

## 気象条件の変化による岩石中の割れ目の進展性評価手法

久河 竜也\* 浦越 拓野\* 河村 祥一\*

## Evaluation Method of Crack Propagation in Rocks Caused by Change in Weather Conditions

Tatsuya HISAKAWA Takuya URAKOSHI Shoichi KAWAMURA

We have developed a model that evaluates the crack propagation susceptibility in rock by weather change. This model consists of two formulae: one characterizing rock deformation due to changes in temperature and humidity, and the other defining the crack growth rate due to stress changes caused by rock deformation. These formulae were derived from forced deterioration experiments on rock specimens subjected to variations in temperature and humidity. Furthermore, we validated the formulae by using the data on past rockfall occurrences.

キーワード：割れ目，パリス則，落石，乾湿繰り返し試験

## 1. はじめに

剥落型落石は、割れ目の進展により岩石が岩盤から剥離し落下する現象で、大雨や地震などの明確な誘因によらずとも発生しうる特徴を持つ<sup>1)</sup>。この特徴から、運転規制のみでなく、点検、対策工等により落石災害を防止する必要があり、対策の効率的な実施のため、剥落型落石の危険度評価が望まれる。

剥落型落石の発生の起点となる岩石中の割れ目の進展メカニズムに関しては、柱状節理が発達した寒冷地に関する研究<sup>2)</sup>等がなされており、個別の地質条件や気象条件下での理解が進んでいるが、一般的に適用可能性の高い研究は少ない。このように、岩石中の割れ目の進展メカニズムに関する一般的な知見が乏しいため、現状では剥落型落石の危険度評価の際に、割れ目の進展しやすさを考慮するのは困難である。

そこで、剥落型落石の危険度の詳細・長期的な評価につなげるため、本研究は、割れ目の進展性評価手法の提案を目標とした。特に、明確な誘因なく発生する剥落型落石へ適用するため、降水や温湿度変化等の日常的な気象変化による割れ目の進展を対象とした。以下、本稿で気象変化という場合、このような日常的变化を指す。

本研究では、まず岩石中の割れ目の進展に関する既往の理論に基づき、気象変化による割れ目の進展現象の概念モデルを提案した。この概念モデルは①気象条件の変化による応力変動の発生と、②応力変動に伴う割れ目の進展の2つの要素から構成される。次に、構成要素のそれぞれに関する試験と定式化を行った。①について、気象変化による岩石中の応力変動の把握を目的に、試験室と実斜面で岩石の変形を測定し、その結果を踏まえ気象変化に伴う変形予測式を作成した。②について、乾湿変化に伴う繰り返し応力による岩石中の割れ目の進展特性を明らかにするため、割れ目を模した切欠きを設けた供試体に対し、載荷条件下で乾湿繰り返し試験を行い、その結果を踏まえて割れ目の進展速度予測式を検討した。最後に、構築した2つの予測式を組み合わせ、気象変化による割れ目の進展速度予測手法を構築するとともに、試算を行い構築した予測手法の活用方針の例を示した。なお、本稿は、文献3から内容を抜粋したうえで、加筆・修正したものである。詳細は文献3を参照されたい。

\* 防災技術研究部 地質研究室

## 2. 岩石中の割れ目の進展を記述する理論

日常的な気象変化などに由来した、破壊靱性値以下の応力レベルでも岩石中の割れ目の進展が発生することがある。応力が繰り返し作用する条件下での研究が行われており、繰り返し作用に対する割れ目の進展が、金属等の延性材料の分野でよく用いられる、以下のパリス則<sup>4)</sup>に従うことが多い。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

ここで、 $a$ は割れ目の長さ、 $N$ はサイクル数、 $\Delta K$ はサイクル中の応力拡大係数変動の振幅、 $C$ と $m$ は材料と周囲の環境により定まる数で、 $m$ の値はカララ大理石で4程度<sup>5)</sup>、ペレア砂岩で20程度<sup>6)</sup>と報告されている。

温度変化や乾湿変化等の周囲の環境変化によって発生する応力に由来した準脆性材料中の割れ目の進展に関する研究として、乾湿変化により生じる一度の応力変化と岩石の強度の関係から割れ目の発生に関して論じたもの<sup>7)</sup>や、温度変化により生じる繰り返し応力を仮定して理論的なモデルの構築を試みたもの<sup>8)</sup>がある。しかし、乾湿変化が繰り返される条件での割れ目の進展に関する考察はほぼ行われていない。

## 3. 岩石の割れ目進展の概念モデル

気象変化による岩石中の割れ目の進展の概念モデルとして、気温や湿度等の気象条件の変化による変形に伴う応力変動が生じ、その繰り返しによって割れ目が進展するというモデルが考えられる。このようなモデルに基づけば、割れ目の進展速度予測式として、気象条件を入力、応力変動を出力とする式(検討事項 $\alpha$ )と、応力変動を入力として割れ目の進展速度を出力する式(検討事項 $\beta$ )をそれぞれ構築し、組み合わせたものが考えられる。

検討事項 $\alpha$ について、気温や湿度等の気象変化により岩石に生じる変形や、内部に生じる応力が不明であるという課題があり、発生する応力を適切にモデル化する必要がある。たとえば、多くの材料では温度が上昇すると材料内部に熱応力(膨張)が生じることが知られている。また、土材料では吸水に伴い、最適含水比までは収縮し、その後膨張することが知られている。しかし、温度変化、乾湿変化の両方が加わる自然環境下の岩盤斜面で気象変化に対して生じる変形や応力変動についての研究事例は少ない<sup>9)</sup>。また、岩石の変形では、温度上昇による膨張と温度上昇に伴う乾燥による収縮といった競合的な作用も考えられるため、実験的に検討し、変形に寄与が大きい気象変化の要素を抽出することが重要であり、その結果に基づき応力変動の特性を把握する必要がある。

検討事項 $\beta$ の応力変動と割れ目の進展に関しては、気象変化は繰り返し発生することから、式(1)のパリス則をベースに定式化を行う方針とする。この際、乾湿変化や温度変化による応力での割れ目進展に対するパリス則の適用性を検討する必要がある。

そこで、検討事項 $\alpha$ と $\beta$ のそれぞれに関して、室内試験や現地測定にてデータを収集し、得られたデータに基づき検討する方針とした。まず、検討事項 $\alpha$ について、気象変化と発生する応力変動の関係を調べるため、温度や湿度が変化する環境下において、岩石に発生するひずみを測定した。次に、検討事項 $\beta$ について、気象変化によって生じた応力変化による割れ目の進展特性がパリス則によって説明できるか検討するため、割れ目を模した切欠きを設けた岩石に対して乾湿繰り返し試験を行った。

## 4. 温度・湿度変化時の岩石の変形に関する試験

検討事項αについて、気温や湿度の変化、降水等の気象変化による岩石の膨張、収縮等の変形特性を把握するため、室内と現地のそれぞれで岩石のひずみを測定した。室内試験では、割れ目を含まない岩石供試体を対象に、雰囲気温度と相対湿度の一方のみが変化する条件下で、岩石のひずみを測定した。現地試験では、岩盤斜面中の岩石表面にひずみゲージや変位計を設置して測定し、気象変化との対応を分析した。

### 4.1 室内試験の方法

来待砂岩のブロックから 15mm×30mm×130mm の割れ目を含まない角柱状供試体を 3 個整形し、うち 2 個をひずみ測定用とし、30mm×130mm の 2 面にひずみゲージを貼り付けた（図 1）。また、残りの 1 個は質量測定用とした。岩石中の平均粒径は 0.60mm で、ゲージ長は平均粒径より十分大きい 10mm とした。ひずみゲージは 1 成分、ひずみの測定方向は供試体の長軸方向とした。

これらの供試体を 2 種の試験 A, B に供した。試験 A では、恒温恒湿槽を用いて雰囲気温度を 35℃で一定とし、相対湿度のみ変化させた。試験 B では、相対湿度を 60%で一定とし、雰囲気温度のみ変化させた。相対湿度や雰囲気温度の変化過程として、ステップ状に変化させる過程（ステップ変化過程）と、線形に変化させる過程（線形変化過程）を設定した。また、試験 A, B ともにステップ変化過程と線形変化過程は同一の恒温恒湿槽で連続して行った。ひずみは試験開始時刻における値を 0、伸長を正として、サンプリング周期 1 分で、雰囲気温度、相対湿度はサンプリング周期 5 分で測定した。質量は線形変化過程の途中で槽内から質量測定用の供試体を 3 時間に 1 回程度取り出して測定し、測定後に槽内に戻して試験を継続した。

### 4.2 室内試験結果と考察

#### 4.2.1 湿度変化や温度変化に対する変形の特徴

試験 A のステップ変化過程では、相対湿度の変化に遅れてひずみが変動しており、その変動は相対湿度上昇時に膨張傾向であった（図 2）。湿度のステップ変化に対するひずみの過渡的な応答は 24 時間程度で収束した。また、試験 B のステップ変化過程では、温度上昇直後に急激に膨張し、その後時間をかけて収縮しており、温度低下時にはその逆の傾向の変動を示した（図 3）。試験 B の温度変化直後のひずみの変動

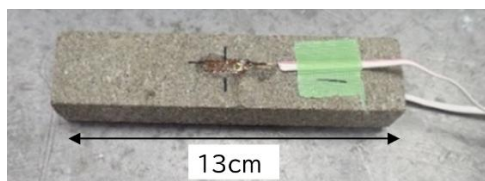


図 1 ひずみゲージを貼った供試体(両面にひずみゲージ貼付)

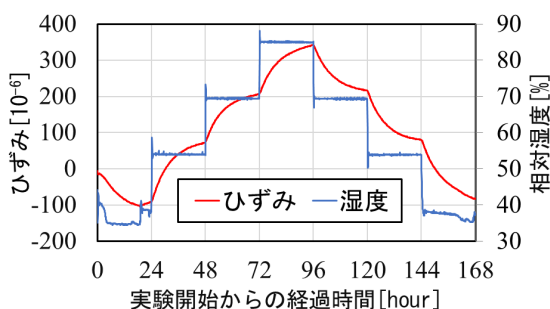


図 2 試験 A・湿度変化試験（ステップ変化過程）のひずみ測定結果例

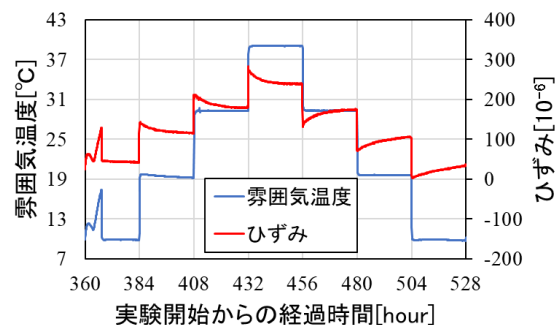


図 3 試験 B・温度変化試験（ステップ変化過程）のひずみ測定結果例

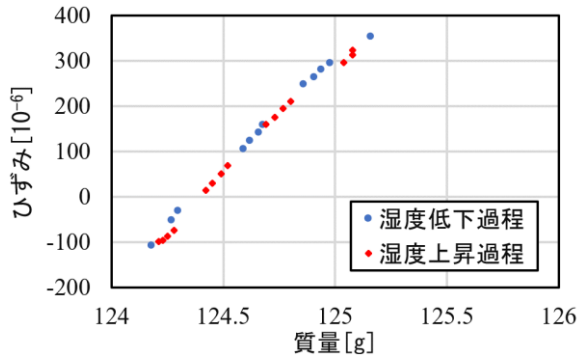


図4 試験A(湿度変化)における質量とひずみ

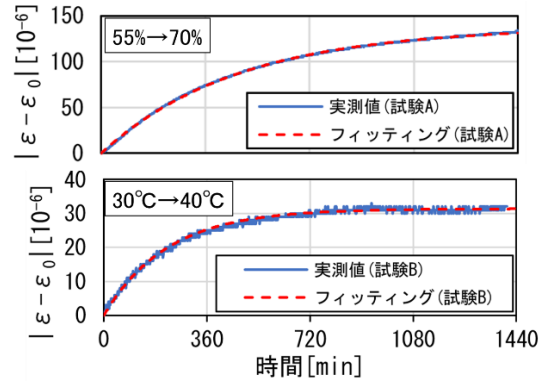


図5 試験A, 試験Bのフィッティング結果例

の大きさは  $100\sim 120 \times 10^{-6}$  であった。温度の変化が  $10^{\circ}\text{C}$  程度、岩石の線膨張係数が  $10 [10^{-6}/\text{K}]$  程度である<sup>10)</sup> ことから、温度変化直後の変形は熱変形と考えられる。なお、試験A, 試験Bともにひずみゲージごとの変形の傾向の差は小さく、他のひずみゲージでも図2, 図3に例示した結果と同様であった。

試験Aの質量測定の結果、各供試体の質量とひずみが概ね線形関係にあることが認められた(図4)。この質量の増減は、含水量の変化によると考えられ、試験Aの結果は、湿度上昇に伴い岩石が吸水膨張したと解釈できる。

#### 4.2.2 多孔質材料の吸湿に基づく変形のモデル化

吸水による岩石の変形を、多孔質材料の吸湿に関する理論を考慮してモデル化する。初期含水比  $w_0$  の多孔質物質に対して、時刻  $t = 0$  において湿度のステップ変化を与え、その後湿度を一定に保った場合の含水比  $w$  の時間変化は、平衡状態の含水比  $w_e$  と反応速度定数  $k$  を用いて、以下のように書ける<sup>11)</sup>。

$$w = (w_0 - w_e) \exp(-kt) + w_e \tag{2}$$

ここで、図4から、含水比とひずみが線形関係にあり、含水比とひずみ  $\varepsilon$  が比例すると仮定すると、初期状態のひずみを  $\varepsilon_0$ 、平衡状態のひずみを  $\varepsilon_e$ 、 $|\varepsilon_0 - \varepsilon_e| = \varepsilon_d$  とすれば、式(2)から以下が成り立つ。

$$|\varepsilon - \varepsilon_0| = \varepsilon_d \{1 - \exp(-kt)\} \tag{3}$$

温度、湿度のステップ変化過程のひずみの時系列データに対して、式(3)に適合するパラメータを最小二乗法で推定した。ただし、雰囲気温度や湿度が設定値で一定であった時間のデータのみを対象とし、設定値の変更直後の温湿度変化による変形や、温度変化により即座に生じる熱変形は考慮していない。推定結果は、湿度変化を与えた試験A、温度変化を与えた試験Bとも、決定係数  $R^2$  値は多くの場合に 0.98 以上で、試験結果をよく再現した(図5)。このことから、試験Aの供試体の変形は多孔質材料への吸湿に伴う変形で説明でき、試験Bの温度変化後の過渡的な変形も、主要な要因は含水量変化だと考えられる。

来待砂岩供試体の湿度変化試験に対するフィッティングにより推定された反応速度定数  $k$  には、明確な湿度依存性は確認されなかった(図6)。一方で、温度変化試験により推定された反応速度定数  $k$  には、頻度因子  $A$ 、気体定数  $R$ 、活性化エネルギー  $E_A$  の化学反応における反応速度定数と絶対温度  $T$  の関係を示すアレニウスの式

$$\ln k = \ln A - \frac{E_A}{RT} \tag{4}$$

に従う温度依存性が確認され、温度が高いと  $k$  が大きいことが確認された(図7)。反応速度定数が湿度(濃

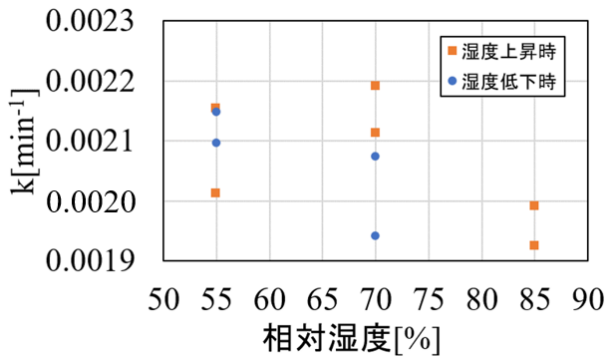


図6 相対湿度と反応速度定数kの関係

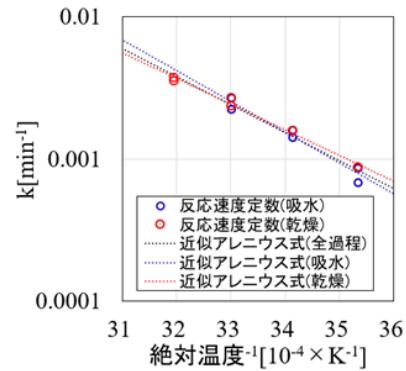


図7 反応速度定数kのアレニウスプロット

度) 依存しないことやアレニウスの式に従う温度依存性を有することは、他の多孔質材料の既往結果<sup>11)</sup>と整合的である。

#### 4.2.3 現地測定

降雨も含めた気象変化に対する岩石の変形特性の把握、および岩石が変形した際の自然の岩盤における割れ目の開閉、進展の有無の把握を目的に、山梨県大月市の安山岩が露出した北向き斜面で、現地測定を行った。亀裂変位計とひずみゲージによる測定を、割れ目をまたいで実施した。割れ目の進展しやすさや、割れ目周辺の境界条件の異なる割れ目に関するデータを取得するため、走向傾斜から、重力により主にせん断力が作用すると思われる割れ目 S および主に引張力が作用すると思われる割れ目 T の 2 つを対象とした。また、ひずみゲージによる測定を、割れ目をまたがない母岩部分でも実施した(図 8, 表 1)。さらに、自然条件下での供試体の挙動を検討するため、来待砂岩の割れ目を含まない供試体にひずみゲージを貼り付けて、同じ斜面上に静置した。ひずみ、開口変位のサンプリング周期は 60 分とし、気象データ(気温、相対湿度、降水量)は、現地測定を行った斜面から 4km 程度の距離のアメダス大月のデータ<sup>12)</sup>を参照した。

測定開始直後 1 か月分の測定結果を図 9 に示す。結果を図 9 に示していない測定のうち、C2 は C1 と、S1, S2, S5 は S8 と、S4 と S7 は S3 とそれぞれ同様の傾向で変動していた。図 9 では温度や湿度に対応する変位やひずみの変動が認められるが、以下で述べる高温時とは例えば経過時間 D<sub>1</sub> を、多湿時とは例えば経過時間 D<sub>2</sub> を参照されたい。亀裂変位計 C1 では、1 日周期の開口変位変動がみられ、高温時や多湿時に閉口する傾向であった(図 9(a))。また、割れ目をまたぐひずみゲージ S8 は、C1 の変動と同様に、高温時や多湿時に収縮する傾向であった(図 9(b))。割れ目をまたがないひずみゲージでは、概ね気温の変化に同期して高温時に膨張する傾向で、一部のゲージでは多湿時にもやや膨張した(図 9(c), (d))。以上を総括すると、割れ目をまたがないひずみゲージ S3, S6 とまたぐひずみゲージ S8 や亀裂変位計 C1 の結果から、高温、多湿時等の母岩の膨張時には割れ目は閉口し、母岩の収縮時には割れ目は開口する挙動と考えられる。

また、斜面に静置した来待砂岩供試体では、気温変動によると考えられる変形に加えて、2 日頃までや降水時に急激な膨張がみられた(図 9(e))。降水後は、長期的には徐々に収縮する傾向であり、岩石が乾燥する過程を反映したものと考えられる。また、2 日頃までの毎時 0.5mm 以下の少量の降水と、11~12 日頃の毎時最大 4.5mm の降水での膨張の大きさに大きな差はなく、一定程度の降水があるとひずみの変動が頭打ちになると考えられる。来待砂岩供試体の降雨時応答は、岩盤の割れ目をまたがない岩石部分の降雨時応答より明瞭であり、来待砂岩は現地測定対象の安山岩に比べ吸水しやすいと考えられる。

#### 4.2.4 室内試験結果と現地測定結果の総括

気温や湿度変化に対する変形の傾向については、室内試験では雰囲気温度変化時に即座に発生する熱変形に加え、24 時間程度の時間をかけて発生する含水比変化による変形がみられた。現地測定の結果、室内

試験と同様の变形に加え、降雨に伴う膨張がみられる場合があった。吸水の影響の大きさは岩種によって異なり、現地測定箇所で露出していた安山岩よりも、来待砂岩で大きいと考えられた。これは、来待砂岩で細孔径が大きく、透水性が高かったことによる可能性がある。また、現地測定では、岩石の収縮時に割れ目が開口する傾向であった。

全体として、岩石の熱変形は気温変化に比例して即座に応答する一方、吸水に伴う変形には不明瞭な点が多いため、気象変化による変形の予測に向けて、吸水に伴う変形に関する考察が重要だと考えられる。

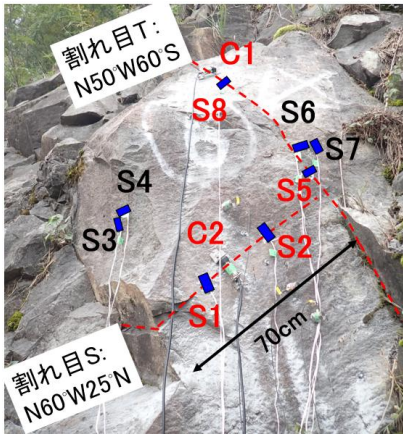


図8 測定対象の岩塊

表1 現地測定における測定対象

	岩盤斜面上の岩塊 (図8)			岩石供試体 (来待砂岩)
	割れ目Tをまたぐ	割れ目Sをまたぐ	割れ目をまたがない	
亀裂変位計	C1	C2	—	—
ひずみゲージ	S5,S8	S1,S2	S3,S4,S6,S7	S15

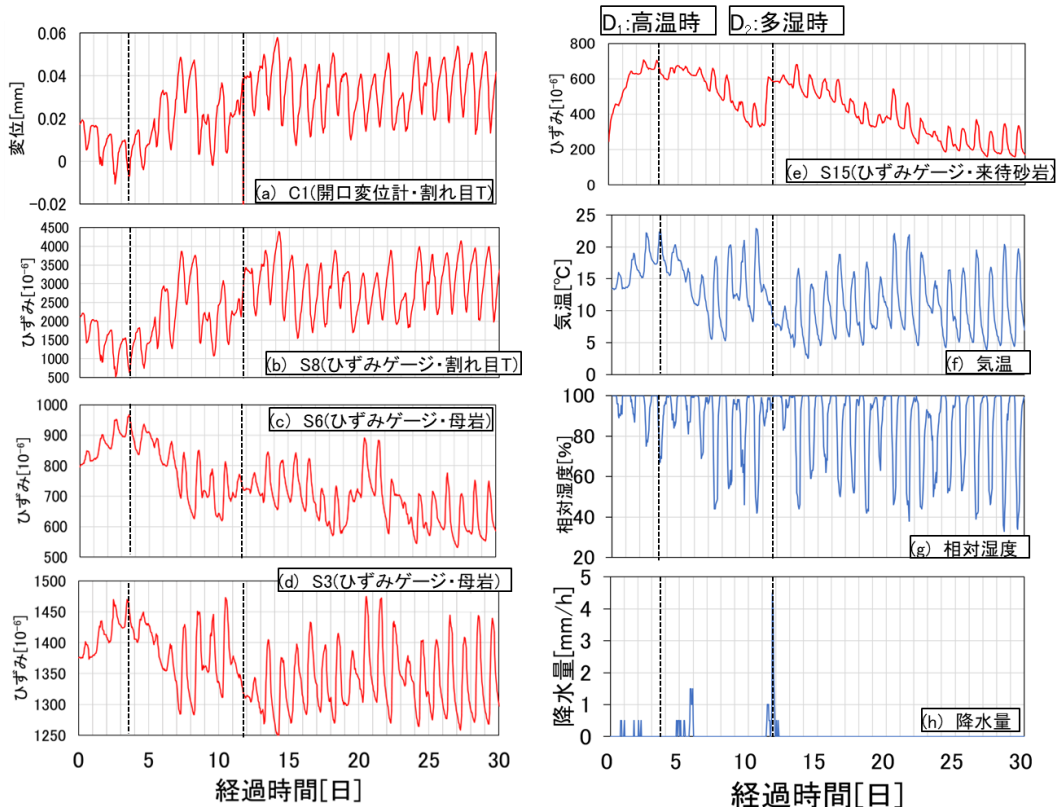


図9 現地測定結果と気象データの例(1か月分、気温最高、降水量最大の時刻を黒点線で示す)

## 5. 岩石中の応力変化予測式

### 5.1 温度・湿度変化による変形に関する予測式の構築・検証

前章の試験結果を踏まえ、温度・湿度変化による岩石の変形応答の予測式を構築する。熱変形と含水状態

の変化による変形が発生するが、これらの2つの要因は、発生する時間スケールが異なる。そこで、本節では、ひずみ $\varepsilon$ が、式(5)のように熱変形に由来する $\varepsilon_T$ と、含水状態の変化に由来する $\varepsilon_H$ に分離されると仮定して考察する。

$$\varepsilon = \varepsilon_T + \varepsilon_H \tag{5}$$

まず、雰囲気温度 $T$ における $\varepsilon_T$ は、線膨張係数 $\alpha$ 、ある雰囲気温度 $T_0$ での $\varepsilon_T$ の値を用いて以下のように表せる。

$$\varepsilon_T(T) = \varepsilon_T(T_0) + \alpha(T - T_0) \tag{6}$$

次に供試体の吸湿と、水分の蒸発が可逆一次反応であると仮定すれば、含水比 $w$ について以下の式が成立する。

$$\frac{dw}{dt} = -k(w - w_e) \tag{7}$$

なお、 $t = 0$ での初期値を $w_0$ とし、 $w_e$ を定数として式(7)を解くと、式(2)が得られる。前章と同様にして、 $\varepsilon_H$ と $w$ に線形関係があると仮定すると、 $\varepsilon_H$ の平衡状態における値 $\varepsilon_{He}$ を用いた、以下の式が成立する。

$$\frac{d\varepsilon_H}{dt} = -k(\varepsilon_H - \varepsilon_{He}) \tag{8}$$

式(8)において、 $k$ は式(4)に従い、 $\varepsilon_{He}$ は温度、湿度により変化する。 $\varepsilon_{He}$ は、岩石の吸水反応を、岩石表面の吸着サイトへの水蒸気の吸着反応とみなし、その平衡定数が反応エンタルピー $\Delta H$ のファントホッフの式に従うこと、ひずみと吸水量の変動量が比例することを仮定した場合、水蒸気圧 $P_w$ と定数 $\varepsilon_{Hc}$ 、 $\varepsilon_{He0}$ を用いて以下のように表せる<sup>3)</sup>。

$$\varepsilon_{He} = \varepsilon_{Hc} P_w \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) + \varepsilon_{He0} \tag{9}$$

$\varepsilon_H$ は、式(8)に式(9)で求まる $\varepsilon_{He}$ 、式(4)で定まる $k$ を代入して数値的に解くことで算出できる。

予測式(6)と(8)に関し、4章の室内試験のステップ変化過程の試験結果をもとに定めたパラメータ設定を用い、線形変化過程の測定結果の再現を試みることで検証した。パラメータ設定の詳細は文献3を参照されたい。

予測式を用いて計算を行った結果、相対湿度が変化した場合、温度が変化した場合ともに、予測値は実測値をよく再現していた(図10, 図11)。この結果から、温度や湿度がステップ状でない変化を示す場合であっても、来待砂岩のひずみの変動が予測可能だとわかった。

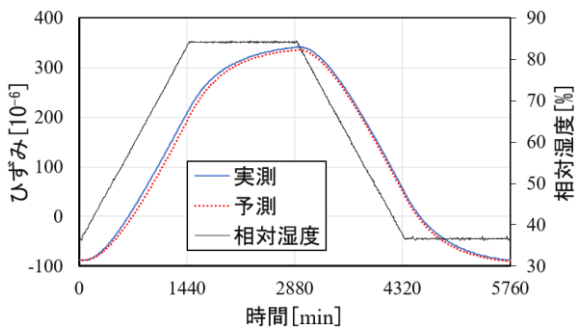


図10 ひずみ予測値と実測値の時間変化 (相対湿度線形変化時)

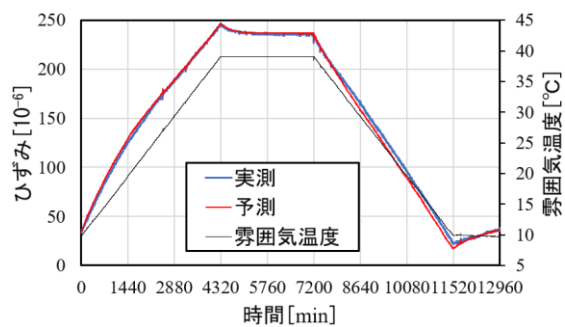


図11 ひずみ予測値と実測値の時間変化 (温度線形変化時)

### 5.2 降雨の効果を検討した岩石の変形予測式

本節では、より実斜面への適用性の高い変形予測式の構築を試みる。実斜面では、熱変形 $\varepsilon_T$ は室内試験と同様と考えられるが、降雨直後の膨張が大きく、その後膨張状態が維持される（図9(e)）ため、 $\varepsilon_H$ の変動には降雨履歴の影響も考えられる。これを踏まえ、 $\varepsilon_H$ は、式(9)に代わり、降雨履歴の影響を考慮した式(10)を用いて求めた。

$$\varepsilon_{He} = \varepsilon_{Hc} P_w \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) + \varepsilon_R R(t) + \varepsilon_{He0} \tag{10}$$

ここで、 $\varepsilon_R$ は定数、 $R(t)$ は時刻 $t$ における実効雨量を表し、過去の時刻 $s$ における1時間雨量 $r_s$ 、実効雨量の半減期 $\tau$ を用いて、以下のように表せる。

$$R(t) = \sum_{s=0}^t (0.5)^{\frac{t-s}{\tau}} r_s \tag{11}$$

また、降雨が続いた場合、ひずみの値が頭打ちとなることが確認されている（図9(e)）。このことは、岩石表面における吸水量に上限が存在することに起因すると考えられる。これを踏まえ、 $\varepsilon_H$ は、式(8)で求まる値と定数として定めた上限値 $\varepsilon_{max}$ のうちの小さいほうの値とした。

この予測式の適用可能性を検証するため、実斜面に静置した来待砂岩供試体の測定結果（図9(e)）をどの程度再現可能か検討した。ひずみの初期値や降雨に対する応答の大きさ等に関するパラメータを、測定値をもとに定めた<sup>3)</sup>うえで予測値を計算した結果、概ね実測されたひずみの増減の傾向を再現できた（図12）。

### 5.3 割れ目を含む岩石の変形と応力の関係

割れ目を含む岩石の気象変化に伴う変形と、応力の関係について考察を行う。岩石に雰囲気温度や湿度の変化による変形が発生する場合、岩石内に含水比や温度の勾配が発生し、その結果として応力が発生することが考えられる<sup>6) 13)</sup>。例として、図13のように、中央に割れ目を含み、空気に触れる面以外の全ての面を拘束された岩石に対して、割れ目の開口部側で温度や湿度の変化が加わる状況を考える。このとき、例えば雰囲気温度が低下した場合は、岩石の内部で温度が高く、表面で温度が低くなるような温度勾配が生じる。このような温度勾配は、表面に近づくほど収縮が大きくなるような変形をもたらし、割れ目先端部では割れ目が開く傾向の引張応力が発生する。このとき、割れ目の先端で発生する応力の大きさは、割れ目の形状にも依存するが、割れ目開口部分の変位の増加分と概ね比例し、これは岩石の表面における収縮の大きさと比例すると考えられる。また、同様の現象は降水や湿度変化等の乾湿変化が発生し、岩石

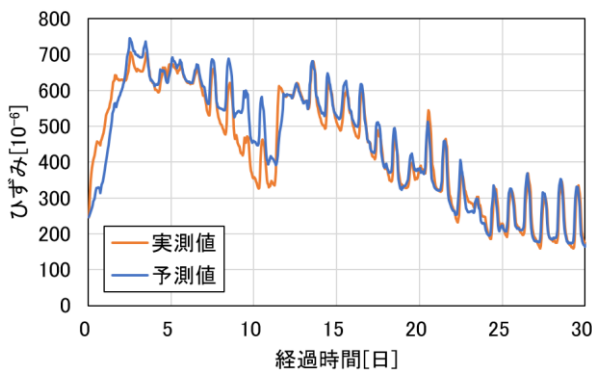


図12 実斜面におけるひずみ実測値と降雨を考慮した予測値の例

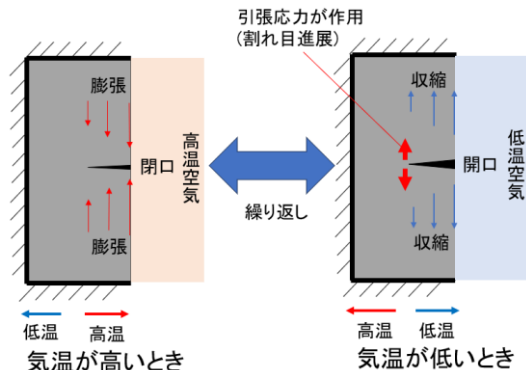


図13 繰り返し温度変化時の岩石の変形と割れ目に作用する引張応力の関係の例

内に含水比勾配が生じた場合にも発生すると推測される。

4.1.3 項の C1 と S3 の測定結果では、S3 で膨張ひずみが観測されたときに割れ目が閉じる傾向の変化となっており、測定を行った岩塊でも、図 13 のモデルに近い現象の発生が考えられる。以上から、実際の斜面でも、割れ目の先端には、割れ目を含まない岩石部分の収縮ひずみの大きさに概ね比例した引張応力が生じる場合が多いと推測され、前節までのひずみ変化の算出手法は、引張応力変化の算出手法として利用可能であると考えられる。

## 6. 乾湿繰り返しによる割れ目進展に関する試験

4 章の試験結果、ならびに温度変化よりも乾湿変化の繰り返しの方が岩石の劣化に大きく寄与するとして先行研究<sup>14)</sup>を踏まえ、検討事項βに関して乾湿繰り返し作用に対する割れ目の進展特性を把握する試験を行った。

### 6.1 試験方法

初期条件の制御のため、試験には自然の割れ目を含んだ岩石供試体ではなく、人工的な模擬割れ目を設けた供試体を用いる方針とした。4 章で用いた供試体と同サイズの、15mm×30mm×130mm の角柱状供試体に、割れ目を模擬することを意図して、15mm×130mm の面に直交し、かつ長さ 130mm の辺を垂直二等分するよう超音波加工機で長さ 15mm の切欠きを設けたものを試験に用いた(図 14)。この形状は、材料の破壊靱性試験である ASTM E399-20 試験<sup>15)</sup>(以下、ASTM 試験とする)で用いる供試体と同一である。

実際の斜面では割れ目に対して岩石の自重による応力が作用した状態で気象変化による含水比変化が生じることを踏まえ、試験は载荷条件下で、乾燥と浸水の繰り返しを与える方針とした。そのため、新たに試験治具を考案した(図 15)。この試験治具は、三点曲げ試験において、圧子を変位調整ねじによって固定できる構造としたもので、全体を水槽に浸水させることができる。調整ねじはロードセルを介して圧子を押す構造で、供試体上面中央の上方への変位を固定する機能を有し、試験開始時に下向き初期変位を導入することで、供試体中央上面に载荷力が生じる。ただし、試験中に供試体が膨張すれば载荷力は増加、収縮すれば減少する。また、調整ねじとロードセルの間は、調整ねじの回転成分をロードセルに伝えないように球座で接続しており、調整ねじは引張力を負担しないことから、岩石の収縮や割れ目の進展等により供試体上面が下向きに変位すると、初期に導入した変位による载荷力が減少することで、载荷力はロードセルから圧子までの重量(約 5~10N)まで低下する。供試体を切欠きが下側になるように設置し、治具を用いて载荷を加えた状態で、乾湿繰り返し試験を行った。乾湿変化は、治具を水槽の中に入れ、供試体全体が浸る量の水を出し入れして発生させ

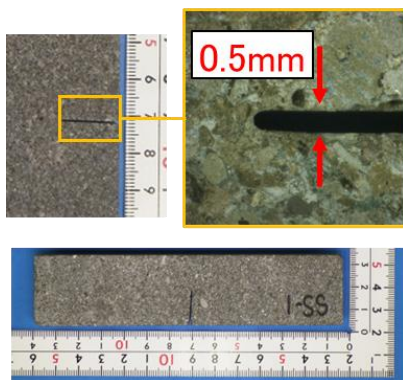


図 14 作製した模擬割れ目を含む供試体

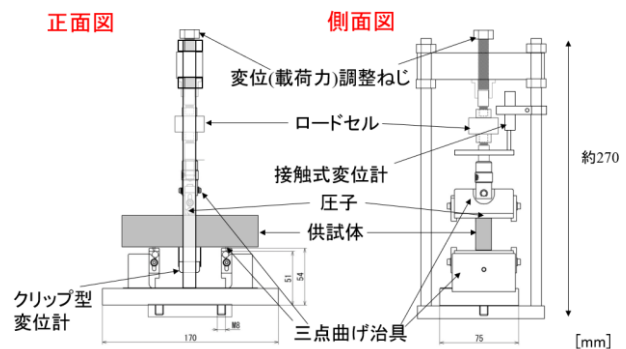


図 15 乾湿繰り返し試験に用いた治具

た. その間雰囲気温度は40°Cに保った. 試験は, 48 時間以上の乾燥と 24 時間の浸水を 1 サイクルとし, それを 20 回繰り返した. 試験中は, 切欠き部の開口変位および載荷力を 1 分に 1 度測定した. 初期の載荷力は 10N, 30N, 50N の 3 通りとし, 試験開始時に所定の初期載荷力となるように調整ねじを操作し, その後は調整ねじを操作しないこととした.

## 6.2 試験結果と考察

試験を行った結果, 初期載荷 50N の供試体が 1 サイクル目, 初期載荷 30N の供試体が 17 サイクル目の浸水過程の開始直後に破断した. 以下, サイクルごとの供試体の状態の変化について考察する際は, 1 サイクル中の増減過程における状態変化を把握できる前に破断した初期載荷 50N の供試体を除いて考察する. 切欠き先端部の開口変位は, 浸水過程開始とともに増大, すなわち模擬割れ目が開く傾向の変化を示し, 浸水過程終了直後に最大値をとった後, 乾燥が進むと減少する傾向であった(図 16). なお, 図中には, 5 サイクル目と 6 サイクル目の結果の例を示しているが, サイクルによらずほぼ同様の傾向であった.

初期載荷 10N, 30N の供試体において浸水過程開始と同時に発生した開口変位の増大の要因として, 岩石の吸水膨張のほか, 切欠きの入った供試体の下側が吸水しやすく, 含水比勾配によって発生した曲げ応力が切欠きに対して引張力として作用した可能性が考えられる. また, 浸水過程終了直後の増大は, 供試体の上側から空気に触れて含水比が低下するため, 浸水過程で発生した含水比勾配がより大きくなったためと考えられる. 乾燥過程では, 岩石全体での含水率の低下, 含水比勾配の解消により開口変位が減少したと考えられる. 各サイクル中の開口変位の最大値に着目して開口変位とサイクル数の関係を整理すると, サイクル数の増加につれて開口変位が増加する傾向であった(図 17).

載荷力(図 18)は, 初期載荷 10N の供試体では, 5 日目(1 サイクル目の浸水開始)以降は概ね 12N で一定であった. これに対し, 初期載荷 30N の供試体では, 乾湿繰り返しサイクルのうち浸水開始直後に載荷力が急増し, その後の浸水過程でも乾燥過程よりも載荷力が大きい傾向にある. 初期載荷 50N の供試体でも, 破断直前の浸水過程開始時に載荷力が増大している. これは, 浸水時の供試体の膨張によって, 供試体の上面が治具の圧子に押し付けられるような変形が生じたためと考えられる. また, 初期載荷 30N の供試体では, 試験が進むにつれて浸水過程での載荷力の増加が小さくなる傾向がある. これは, 試験の進行に伴って供試体の変形し, 供試体の上面が下方向に変位した結果, 吸水膨張が発生した際に圧子に押し付けられる力が弱まったためと考えられる.

試験後の供試体に対し, 顕微鏡で観察を行った. 初期載荷 10N の供試体では, 切欠きの先端付近から割れ目が粒界に沿うように曲がって進展しており, 長さは 1.6mm 程度であった(図 19 左). 初期載荷 30N の供試体でも, 切欠きの先端付近から割れ目が進展していた. 細かく見れば粒界に沿うように進展した結果, 曲がっている箇所はあるものの, 大きく見れば概ね切欠きの延長上で進展して破断に至っていた(図 19 右).

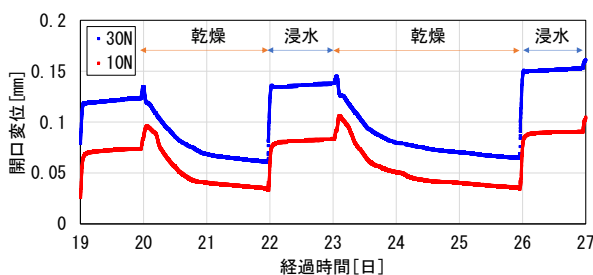


図 16 乾湿サイクル中の開口変位変化の例 (5, 6 サイクル目)

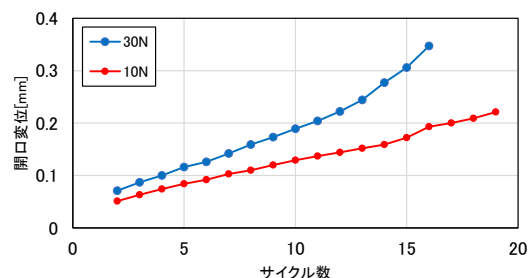


図 17 試験サイクル数と開口変位の関係

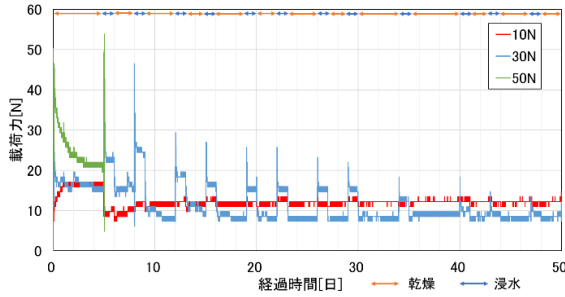


図 18 載荷力の変化の例(12 サイクル目頃まで)

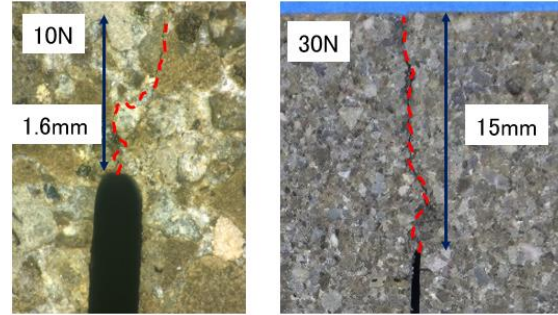


図 19 試験後の供試体

以上から、切欠きを設けた岩石供試体の三点曲げ試験において、供試体上面中央の上方への変位を拘束すると、乾湿繰り返しによって、供試体が膨張する際に割れ目が進展することを明らかにした。

### 7. 乾湿繰り返し作用による割れ目進展の理論式

式(1)のパリス則を、6章の試験条件を踏まえた形に書き換え、初期載荷 10N, 30N の場合の実験結果と比較することで、乾湿繰り返し作用による割れ目の進展に対する適用性を検討する。1 サイクルあたりの割れ目の長さ  $a$  の増分 (=  $da/dN$ ) が小さく、各乾湿繰り返しのサイクル中で同じ振幅の応力が作用すると仮定し、ASTM 試験 (図 20) の規格<sup>15)</sup> を踏まえると、パリス則は定数  $C_f$  を用いた以下のような形に書き換えることができる。

$$\frac{da}{dN} = C_f \left\{ f \left( \frac{a}{W} \right) \right\}^m \quad (12)$$

ここで、 $W$  は供試体の高さ、関数  $f(x)$  は本試験での応力拡大係数と割れ目の長さの関係を示し、

$$f(x) = \frac{\sqrt{x}\{1.99 - x(1 - x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)\}}{2(1 + 2x)(1 - x)^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

と書ける<sup>15)</sup>。式(12)の詳細な導出過程、および導出に用いた仮定の妥当性の検証は、文献 3 を参照されたい。

載荷力  $P$ 、割れ目の開口変位  $V$  と、割れ目の長さ  $a$  は、供試体のヤング率  $E$ 、幅  $B$ 、三点曲げ試験の支点間隔  $S$  を用いると、以下のような関係にある<sup>15)</sup>。

$$\frac{a}{W} = 1.000 - 3.950U + 2.982U^2 - 3.214U^3 + 51.516U^4 - 113.031U^5 \quad (14)$$

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{4EBW}{PS}} V} \quad (15)$$

以上の式(14)、(15)を用いて、各サイクル中の開口変位の最大値を割れ目の長さに換算したうえで、式(12)の各辺の値を計算して成立するか検証することで、本試験の結果に対するパリス則の適用可能性を検討した。

式(12)の各辺の値を両対数プロットした結果、初期載荷 10N の供試体では、 $da/dN$  と  $f(x)$  との関係は明瞭でなかった (図 21(a))。一方、初期載荷 30N の供試体では、 $f(x)$  が大きいとき、すなわちある程度割れ

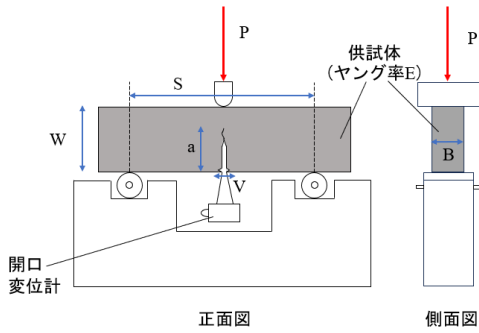


図20 ASTM E399-20 試験の概要

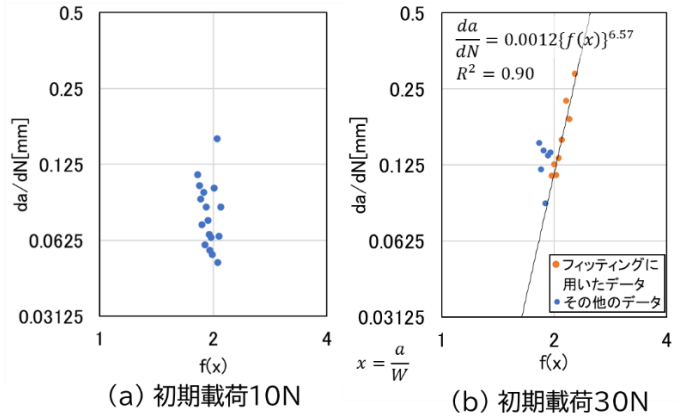


図21  $f(x)$ と $da/dN$ の関係

目が進展した後半のサイクルで $da/dN$ が増大する傾向にあり、かつ、その増大速度は両対数プロット上で直線になっており、パリス則で想定されるべき乗関数型に近い。破断直前の8サイクル分(図21において $f(x) > 1.97$ の範囲のプロット)のデータを用いて、最小二乗法で式(12)にフィッティングを行うと、 $C_f = 0.0012$ 、 $m = 6.57$ で良く再現できた(図21(b))。このことから、割れ目は $m = 6.57$ のパリス則に概ね従って進展したと解釈できる。また、载荷力 $P$ の変動は一定という仮定のもと得た式(12)で試験結果を再現できたことは、供試体中の含水量の変化に伴う応力変化の繰り返しが割れ目の進展に対して支配的で、パリス則が乾湿変化の繰り返しに伴う割れ目の進展に適用可能であることを示唆する。

## 8. 乾湿変化による割れ目進展速度の予測手法と割れ目進展スコアの提案

### 8.1 割れ目の進展速度予測手法の構築

ここまでの検討結果を、実岩盤で測定可能な気象データを用いた危険度評価につなげるための試行として、5章で提案した、降雨の効果を考慮した変形予測式と7章で適用可能性を確認したパリス則を統合し、気象データから実岩盤での割れ目の進展速度を相対評価可能な予測手法を構築する。

パリス則では、1回の応力変動による割れ目の進展は応力拡大係数振幅のべき乗に比例する。ここでは、割れ目は、引張応力が作用する際に進展すると考えられること、現地測定では、割れ目をまたがない岩石部分のひずみが減少する際に割れ目が開口したことを踏まえ、ひずみが単調減少を続ける期間を1回の応力変動とみなす。一般に、割れ目の長さの変動が小さい場合、応力拡大係数の変動の振幅は応力変動の振幅に比例することから、パリス則を踏まえると、1回の応力変動による割れ目の進展の大きさは応力変動の振幅の $m$ 乗に比例する。これに加えて、発生する応力変動がひずみの変動に比例するという仮定のもとでは、1回の応力変動による割れ目の進展長はひずみの変動の振幅の $m$ 乗に比例する。このとき、 $N$ 回の気象変化によるひずみ変化サイクルが経過後の割れ目の進展長 $a_N$ と $i$ サイクル目のひずみの変動の大きさ $\Delta\varepsilon_i$ を用いた、次の式が成立する。

$$a_N \propto \sum_{i=1}^N (\Delta\varepsilon_i)^m \tag{16}$$

式(16)に基づいて割れ目の長さを算出するには、割れ目の初期長さや、材料ごとに定まる定数が必要となる。しかし、これらを現地の岩塊に関して取得することは難しい。そこで、式(16)の右辺の値を各時刻における割れ目の進展しやすさを相対的に評価する指標として、割れ目進展スコアと定義する。なお、本研究

では、安定した評価を行うため、1回のひずみ変動の振幅に上限値を設け、それを上回った分の変形は別のひずみ変動として数えた。各気象条件の時系列データから割れ目進展スコアを算出するフローを、図22に示す。

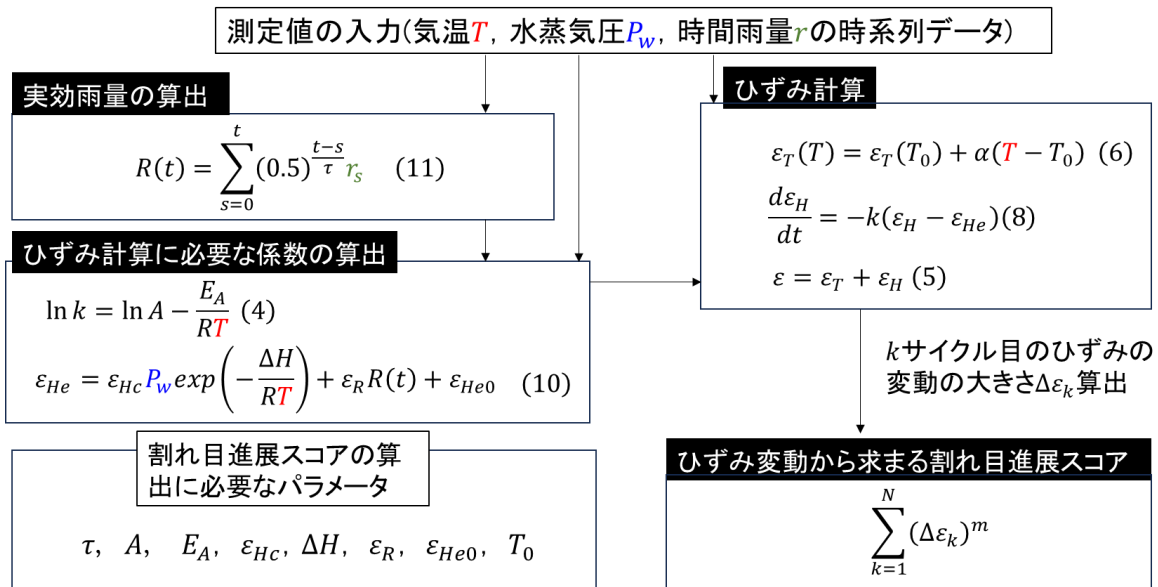


図22 割れ目進展スコアの算出フロー

## 8.2 割れ目進展スコアの試計算

割れ目進展スコアの適用可能性を検討するため、試計算を実施した。以下の検討では、1サイクルのひずみ変動の上限値を $240 \times 10^{-6}$ とし、計算に用いるパラメータは5.1節、5.2節と同一とした。

本稿では、剥落型落石の発生時期と、気象条件から算出できる割れ目進展スコアの対応関係を検討した。剥落型落石の発生時期のデータは、北海道の道路斜面で1998年から2008年間に発生した剥落型落石の発生時期を月ごとに分類したデータ<sup>16)</sup>を用いた。割れ目進展スコアは、2地点の気象データをもとにそれぞれ求めた。1つの地点は、地理的に北海道の中央に近いアメダス旭川、もう1つは集計対象となった剥落型落石の発生地点のうち約6割から50km以内の距離にあるアメダス小樽で、2地点の距離は約130kmである。剥落型落石の発生時期と比較する各月の割れ目進展スコアは、以下のように求めた。

まず、各地点のデータに関して、1998年1月から2008年12月の各月(計132か月)における期間中の割れ目進展スコアの合計を算出した後、1月~12月の各月において、1998年~2008年の11年分の平均をとり、その結果を各月の合計が1になるように正規化した。

計算した割れ目進展スコアは、旭川と小樽のどちらの地点でも概ね類似した傾向を示し(図23)、冬季(11月から3月頃)には小さい傾向にあって、5月や6月に大きくなる傾向にある。このことから、割れ目進展スコアを実際に斜面での防災対策に活用する場合に、100km程度距離が離れたアメダス測定点の気象データを用いた評価でも大きな差が生じない場合があることが示唆される。

剥落型落石の発生頻度と割れ目進展スコアの關係に着目すると、剥落型落石の発生頻度は、3月と4月を除けば割れ目進展スコアと似た変動となっている。各測定点で算出された割れ目進展スコアを比較すると、9月の落石発生件数の増加は、小樽の割れ目進展スコアでよりよく再現されている。すなわち、本検討では、より多くの剥落型落石の発生地点から近い小樽の割れ目進展スコアが、剥落型落石の発生頻度分布をよりよく再現することがわかった。ただし、剥落型落石の発生頻度のデータ数が少なく、データの統計的な信頼性が十分でないこと、集計対象となった剥落型落石の3割程度はアメダス小樽から100km以上離れた場所で発生してい

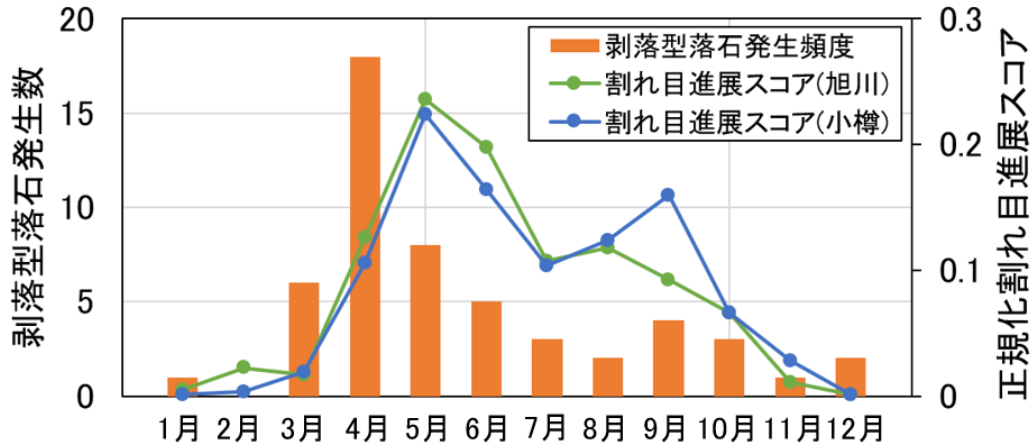


図 23 割れ目進展スコアと剥落型落石発生数の関係

て、小樽の割れ目進展スコアの変動と対応した頻度分布で発生する蓋然性が低いことには留意する必要がある。

使用した剥落型落石の発生時期データの中で、3月と4月の頻度が高いのは、融雪や凍結融解の作用によるものが含まれる<sup>16)</sup>ことの影響が考えられる。割れ目進展スコアの算出にあたっては、温度変化や乾湿変化による変形のみが考慮されており、融雪による水の供給や凍結融解による応力は考慮されていないため、乖離が生じたものと考えられる。

以上を踏まえ、割れ目進展スコアの地域による違いを考慮して、相対的な割れ目の進展しやすさの違いを把握することができると考えられる。今後、岩種による吸水特性の違いを考慮して個別の斜面における適用可能性を高める、落石発生事例のデータ収集をさらに進めて検証を行うなど、割れ目進展スコアを踏まえた、より詳細な剥落型落石の危険度評価につなげていく必要がある。また、今後、割れ目進展スコアを利用してより精度の高い剥落型落石の危険度評価を行うには、凍結融解や融雪の効果の大きさを評価し、発生する応力サイクルの一部として組み込む必要があると考えられる。

## 9. まとめ

浮き石となった岩塊が岩盤斜面から落下する剥落型落石は、割れ目を含む岩盤で発生する。剥落型落石の危険度評価の確度向上を目的として、岩石中の割れ目の進展を予測するモデルを作成することを目標に、室内試験と現地測定を実施した。得られた成果は次の通りである。

- (1) 室内試験において温度や湿度の変化に伴う岩石の変形を測定し、熱変形による急激な変形と、乾湿変化による緩慢な変形があることを明らかにした。熱変形は温度上昇時に膨張、乾湿変化による変形は湿度上昇時と温度低下時に岩石が膨張する傾向であった。さらに、岩盤斜面における現地測定でも同様の傾向であることを示した。
- (2) 多孔質材料の吸湿理論に基づき、温湿度変化に伴う岩石の変形予測式を提案し、試験結果をよく再現できることを示した。
- (3) 人工的な模擬割れ目を含む供試体を作製し、それを用いて乾湿繰り返し作用による割れ目の進展を把握できる室内試験方法を新たに考案した。さらに、既往の割れ目の進展に関する理論式に基づき、ある程度の長さの割れ目が直線的に進展した場合の試験結果を再現できる割れ目の進展速度予測式を提案した。
- (4) (2)と(3)の成果を統合し、気象変化による割れ目の進展速度予測手法を構築した。時系列気象

データを入力して得られる結果を「割れ目進展スコア」と定義し、割れ目の進展可能性を評価する指標として提案した。割れ目進展スコアは、過去の剥落型落石の月別の頻度分布と類似した傾向を示すことを確認した。

## 文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所：落石対策技術マニュアル，2019
- 2) 中島巖，根岸正光：節理構造岩盤斜面における落石の発生機構—寒冷地における岩盤斜面崩壊に関する研究（第3報）—，応用地質，Vol.35，No.3，pp.11-21，1994
- 3) 久河竜也，浦越拓野，河村祥一：気象条件の変化による岩石の割れ目進展性評価モデル，土木学会論文集，Vol.81，No.10，論文ID 25-00058，2025
- 4) Paris, P. and Erdogan, F.: A critical analysis of crack propagation laws, J. Basic Eng., No.4, pp.528-533, 1963.
- 5) Migliazza, M., Ferrero, A. M. and Spagnoli, A.: Experimental investigation on crack propagation in Carrara marble subjected to cyclic loads, International journal of rock mechanics and mining sciences, Vol.48, No.6, pp.1038-1044, 2011.
- 6) Kirane, K. and Bažant, Z.P.: Size effect in Paris law and fatigue lifetimes for quasibrittle materials: Modified theory, experiments and micro-modeling, International Journal of Fatigue, Vol.83, pp.209-220, 2016.
- 7) Jimenez Gonzalez, I. and Scherer, G.W.: Effect of swelling inhibitors on the swelling and stress relaxation of clay bearing stones. Environmental Geology, Vol.46, pp.364-377, 2004.
- 8) Eppes, M. C. and Keanini, R.: Mechanical weathering and rock erosion by climate-dependent subcritical cracking, Reviews of Geophysics, Vol.55, No.2, pp.470-508.
- 9) Collins, B. D. and Stock, G. M.: Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures. Nature Geoscience, Vol.9, No.5, pp.395-400, 2016.
- 10) 八田敏行，熊坂博夫，木下直人，安部透：天然のき裂を含む花こう岩質岩石の熱膨張特性，土木学会論文集，No.750，III-65，pp.183-191,2003
- 11) 村田敏，田中史彦，アマラトゥンガ K.S.P.，澁谷和子，内野敏剛：精白米の吸湿過程における平衡含水率の測定—初期含水率の平衡含水率に与える影響—，農業機械学会誌，第57巻，第6号，pp.45-52，1995
- 12) 気象庁：過去の気象データ検索，<https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php>（参照日：2025年11月12日）
- 13) 鶴戸口英善：熱応力問題の考え方，日本機械学会誌，Vol.65，No.525，pp.1454-1464，1962
- 14) 河村祥一，嶋本敬介，川越健：来待砂岩の強制劣化試験と強度低下速度，土木学会論文集 C(地圏工学)，Vol.77，No.4，pp.348-359，2021
- 15) ASTM E399-20: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 2020.
- 16) 日外勝仁，伊東佳彦：北海道における道路斜面災害事例の分析と崩壊履歴調査の検討，情報地質，第20巻，第2号，pp.66-69，2009