

大理石におけるサブクリティカルき裂進展の周辺環境依存性

西田 雄貴* 奈良 禎太** 柏谷 公希*** 石田 毅****

Environmental Dependence of Subcritical Crack Growth in Marble

by

Yuki NISHIDA*, Yoshitaka NARA**, Koki KASHIWAYA*** and Tsuyoshi ISHIDA****

It is important to investigate time-dependent deformation and fracturing in rock for the purpose of ensuring the long-term stability of structures in a rock mass. Subcritical crack growth is one of the main causes of time-dependent fracturing in rock. It is known that subcritical crack growth is influenced by not only stress but also surrounding environment. Studies of subcritical crack growth have been widely conducted for silicate rocks such as igneous rocks and sandstones. On the other hand, information of subcritical crack growth in carbonate rocks is not enough. Especially, influence of surrounding environmental conditions on subcritical crack growth in carbonate rocks has not been clarified yet. In this study, we investigated subcritical crack growth in carbonate rocks. Specifically, we investigated the influence of temperature and relative humidity on subcritical crack growth in air and in water. Macedonian marble was used as a rock sample. To measure subcritical crack growth, we used the load relaxation method of the double-torsion test. It was shown that the crack velocity increased when the temperature was higher at a constant relative humidity in air and in water. In addition, the crack velocity increased with increasing the relative humidity at a constant temperature. It is concluded that the temperature and relative humidity influence subcritical crack growth in carbonate rock in air and in water. From the results obtained in this study, it can be suggested that the condition with low temperature and low humidity is desirable for the long-term integrity of a carbonate rock.

Key words:

Subcritical crack growth, Double-torsion test, Marble, Temperature, Relative humidity, Water

1 緒 言

地下発電所や放射性廃棄物処分施設などの地下岩盤構造物、石造りの歴史的建築物には長期的な安定性が求められる。そのため、岩石の変形と破壊挙動の時間依存性に関する情報が、岩石の長期的安定性を確保するために必要である。ここで、岩石の破壊は微視き裂の発生、伸長および集積、局所化として説明される¹⁾。したがって、岩石内のき裂進展に関する研究が重要であると考えられる。

従来の破壊力学では、き裂先端の応力拡大係数が破壊じん性に達したとき、き裂の進展が起こると考えられてきた。しかし、実際は、応力拡大係数が破壊じん性に達していない状態においても、き裂は緩やかに進展する。このき裂進展現象をサブクリティカルき裂進展と呼ぶ²⁾。岩石のサブクリティカルき裂進展は、応力のみならず、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。特に、花崗岩^{3)~6)}、安山岩^{4)~8)}、砂岩^{9)~11)}などの珪酸塩岩石を用いて広く行われてきた。従来の研究では、温度上昇または、湿度上昇に伴い、き裂進展速度が上昇することを報告されている。また、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。しかし、炭酸塩岩石に関する研究が行われた例は少なく、特に、温度、

湿度、水がサブクリティカルき裂進展に及ぼす影響は十分に解明されていない。

そこで本研究では、大気中・水中で環境条件を変化させてダブルトーション(Double Torsion, 以下 DT)試験を行い、大理石のサブクリティカルき裂進展を計測した。特に、大気中において、温度一定条件下で湿度を変化させることにより、大理石におけるサブクリティカルき裂進展に及ぼす湿度の影響を調べた。さらに、水中・大気中環境下で、温度を変化させることにより、大理石におけるサブクリティカルき裂進展に及ぼす温度の影響を調べた。

2 岩石試料

岩石試料には、平均粒径が小さく均質な材料であるマケドニア共和国スコピエ産の大理石(以下マケドニア大理石)を用いた。マケドニア大理石の厚さ0.03mmの薄片より撮影された顕微鏡写真(直交ニコル下)をFig.1に示す。この図より、この大理石の平均粒径は約0.3mmと、非常に小さいことがわかる。また、X線回折分析結果をFig.2に示す。この図より、ドロマイト($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)の顕著なピークが認められるため、マケドニア大理石ではドロマイトが主な造岩鉱物である。

一辺50mmの立方体ブロックを用いた直交3方向のP波速度の測定結果をTable 1に示す。本研究では、この直

† 原稿受理 平成27年4月3日 Received Apr. 3, 2015 ©2016 The Society of Materials Science, Japan

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

** 正会員 鳥取大学 大学院工学研究科 〒680-8552 鳥取市湖山南4-101, Graduate School of Eng., Tottori University, Tottori, 680-8552

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

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

交する3つの方向を、P波速度の大きい順に、軸-1、軸-2、軸-3とした。さらに、これらの軸に垂直な面を、それぞれ面-1、面-2、面-3とした。Table 1より、この岩石ではP波速度に異方性があることが分かる。本研究では、一定方向のき裂進展のみを調べることにし、特に、き裂の進展方向が軸-1に平行となるように、また開口方向が軸-3に平行となるように、き裂進展方向を統一して試験を行った。

DT試験における応力拡大係数およびき裂進展速度の評価には、材料の弾性定数が必要である¹²⁾。そこで、直径30 mm、長さ60 mmの円柱試供体を用いて、軸ひずみ速度を $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ に制御した一軸圧縮試験を行った。なお、圧縮試験では、载荷方向が軸1に平行かつ軸3に垂直となるようにした。試験結果をFig.3に示す。本研究では、強度の50%の応力レベルでの接線ヤング率とポアソン比を求め、一軸圧縮強度は190 MPa、ヤング率は80.2 GPa、ポアソン比は0.46と評価された。これより、剛性率は27.5 GPaとなった。また、直径30 mm、長さ20 mmの円柱供試体を用い、温度293 K・相対湿度51～52%の大気環境下で得られた圧裂引張強度は6.22 MPaとなった。ここで、圧裂引張試験時は、破壊面が面3に平行となるようにした。さらに、Nara et al.¹¹⁾で示されている方法に従って、定変位速度DT試験¹³⁾による破壊じん性測定を行ったところ、温度323 K・相対湿度45～48%の条件下における大気環境下での破壊じん性は $1.28 \text{ MN/m}^{3/2}$ となった。

この岩石の乾燥密度と湿潤密度は、それぞれ 2838 kg/m^3 と 2844 kg/m^3 であった。飽和状態と乾燥状態との重量差による有効間隙率は0.60%であった。

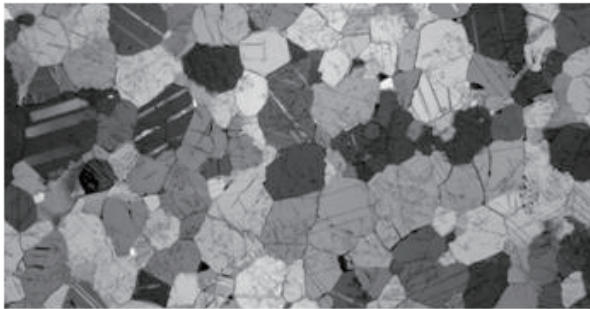


Fig.1 Photomicrograph of Macedonian marble under crossed nicols (1.9 × 3.4 mm).

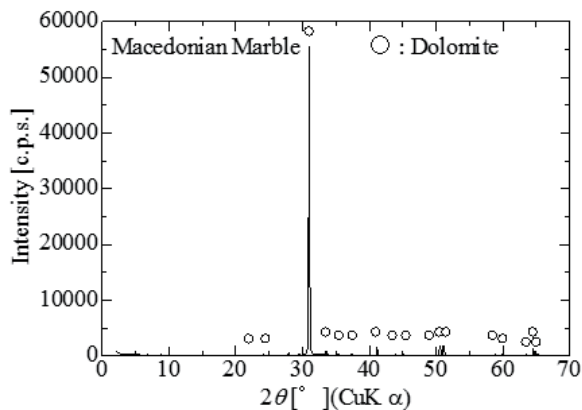


Fig.2 X-ray diffraction pattern for Macedonian marble.

Table 1 P-wave velocity in marble in km/s.

Direction	Axis-1	Axis-2	Axis-3
P-wave velocity [km/s]	4.15	4.06	3.74

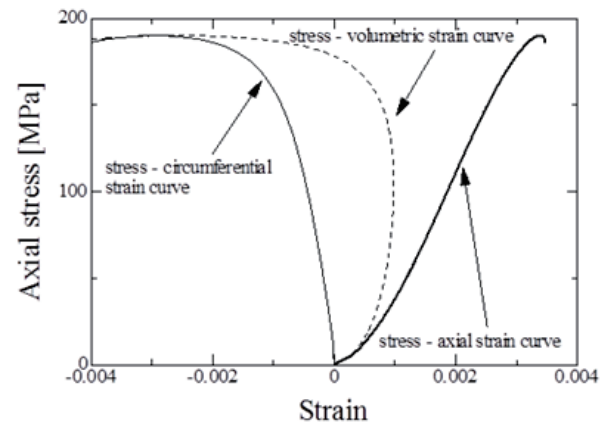


Fig.3 Stress-strain relationship for Macedonian marble under uniaxial compression.

3 試験方法

3・1 応力拡大係数とき裂進展速度の評価方法

前述したように、本研究では、サブクリティカルき裂進展を測定するための破壊力学試験法としてDT試験を採用した。DT試験は、応力拡大係数がき裂長に依存しないため、応力拡大係数とき裂進展速度の評価のためにき裂長を計測する必要がない試験方法である¹²⁾。さらに、供試体の形状が単純であり、加工が容易であることや载荷形式が単純であることから、岩石のような不透明材料におけるき裂進展測定として、最も一般的に用いられている。

Fig.4に、供試体の概要図および载荷形式を示す。供試体の形状は長方形断面の薄板状である。き裂を供試体の中央部に進展させることを目的として、供試体にはガイド溝を形成し、さらにイニシャルノッチを入れておく。

本研究では、定変位法を用いた。定変位法は、着力点の変位を一定に保つ方法で、き裂進展に伴う荷重緩和を測定し、得られた荷重緩和曲線からき裂進展を評価する。この方法では、荷重が時間と関数になり、き裂進展速度が荷重緩和速度から求められるため、1回の試験から広範囲の K_I - da/dt 関係が得られる。

応力拡大係数とき裂進展速度は次のように表される¹²⁾。

$$K_I = P w_m \sqrt{\frac{3(1+\nu)}{W d^3 d_n}} \quad (1)$$

$$\frac{da}{dt} = -\phi_c \frac{W G d^3 P_i \lambda_i}{3 w_m^2 P^2} \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

ここで、 K_I は応力拡大係数、 da/dt はき裂進展速度、 P は荷重、 w_m はモーメントアーム、 ν はポアソン比、 W はDT供試体の幅、 d は薄板の厚さ、 d_n はき裂が進展している部分での薄板の厚さ、 P_i は荷重の初期値、 λ_i は初期き裂長における供試体のコンプライアンス、 G は材料の剛性率、 ϕ_c は校正係数でき裂前縁部の形状に依存する^{12), 14)}。Williams

and Evans¹²⁾, Sano¹⁴⁾, 瀬戸ら¹⁵⁾が示したき裂長の測定より, 上側と下側の長さの差が約 4.2 mm であったことから, 本研究で用いたマケドニア大理石では, $\alpha_c=0.4$ とした⁹⁾.

本研究で用いた供試体は, モーメントアーム w_m は 18 mm, 幅 W は 45 mm, 厚さ d は 3 mm, 長さ L は 140 mm とした. また, 供試体中央部に幅 3 mm, 深さ 1 mm ($d_n=2$ [mm])の四角形断面のガイド溝を設けている.

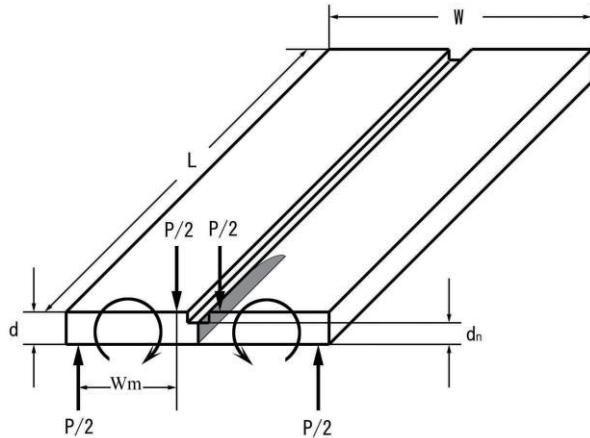


Fig.4 Double torsion specimen and loading configuration.

3・2 試験装置

Fig.5 に, 本研究で用いた試験装置の概略図を示す. 本研究で用いた装置は, 先行研究で用いたものと同じものであり, 大気環境下で用いた装置の詳細は Nara and Kaneko⁷⁾で, 水中環境下の試験で用いた装置の詳細は Nara et al.⁵⁾で得られる. 大気環境下・水中環境下での試験装置のいずれの場合も, 鉛直方向に動く電動シリンダを用いて, 供試体の上側からボールベアリングを介して 2 点で载荷して, 供試体にねじりモーメントを加える仕組みになっている. また, 大気環境下の試験で用いる装置の場合は, 供試体の下側に取り付けけたデジタルマイクロスコプによって, 供試体中を進展するき裂を観察できる.

試験中の環境を一定に保つため, DT 試験装置を温度・湿度が制御できる恒温室内に設置した. 温度・湿度の制御系と計測系は恒温室外に設置した.

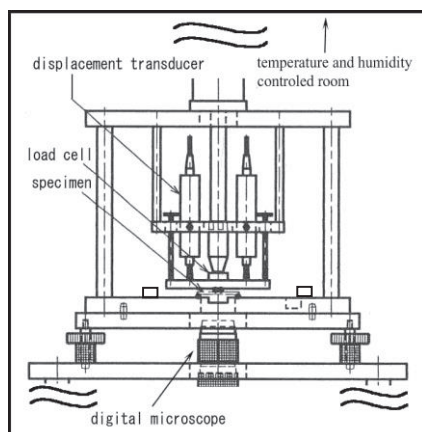


Fig.5 Schematic illustration of double-torsion testing apparatus.

3・3 試験手順

まず, 供試体に初期き裂を導入した. 初期き裂の導入は, 着力点を約 $4\mu\text{m}$ ずつ変位させた後, 変位を一定に保つという手順を繰り返すことによって行った. この間, デジタルマイクロスコプにより, き裂伸長を観察した. Trantina¹⁷⁾によると, 次の式で示される範囲において, 応力拡大係数がき裂の長さに依存しない.

$$0.55w < a < L-0.65w \quad (3)$$

本研究では, $w=45$ [mm]の供試体を用いていることから, き裂長が上式の下限界にほぼ等しい 25 mm に達するまで初期き裂の導入の操作を行った.

次に, き裂進展速度の計算に必要な供試体のコンプライアンスの初期値 λ_i を測定した. λ_i は, き裂のさらなる進展が起こらないように, 着力点を $4\mu\text{m}$ 未満の速度で緩やかに変位させながら, 荷重と変位を測定することによって評価した.

このような操作の後に, 定変位法によるサブクリティカルき裂進展測定を行った. 本研究では, Nara and Kaneko⁷⁾で行われたように, 供試体予荷重を緩やかに加えた後, 着力点を急速に変位させ, その変位を約 2 時間一定に保つことによって定変位法による測定を行った. 特に, 14 N の予荷重を加えた後, 0.33 mm の変位を急速に加えることによって測定を行った.

本研究では, 大理石におけるサブクリティカルき裂進展に及ぼす湿度の影響を調べるために, マケドニア大理石における定変位ダブルトーション試験を, 温度を 50℃ で一定とし, 相対湿度を 10%・50%・90%の 3 つの条件の大気環境下で行った. さらに, 温度の影響を調べるために, 温度を 291K・318K の水中環境下で, また相対湿度を 50%で一定とし, 温度を 293K・323K・351K の 3 つの条件の大気環境下で試験を行った.

4 試験結果

応力拡大係数 K_I とき裂進展速度 da/dt の関係は, 経験的に次のように表される¹⁷⁾.

$$\frac{da}{dt} = AK_I^n \quad (4)$$

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, 材料のサブクリティカルき裂進展に対する抵抗性を示す定数である.

Fig.6 に, 温度が一定 (318~323 K) のときに大気中と蒸留水中で得られた応力拡大係数とき裂進展速度の関係を示す. この図には, 温度 323 K・相対湿度 45~48 %の条件下での破壊じん性の値 ($1.28 \text{ MN/m}^{3/2}$) も点線で示している. Fig.6 より, 同一の応力拡大係数において, 湿度上昇に伴い, き裂進展速度が高くなることが分かる. また, 水中では大気中よりもき裂進展速度が高くなることがわかる.

Table 2 に, 温度が一定 (318~323 K) のときに大気中と蒸留水中で行われた DT 試験の結果をまとめる. この表では, 応力拡大係数を比較するために, $da/dt=10^{-5}$ [m/s]における応力拡大係数の値 $K_{I(10^{-5})}$ をまとめた. さらに, 応

力拡大係数の測定の範囲が $0.7 \sim 1.3 \text{ MN/m}^{3/2}$ であったことから、き裂進展速度の比較を行うために、 $K_I = 1.0 \text{ [MN/m}^{3/2}\text{]}$ におけるき裂進展速度 $da/dt(1.0)$ の値をまとめた。この表より、湿度上昇とともに応力拡大係数 $K_I(10^{-5})$ は低下し、き裂進展速度 $da/dt(1.0)$ は増大することが分かる。また、サブクリティカルき裂進展指数 n の値は、大気中よりも水中環境下の方が低くなった。大気中においては、湿度が高くなるほど n の値が低くなった。

Fig.7 に、相対湿度 50% の大気環境下および蒸留水中環境下において、温度が異なるときの応力拡大係数とき裂進展速度の関係を示す。Fig.6 と同様に Fig.7 においても、温度 $323 \text{ K} \cdot$ 相対湿度 $45 \sim 48\%$ の条件下で測定された破壊じん性の値 ($1.28 \text{ MN/m}^{3/2}$) を点線で示している。この図より、大気中と水中いずれの場合も、同一の応力拡大係数において、温度が上昇するにつれて、き裂進展速度が高くなることがわかる。

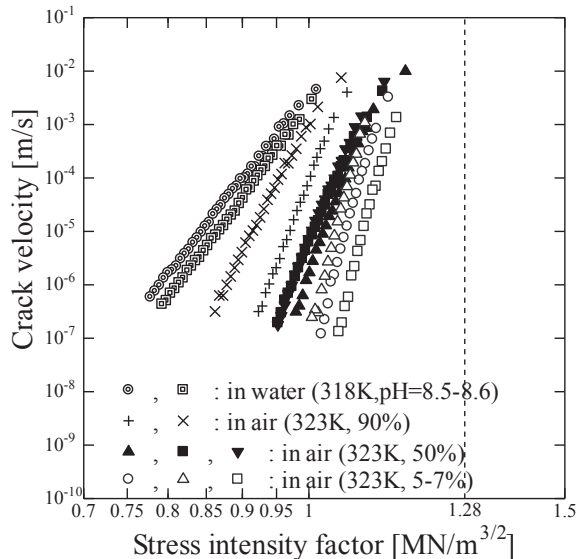


Fig.6 K_I - da/dt relationships for Macedonian marble in air with different relative humidities and in water.

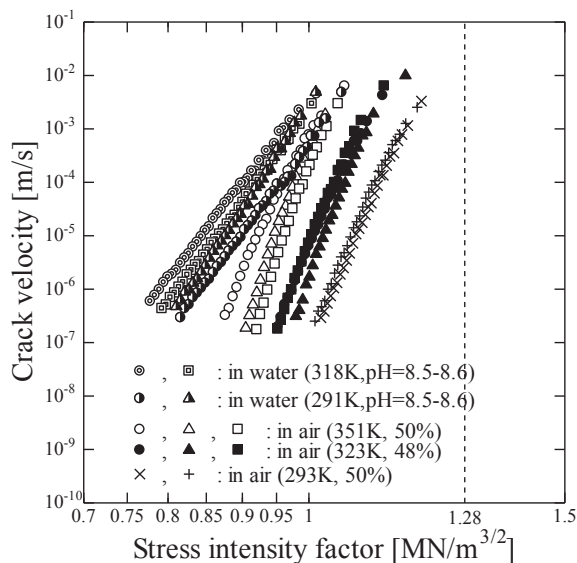


Fig.7 K_I - da/dt relationships for Macedonian marble in air with different temperatures and in water.

Table 3 に、温度が異なる環境下で得られた DT 試験の結果をまとめた。この表より、大気中・水中ともに、温度上昇にしたがって、応力拡大係数 $K_I(10^{-5})$ は低下し、き裂進展速度 $da/dt(1.0)$ は増大することが分かる。また、サブクリティカルき裂進展指数 n に及ぼす温度の影響は殆ど認められないことがわかる。

5 考 察

本研究で得られた試験結果から、大理石におけるサブクリティカルき裂進展は、温度や相対湿度、水の存在等の影響を受けることが分かる。ケイ酸塩材料では、引張を受けたき裂先端部のシロキサン結合が水と反応し、劣化・分断が起こることによってサブクリティカルき裂進展が生じると考えられている¹⁸⁾。ただし、炭酸塩岩石のサブクリティカルき裂進展における周辺環境の影響は、これまで十分に研究されておらず、ケイ酸塩岩石とは異なる機構がき裂進展を支配している可能性がある。炭酸塩岩石とケイ酸塩岩石との間で、サブクリティカルき裂進展における周辺環境の影響の違いを知ることは重要である。そこで、本研究では、周辺環境の影響の違いを把握するために、本研究で用いたマケドニア大理石と熊本安山岩⁹⁾との比較を行った。

マケドニア大理石において温度が上昇すると、き裂進展速度が上昇した。この傾向は熊本安山岩と同様である。熊本安山岩の場合、相対湿度一定環境下で温度を 293 K から 348 K まで上昇させると、1 オーダー程度の速度上昇が認められている。一方、マケドニア大理石の場合、相対湿度一定環境下で温度を 293 K から 351 K まで上昇させると、3 オーダー程度の速度上昇が見られた。このことから、マケドニア大理石のき裂進展速度に及ぼす温度の影響は、熊本安山岩よりも大きいといえる。

熊本安山岩の場合、温度一定環境下で相対湿度を 55% から 90% まで上昇させると、1 オーダー程度の速度上昇が認められている。一方、マケドニア大理石の場合、温度一定環境下で相対湿度を 50% から 89% まで上昇させると、2 オーダー程度の速度上昇が見られた。ゆえに、マケドニア大理石のき裂進展速度に及ぼす湿度の影響は、熊本安山岩よりも大きいといえる。

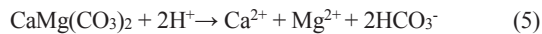
また、大気中において、温度・湿度が大理石のサブクリティカルき裂進展に影響を与えたことについて考察する。温度が高くなるにつれて上昇することから、炭酸塩岩石におけるき裂進展が熱活性化過程により支配されることが考えられる。また、湿度が高くなるにつれて、き裂進展速度が上昇することから、水の存在により、き裂進展を支配する化学的な機構が促進されたと考えられる。マケドニア大理石の主成分はドロマイト ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) であり、シロキサン結合の劣化・分断とは異なる機構が、き裂進展を支配していると考えられる。一般に、本研究での条件のような、 pH が中性付近の値の場合には、水に溶けた CO_2 は HCO_3^- として存在する。そこで、以下のような反応がき裂先端で生じていた可能性がある。

Table 2 Summary of subcritical crack growth measurements for marble in air and distilled water with constant temperature.

Temperature [K]	relative humidity or pH	n	$\log A$	$K_I (10^{-5}) [\text{MN/m}^{3/2}]$	$da/dt(1.0) [\text{m/s}]$
325	5~7 % in air	103±5	-7.82±1.03	1.06±0.03	$1.51 \times 10^{-8 \pm 1.03}$
323~324	48~50 % in air	64±2	-5.39±0.29	1.03±0.04	$4.11 \times 10^{-6 \pm 0.29}$
323~324	89 % in air	61±13	-3.54±0.76	0.94±0.04	$2.92 \times 10^{-4 \pm 0.76}$
318	pH = 9 in water	36±2	-2.55±0.16	0.86±0.02	$2.95 \times 10^{-3 \pm 0.03}$

Table 3 Summary of subcritical crack growth measurements for marble in air and distilled water with different temperatures.

Temperature [K]	relative humidity or pH	n	$\log A$	$K_I (10^{-5}) [\text{MN/m}^{3/2}]$	$da/dt(1.0) [\text{m/s}]$
293	50 % in air	61±1	-6.89±0.19	1.08±0.01	$1.30 \times 10^{-7 \pm 0.19}$
323~324	48~50 % in air	64±2	-5.39±0.29	1.03±0.04	$4.11 \times 10^{-6 \pm 0.29}$
351	50 % in air	69±12	-3.42±0.33	0.95±0.02	$4.55 \times 10^{-4 \pm 0.33}$
291	pH = 8~9 in water	39±4	-2.93±0.52	0.89±0.02	$1.63 \times 10^{-3 \pm 0.20}$
318	pH = 9 in water	36±2	-2.55±0.16	0.86±0.02	$2.95 \times 10^{-3 \pm 0.03}$



つまり、水がき裂先端部に供給されることにより、き裂先端部の結合が分断されるという反応である。この場合、高湿度環境下や水中のような、水がき裂先端により供給されやすい条件下において、化学結合の分断によるき裂進展が促進されることとなる。

Nara et al.⁶⁾で考察されているように、き裂先端部の開口幅を考えると、水蒸気は、き裂先端およびその近傍では、毛管凝縮によって液体になり、水で満たされた状態となる。この場合、き裂先端付近において吸引力が作用し、圧縮応力が作用する状態となると考えられる¹³⁾。周辺環境の相対湿度が上昇すると、き裂先端部での水の凝縮量が増大し、曲率半径は大きくなり、圧縮応力は減少する。このような効果によって、き裂先端部における引張が高められる効果が表れることとなる。そのため、相対湿度が高い場合に、同一の応力拡大係数でのき裂進展速度の上昇が起こった可能性がある。つまり、水蒸気の毛管凝縮により発生する吸引力の変化と、き裂先端での引張応力下での化学反応の両方が、サブクリティカルき裂進展を支配していると考えられる。

サブクリティカルき裂進展指数 n に及ぼす水の影響についても考察が必要である。 n の値が低くなる環境下では、長期強度が低くなるのが先行研究において示されている^{19),20)}。マケドニア大理石においては、大気中では湿度が高い環境下で n が低い値をとり、水中においては、大気中よりも低い値となった。したがって、マケドニア大理石では、長期強度が高湿度環境下や水中において低くなり、このような条件下では長期安定性が保たれにくくなると考えられる。

本研究で得られた結果から、ドロマイトからなる大理石のき裂進展に及ぼす温度、相対湿度、水の存在の影響を解明することができたと考えられる。ただし、大理石のき裂進展の時間依存性のより詳細な理解のためには、ドロマイト以外の成分、例えばカルサイト (CaCO_3) か

らなる大理石を探し、本研究と同様の試験を行う必要があると考えられる。また、き裂進展を支配する化学反応の解明のためには、より細かいスケールでの観察が必要になると考えられる。これらのことは本研究での目的を逸脱するため、今後の課題としたいが、本研究の結果から、炭酸塩岩盤および、そこに建設される岩盤構造物の長期安定性確保には、低温・低湿条件が望ましいと結論づけることができる。

6 結 言

本研究では、定変位 DT 試験法を用い、大理石におけるサブクリティカルき裂進展に及ぼす温度・湿度の影響を大気中・水中の環境条件の下で調べた。その結果、水中でのき裂進展速度は、大気中でのものよりも高くなることが示された。大気中においては、温度一定環境下では、湿度が上昇するにつれてき裂進展速度が高くなった。また、相対湿度一定環境下では、温度が上昇するにつれてき裂進展速度が上昇した。さらに、大理石のサブクリティカルき裂進展の場合、ケイ酸塩岩石よりも温度や湿度の影響を受けやすいことが示された。

本論文の成果の一部は、JSPS 科研費 23860027 および 25870357 の助成を受けて得たものです。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) C. H. Scholz, "Experimental study of the fracturing process in brittle rock", *Journal of Geophysical Research*, Vol.73, No.4, pp.1447-1454 (1968).
- 2) B. K. Atkinson, "Subcritical crack growth in geological materials", *Journal of Geophysical Research*, Vol.89, No.B6, pp.4077-4114 (1984).
- 3) O. Sano and Y. Kudo, "Relation of Fracture Resistance to Fabric for Granitic Rocks", *Pure and Applied Geophysics*, Vol.138, No.4, pp.657-667 (1992).
- 4) 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).

- 5) Y. Nara, M. Takada, T. Igarashi, N. Hiroyoshi and K. Kaneko, "Subcritical crack growth in rocks in an aqueous environment", *Exploration Geophysics*, Vol.40, No.1, pp.163-171 (2009).
- 6) 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*, VOL47, No.4, pp.640-646 (2010).
- 7) Y. Nara and K. Kaneko, "Study of subcritical crack growth in andesite using Double Torsion test", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.42, No.4, pp.521-530 (2005).
- 8) 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).
- 9) J. Holder, J. E. Olson and Z. Philip, "Experimental determination of subcritical crack growth parameters in sedimentary rock". *Geophysical Research Letters*, Vol.28, No.4, pp.599-602.
- 10) 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).
- 11) 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).
- 12) D. P. Williams and A. G. Evans, "A simple method for studying slow crack growth", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.1, No.4, pp.264-270 (1973).
- 13) A. G. Evans, "A method for evaluating the time-dependent failure characteristics of brittle materials – and its application to polycrystalline alumina", *Journal of Materials Science*, Vol.7, No.10, pp.1137-1146 (1972).
- 14) B. K. Atkinson, "A fracture mechanics study of subcritical tensile cracking of quartz in wet environments", *Pure and Applied Geophysics*, Vol.117, No.5, pp.1011-1024 (1979).
- 15) O. Sano, "A revision of the double-torsion technique for brittle materials", *Journal of Materials Science*, Vol.23, No.7, pp.2505-2511 (1998).
- 16) M. Seto, M. Utagawa and W. J. Jung, "Subcritical crack growth and rate dependent tensile fracture of sandstone", *Journal of MMIJ*, Vol.116, No.7, pp.630-635 (2000). (in Japanese with English abstract)
- 17) R. J. Charles, "Static fatigue of glass. II", *Journal of Applied Physics*, Vol.29, No.11, pp.1554-1560 (1958).
- 18) O. L. Anderson and P. C. Grew, "Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics", *Reviews of Geophysics and Space Physics*, Vol.15, No.1, pp.77-104 (1977).
- 19) 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).
- 20) Y. Nara, "Effect of anisotropy on the long-term strength of granite", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.48, No.3, pp.959-969 (2015).