から夏の温度 313K(40°C)の間を 1 年周期で変化する場合の結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。温度が 273K または 313K に保たれた場合の結果も示す。これらの図より、273K~313K を周期的に変化する場合の長期強度は、温度が 313K に保たれた場合に比べて高い値を示すものの、その差は 273K に保たれた場合に比べて非常に小さい。よって、温度が連続的に変化する場合の長期強度は、その過程における最高温度に保たれた場合に近い値へ低下するといえる。

以上の評価結果から、水と温度上昇が、岩石の長期強度の低下に大きく影響するといえる。特に、周辺環境が変化することを考慮して長期強度を評価した場合でも、周辺環境が水中で、予想される最高の温度で保たれる場合の長期強度の値に近いものとなることが示された。

4 考 察

周辺環境条件が変化する場合を考えると、岩石が水中環境にさらされる可能性がある場合は、水中環境下での長期強度を想定するべきであると考えられる。さらに、予想される最高到達温度での長期強度を考えた上で、岩石や岩盤構造物の寿命を考えるべきといえる。

Fig. 6 Relationship between normalized long-term strength and time-to-failure in water under change of temperature and constant high temperature condition. (a) Kumamoto andesite, (b) Oshima granite fracturing parallel to plane-3.

Fig. 7 Relationship between normalized long-term strength and time-to-failure in air at a constant temperature and with changing temperature. (a) Kumamoto andesite, (b) Oshima granite fracturing parallel to plane-3.

式(3)に示されるように、長期強度の評価には、サブクリティカルき裂進展パラメータ n と A の値が大きく影響する。Fig. 3~Fig. 6 の長期強度と破壊時間の関係での傾きは $1/n$ で与えられることから、 n の値が強く影響する。一方、周辺環境条件が大気から水中に変わる際や温度が上昇する際に認められる長期強度の顕著な低下に関しては、式(3)にあるように、 n だけでなく A も影響する。式(1)または式(4)にあるように、 A は応力拡大係数 K_I が $1.0\text{MN/m}^{3/2}$ のときのき裂進展速度に対応する値である。すなわち、周辺環境の違いに対応するき裂進展速度の違いが、環境条件が変化するときの長期強度に影響し、特にき裂進展が促進され、速度が上昇する (A の値が高くなる) 条件が長期強度の評価において極めて重要になるということがいえる。

また、き裂進展速度が低くなる条件下 (乾燥状態または低温状態) に人為的に保つことによる破壊時間の増加の程度は、周辺環境がき裂進展を促進する条件に変化してからすぐに長期強度が低下し、その後短時間でき裂進展が促進される環境下に保たれた場合の長期強度にほぼ一致するという結果が得られたことから、人為的にき裂進展速度が低くなる条件下に保った分だけの破壊時

間の増加だけが期待できるということになる。放射性廃棄物の地層処分を考える場合、放射性廃棄物を数万年もの間地中に安全に保管することが望まれるため、岩石を人為的にき裂進展速度が低くなる条件に保つことの利点は小さいと考えられ、き裂進展が最も促進される条件下での長期強度評価を基に放射性廃棄物処分施設を設計することが良いと思われる。

したがって、長期安定性を考慮して岩盤構造物を建設・利用する場合は、岩石のサブクリティカルき裂進展の特徴を把握することが極めて重要であるといえる。特に、き裂進展が促進される環境条件を把握し、サブクリティカルき裂進展パラメータ n と A が周辺環境の違いによってどのように変化するかを十分理解しておく必要があると考えられる。

Fig. 8 Relationship between normalized long-term strength and time-to-failure in water at a constant temperature and with changing temperature. (a) Kumamoto andesite, (b) Oshima granite fracturing parallel to plane-3.

5 結 言

本研究では、周辺環境条件が変化することを考慮した場合の岩石の長期強度の評価法を示した。さらに、長期強度の評価より、岩石がさらされる周辺環境条件の変化が長期強度に及ぼす影響について調べた。長期強度の評価結果より、周辺環境が変化することを考慮した場合で

も、長期強度はき裂進展が最も促進される環境条件下にさらされ続けた条件で評価されたものに近い値となることがわかった。すなわち、周辺環境の温度が変化し、水中環境になることが想定される場合は、環境条件を水中に保った条件および想定される最高温度に保った条件で評価される長期強度の値が、岩石や岩盤構造物の長期安定性を考える上で極めて重要であると結論づけることができる。

参 考 文 献

- 1) B. K. Atkinson, "Subcritical crack growth in geological materials", *Journal of Geophysical Research*, Vol.89, No.B6, pp.4077-4114 (1984).
- 2) B. K. Atkinson and P. G. Meredith, "Fracture mechanics of rock", pp.111-166 (1987) Academic Press.
- 3) Y. Nara, "Previous results and new development for studies of subcritical crack growth in rock - To understand time-dependent behavior of crack growth -", *Journal of MMIJ*, Vol.123, No.1, pp.2-9 (2007).
- 4) T. Waza, K. Kurita and H. Mizutani, "The effect of water on the subcritical crack growth in silicate rocks", *Tectonophysics*, Vol.67, No.1,2, pp.25-34 (1980).
- 5) Y. Nara, M. Takada, T. Igarashi, N. Hiroyoshi and K. Kaneko, "Subcritical crack growth in an aqueous environment", *Exploration Geophysics*, Vol.40, No.1, pp.163-171 (2009).
- 6) Y. Nara, K. Morimoto, T. Yoneda, N. Hiroyoshi and K. Kaneko, "Effects of humidity and temperature on subcritical crack growth in sandstone" *International Journal of Solids and Structures*, Vol.48, No.7,8, pp.1130-1140 (2011).
- 7) Y. Nara, N. Hiroyoshi, T. Yoneda and K. Kaneko, "Effects of relative humidity and temperature on subcritical crack growth in igneous rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.47, No.4, pp.640-646 (2010).
- 8) Y. Nara, H. Yamanaka, Y. Oe and K. Kaneko, "Influence of temperature and water on subcritical crack growth parameters and long-term strength for igneous rocks", *Geophysical Journal International*, Vol.193, No.1, pp.47-60 (2013).
- 9) Y. Nara, M. Takada, D. Mori, H. Owada, T. Yoneda and K. Kaneko, "Subcritical crack growth and long-term strength in rock and cementitious material", *International Journal of Fracture*, Vol.164, No.1, pp.57-71 (2010).
- 10) R. J. Charles, "Static fatigue of glass. II", *Journal of Applied Physics*, Vol.29, No.11, pp.1554-1560 (1958).
- 11) Y. Obara, H. S. Jeong, T. Matsuyama, Y. Nara and K. Kaneko, "Stress corrosion index of Kumamoto andesite", *Journal of MMIJ*, Vol.121, No.4,5, pp.84-89 (2005).
- 12) O. Sano, I. Ito and M. Terada, "Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression", *Journal of Geophysical Research*, Vol.86, No.B10, pp.9299-9311 (1981).
- 13) Y. Nara and K. Kaneko, "Sub-critical crack growth in anisotropic rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.43, No.3, pp.437-453 (2006).
- 14) Y. Nara and K. Kaneko, "Study of subcritical crack growth in andesite using the Double Torsion test", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.42, No.4, pp.521-530 (2005).
- 15) Y. Nara, K. Morimoto, N. Hiroyoshi, T. Yoneda, K. Kaneko and P. M. Benson, "Influence of relative humidity on fracture toughness of rock: Implications for subcritical crack growth", *International Journal of Solids and Structures*, Vol.49, No.18, pp.2471-2481 (2012).
- 16) H. S. Jeong, Y. Obara and K. Sugawara, "The strength of rock under water vapor pressure", *Journal of MMIJ*, Vol.119, No.1, pp.9-16 (2003).