

北海道の急崖を構成する岩石の力学的特性

(Mechanical Properties of Rocks Composing Steep Slopes in Hokkaido, Japan)

藤井 義明ⁱ⁾ (Yoshiaki Fujii)
 宮下 尚志ⁱⁱ⁾ (Naoshi Miyashita)
 石島 洋二ⁱⁱⁱ⁾ (Yoji Ishijima)
 川北 稔^{iv)} (Minoru Kawakita)

キーワード：一軸圧縮強さ/引張り強さ/(破壊靱性値)/(含水)/
 ひずみ速度/凍結融解試験(IGC : F6)

1. 緒言

急崖における岩盤崩落は、時として1996年2月に豊浜トンネル坑口付近で生じたような痛ましい事故を伴う。岩盤崩落の適切な予知・予防対策に取り組むには、そのメカニズムを明らかにする必要がある。急崖における岩盤崩落の発生には、急崖背面にこれと平行または斜めに発生する開口亀裂の成長が関与している場合があると思われる。そこで本研究では、岩盤を構成する岩石の諸物性値の内で亀裂成長に対する抵抗力の指標を与える破壊靱性値や引張強度に注目し、いくつかの条件がこれらの値に及ぼす影響について調査することにした。供試岩石としては崩落事故を起こした、または、起こす危険がある急崖を構成している岩石として図-1に示すような地点から採取された豊浜水冷破砕岩、キナウシ水冷破砕岩、滝ノ沢水冷破砕岩、来岸水冷破砕岩、ルベシベツ花崗閃緑岩、新滝の潤水冷破砕岩(以上はボーリングコアとして試料を採取)を用い、参考のために支笏溶結凝灰岩についても試験を行った。

第1に破壊靱性に及ぼす乾燥状態の影響について調べた。岩盤表面では降雨、日照等により乾燥状態が変化し得る。そこで、含水状態と気乾状態の供試体について破壊靱性を求め結果を比較した。

第2に破壊靱性に及ぼす載荷速度の影響について調査した。亀裂は、応力拡大係数が破壊靱性値に達しなくともゆっくり成長することが知られている。したがって、小さな荷重でも地質学的な長期間にわたって作用すれば、急崖の安定性に関して、短時間作用する大きな荷重と同等の影響を持つ可能性が考えられる。そこで、いくつかの載荷速度で破壊靱性試験を行った。

第3に破壊靱性値に及ぼす風化変質の影響を調べた。岩盤表面近傍は風化変質により強度が低下している可能性がある。そこで、変色部とそうでない部分の破壊靱性値を求め比較した。

第4に破壊靱性値に及ぼす凍結融解の影響を調べた。北海道に位置する岩盤表面の近傍(豊浜の急崖の例では50 cm~60 cm奥まで¹⁾では凍結融解を起こしており、そこでは強度が低下している可能性がある。そこで、人為的に凍結融解を経験させた供試岩石の破壊靱性値と圧裂引張強度を求めた。

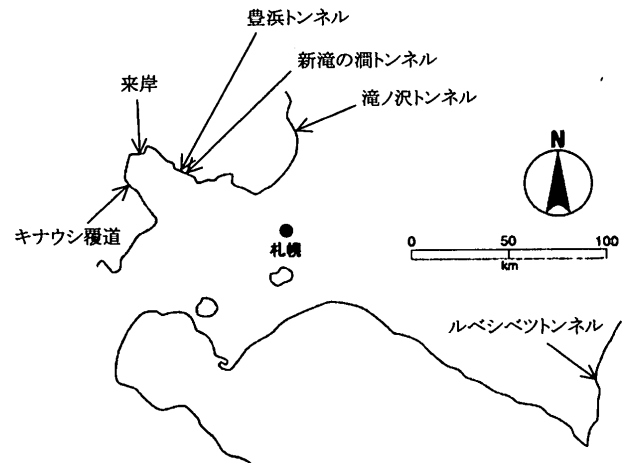


図-1 試料採取地点

2. 破壊靱性試験の方法

種々ある岩石の破壊靱性の測定法の中で、ゆっくりとした亀裂の成長を観察するにはダブルトーション法が適している。²⁾ しかしながら、本研究で用いた岩石はもろいために、ダブルトーション法で要求されるような板状供試体の作製は困難である。このために、シェブロンノッチを有する円柱形供試体を用いたレベルIの3点曲げ試験法(CB試験、図-2)を用いることにした。³⁾ 応力拡大係数 K_{CB} (MPa・m^{0.5})は最大荷重点における荷重 F_{max} (kN) から以下の式で評価される。

$$K_{CB} = A_{min} F_{max} D^{-1.5} \quad (1)$$

$$A_{min} = 0.25 \frac{S}{D} \left\{ 7.34 + 28.6 \frac{a_0}{D} + 39.4 \left(\frac{a_0}{D} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここで、 D (cm)は供試体の直径である。文献3に則って、0.25 MPa・m^{0.5}s⁻¹以上の載荷速度、あるいは、載荷開始から10 s以内で最大荷重に達した場合には得られた K_{CB} 値を破壊靱性値 K_{IC} とみなした。本方法では、亀裂がある程度成長した段階で破壊靱性値を評価するので値にはノッチの厚みが影響しない。しかしながら、この破壊靱性値にはプロセスゾーン(亀裂先端の微視割れ領域)の影響が含まれるため真の値よりも小さくなり、誤差の大きさはプロセスゾーンの大きさと正の相関関係を有することが知られている。プロセスゾーンの寸法 r_p は平面ひずみ状態の仮定の下で破壊靱性値 K_{IC} 、降伏応力 σ_{ys} を用いて以下の式で見積もられる。⁴⁾

ⁱ⁾ 工博 北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻助教授

ⁱⁱ⁾ 工修 北海道開発コンサルタント防災対策室技師

ⁱⁱⁱ⁾ 工博 北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授

^{iv)} 正会員 工博 北海道開発コンサルタント防災対策室室長

(2000. 7. 28 原稿受付・討議期限 2003. 1. 1. 要請があれば1ヶ月の期限延長可能)

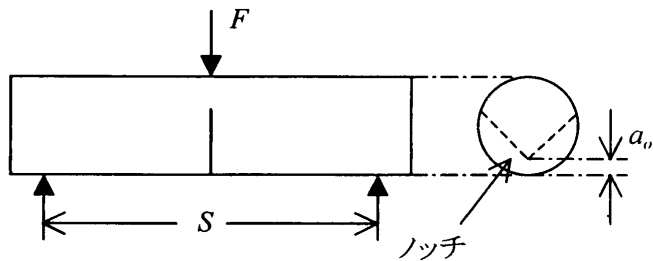


図-2 CB試験片

表-1 破壊靱性値・圧裂引張強度・プロセスゾーン寸法の推定値（括弧内は空気中における測定値、載荷速度等詳細についてはそれぞれの試料に関する実験結果を参照されたい）

供試体	破壊靱性値 (MPa m ^{0.5})	圧裂引張強度 (MPa)	プロセスゾーン寸法 (mm)
豊浜水冷破碎岩	0.18 (0.22)	0.35 (1.43)	14.9 (1.3)
キナウシ水冷破碎岩	0.39 (0.82)	1.01	8.4
滝ノ沢水冷破碎岩	0.17	0.51	6.3
来岸水冷破碎岩	0.29	1.18	3.4
ルベシベツ花崗閃緑岩	2.6	10.1	3.7
新滝の澗水冷破碎岩	0.029	0.08	7.4

表-2 豊浜水冷破碎岩の物性値（3個の供試体に関するデータを示す）

	気乾状態	含水状態
一軸圧縮強度 (MPa)	7.8, 12.7, 12.9	3.7, 3.8, 4.6
ヤング率 (GPa)	2.1, 4.2, 5.1	1.5, 1.9, 2.1
圧裂引張強度 (MPa)	0.9, 1.5, 1.9	0.24, 0.38, 0.44

$$r_p = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3)$$

(3)式において降伏応力の代わりに圧裂引張強度を用いて評価したプロセスゾーン寸法 r_p は表-1のようであった。評価されたプロセスゾーン寸法はいずれの岩石についても小さくない。したがって、ここで示す破壊靱性値の評価精度は高くなく、オーダーを与える程度と判断される。しかしながら、含水、載荷速度、風化変質、凍結融解等が破壊靱性値に与える影響を定性的に検討する上では問題ないものと考えられる。

3. 破壊靱性値に及ぼす乾湿と載荷速度の影響

3.1 豊浜水冷破碎岩の試験結果

豊浜トンネル近傍の急崖を構成する地質は、安山岩質の水冷破碎岩からなる新第三系中新統の尾根内層であり下位よりユニット I~IV に4区分される。⁵⁾ 試料はボーリング No. B 16 号孔の 2.3 m~20.3 m 部分(ユニット I)から採取した(図-3)。なお、ボーリング孔位置や地質、薄片写真等の詳細については、文献5等を参照されたい。

岩石全体の特徴は以下のようである。岩石は主として黒色から暗褐色をした径 2 mm~30 mm の玄武岩質の両輝石安山岩片から成り、斜長石斑晶が散在する。微少量の普通輝石および紫蘇輝石を含む。石基はハイアロオフィティック〜ガラス基流晶質で発泡著しい破片が多い。帯緑灰色を呈する基質は同質の微細な火砕物であるが

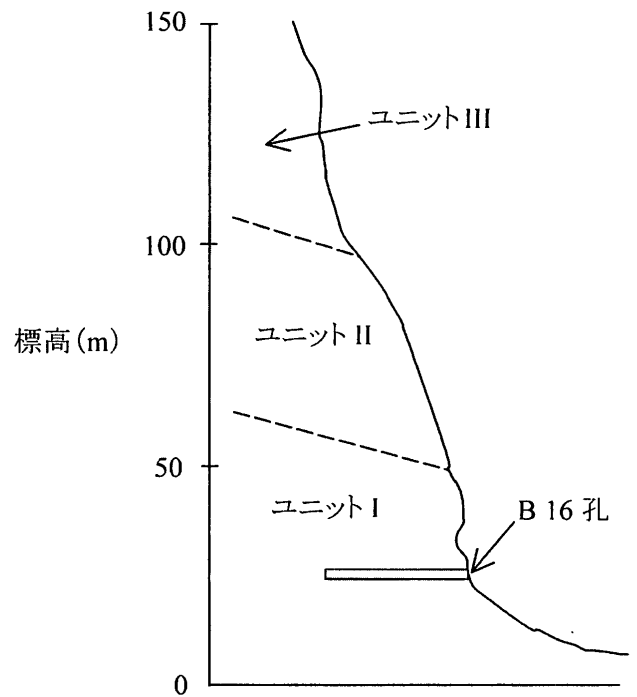


図-3 豊浜トンネル近傍の断面図と B16 孔位置

変質し、基質や岩片の石基には微細な不良結晶度のスメクタイト(モンモリロナイトを多く含む粘土鉱物)が多量に生成している。このため両手で破壊できる程度にもろい。比較的ガラスに富む岩片が多いため、やや再移動した水冷破碎岩であると考えられる。薄片製作上は油擦りでなく、かろうじて水擦りで製作可能であった。岩片や鉱物片の間(基質)に水酸化鉄鉱物が微量生成している。

かさ比重は1.97、有効間隙率は16.7%であった。変位速度 5×10^{-6} m/s の下で得られた一軸圧縮強度と圧裂強度を表-2に示す。一軸圧縮試験では直径 50 mm、長さ 100 mm の供試体、圧裂引張試験では直径 50 mm、長さ 50 mm の供試体を用いた。なお、両試験における気乾・含水状態の供試体は後述する CB 試験と同様に準備した。ただし、含水状態にある供試体の試験も空気中で行った。

直径 50 mm、長さ 178 mm の CB 供試体は、気乾状態の試験に際しては 80°C で 24 時間乾燥し、その後約 23°C の室内に 12 時間放置した。含水状態の試験では、供試体を真空ポンプを用いて脱イオン水中にて 24 時間脱気し、さらに供試体を透明なアクリル水槽に満たした脱イオン水中に沈めて 24 時間放置してから載荷した。試験中はエアコンにより気温を約 23°C に保った(湿度は約 58%)。ボーリングコアの方向が不明なため、亀裂の進展方向をそろえることはできなかったものの、なるべく同程度の深度のボーリングコアを選び、シェブロンノッチは可能な限り基質部を選んで入れた。CB 試験における荷重-ストローク曲線の例を図-4に示す。線図の全体の形状に関する載荷速度の影響は小さい。気乾状態での試験では供試体はシェブロン部から破断したが、含水状態での試験では破断面の凹凸が激しくシェブロン部を逸脱する場合があった。シェブロンノッチではない部位から亀裂が初生することもあったが、このような場合には試験が失敗したと判断した。

K_{CB} は含水により平均で約 44% 低下し、また、載荷速度が 1 オーダー減少するにつれて 4.5% (気乾状態)、12.6% (含水状態) 低下した(図-5)。

含水状態の CB 試験において最大荷重点で載荷を中止し除荷した供試体について、シェブロンノッチに垂直に切断した断面に青色レ

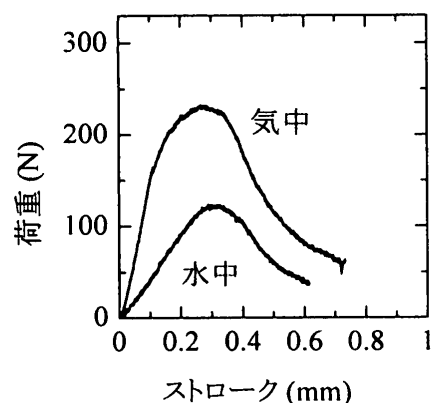


図-4 CB試験下の荷重-ストローク線図の例(豊浜水冷破砕岩, 載荷速度 1.67×10^{-8} m/s の場合)

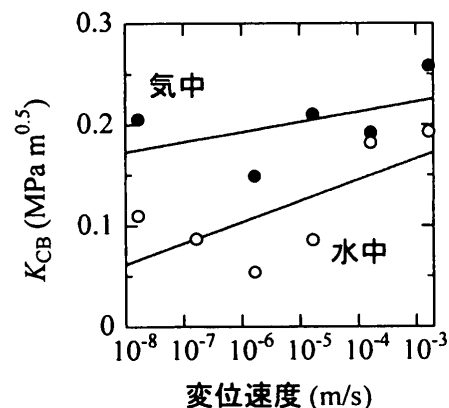


図-5 最大荷重点における応力拡大係数と変位速度との関係(豊浜水冷破砕岩)

ジンを含浸させた。この断面の薄片を作製し鏡下で観察したところ、スメクタイトは観察範囲の基質中に比較的広く分布しているのに対し、鉄の酸化物は比較的狭い範囲に分布していることがわかった(図-6)。ノッチ先端から生じた亀裂は主に基質中を伝播し、岩片や鉱物片の粒界、スメクタイト、おそらく潜在亀裂中に生成し周辺より構造的に強度が弱いと思われる鉄の酸化物の間をやや屈曲しながら4 mm程度の長さで成長している。亀裂先端は不明瞭である。

3.2 支笏溶結凝灰岩の試験結果

支笏火砕流堆積物が強溶結した当該岩石は、灰色で孔隙が発達している。岩片・鉱物片：基質：空隙の割合は25:40:35程度である。岩片・鉱物片として、板状～Y字状のガラス片(バブルウォールタイプ：長径0.1 mm～0.5 mm)が最も多量に存在するが、溶結によるガラスの成長や他のガラスとの融合等のため初生形態が不鮮明になっている。次に長径0.5 mm～5 mmの楕円形をした軽石(繊維状のガラスが主体)が多い。またシルト岩片(長径0.5 mm～5 mm)も顕著である。少量の輝石安山岩片(班晶は斜長石と普通輝石)や普通角閃石、普通輝石も含まれている。基質は径0.1 mm前後の微細なガラス片や不透明鉱物からなっている。

直径50 mm、長さ178 mmの供試体に関するCB試験の結果には多少のばらつきがみられるものの、両状態下とも載荷速度が小さくなるにつれ破壊靱性が減少している。また、含水状態下の K_{CB} は気乾状態の値に比べ平均値で約8%小さい(図-7)。

3.3 破壊靱性の含水に伴う低下の原因

豊浜水冷破砕岩と支笏溶結凝灰岩の場合、 K_{CB} は含水に伴いそれぞれ約40%、約8%低下した。大谷石の一軸圧縮強度は、自然含水状態下が一番大きく、強制乾燥してもさほど変化せず、一度乾燥した後含水させると、自然状態の約20%～50%に低下する。⁶⁾したがって、ここで示した含水状態下の強度は自然含水状態下のものよりも小さい可能性がある。ただし、岩盤表面で起こるように乾湿の繰り返しを受ける場合には、含水による強度低下が生じ得る。

藤田ら⁷⁾は白浜砂岩について本研究と同様の試験を行い、 K_{CB} が含水により70%～80%低下することを示し、原因として、(1)応力腐食(引き伸ばされた原子間結合において切断速度が大きい現象、⁸⁾(2)水分子付着による鉱物粒子の表面エネルギー低下、⁹⁾(3)充填物質である粘土鉱物(イライト)の含水による強度低下を挙げている。含水に伴う強度低下は主に石英粒子や長石粒子の結合により強度を発現していると考えられる花崗岩で約20%、¹⁰⁾主に溶結によりその強度を発現していると考えられる支笏溶結凝灰岩で約8%であった。これらの岩石は充填物質としての粘土鉱物をほとんど含まな

いので強度は主に原因(1)、(2)により低下していると思われる。したがって原因(1)、(2)の寄与は8%～20%程度と推定される。白浜砂岩や豊浜水冷破砕岩の含水による強度低下量はこれより大きく、その原因は(3)に帰すると考えられる。ただし豊浜水冷破砕岩の場合に充填物質としてイライトではなくスメクタイトが検出されている。スメクタイトは層間水を取り込み膨潤することが知られており、条件にもよるが膨潤圧は1 MPa以上に達する。¹¹⁾水中の試験において亀裂の成長に伴いスメクタイトが新たに膨潤することがあれば、スメクタイト粒子周囲に接線方向の引張応力が生じるので、新しい亀裂が生じたり、既存の亀裂が成長したりして強度の低下を招く可能性は十分にあり得る。

3.4 破壊靱性の載荷速度依存性の原因

豊浜水冷破砕岩、支笏溶結凝灰岩のいずれも K_{CB} は載荷速度とともに大きくなっているが、同様の傾向は多数報告されている。例えば、文献7では白浜砂岩について同様の現象を認め、原因として、(1)応力腐食、(2)負の間隙水圧(サクション)、(3)プロセスゾーン寸法、(4)充填物質である粘土粒子強度の載荷速度依存性を挙げている。

文献7の白浜砂岩や本研究の豊浜水冷破砕岩では、横軸を載荷速度の対数、縦軸を K_{CB} (あるいは K_{CB} の対数)としたときの回帰直線の傾きが含水により大きくなっている。亀裂速度が載荷速度と正の相関関係にあると仮定すれば、これらの実験結果は含水により応力腐食指数が小さくなることを意味し、ダブルトーション試験結果のうちいくつかでみられる、湿度が高くなると応力腐食指数が小さくなる現象、¹²⁾と調和的である。ところが、支笏溶結凝灰岩では傾きはむしろ含水により小さくなっているし、文献10の花崗岩のデータでは、水中における試験の載荷速度が一番速いデータ1つを除けば(このデータでは、有効空隙率は小さいため、載荷速度がある限度よりも速い場合には亀裂先端への水の供給が十分でなくなる現象が反映されているものと考えられる)、含水による傾きの変化はみられない。

上記の差異の原因として、充填物質である粘土粒子の多寡を挙げることができる。含水している粘土粒子は特徴的な粘性変形を示すと考えられ、載荷速度が小さい場合には特に変形に必要な応力が小さくなるであろう。したがって、粘土粒子を多く含む白浜砂岩や豊浜水冷破砕岩では、特に載荷速度が小さい場合、 K_{CB} が含水により低下したのと考えられる。

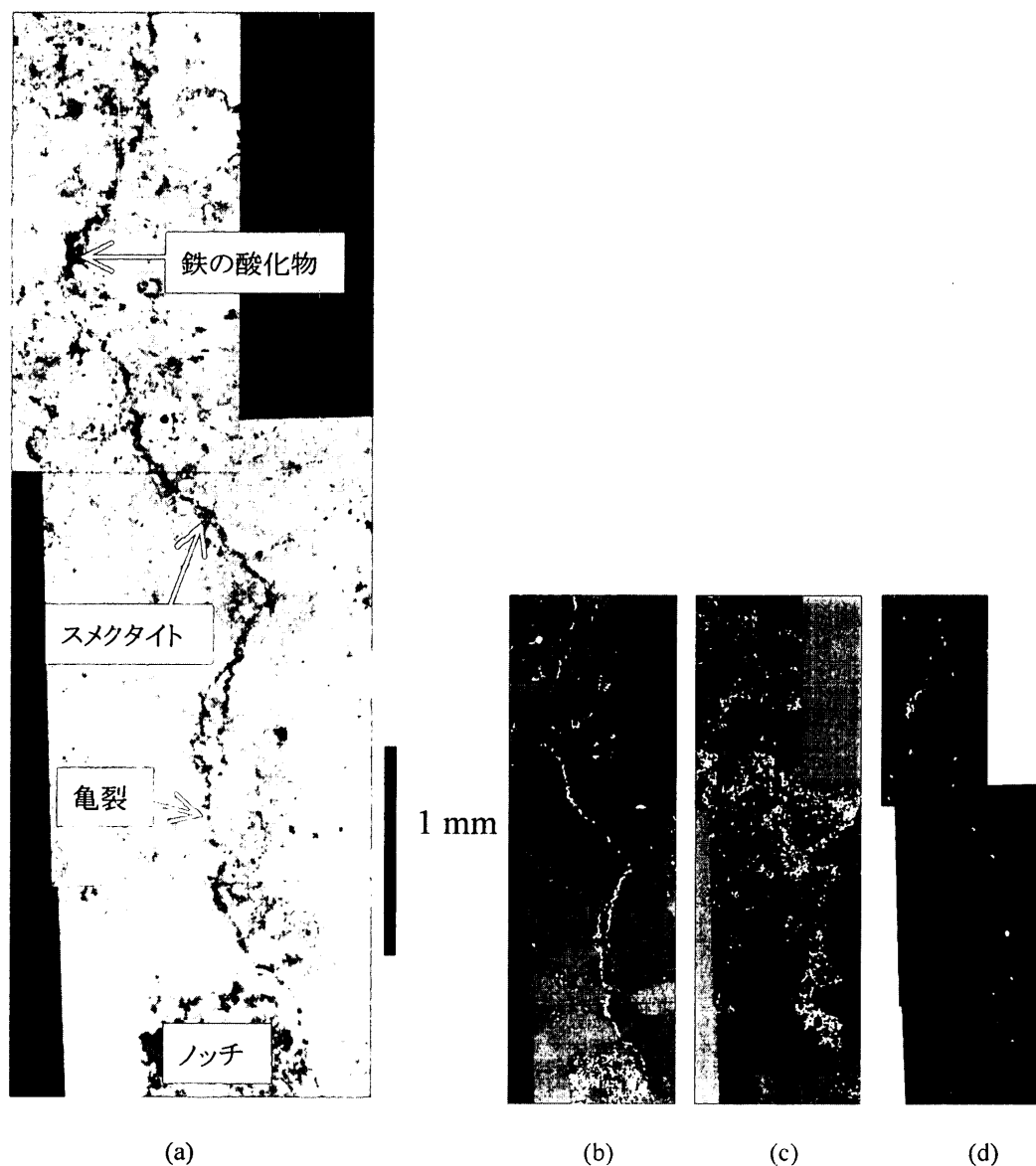


図-6 CB試験で幅約0.5 mmのノッチの先端から成長した亀裂の様子(亀裂を見やすくするために切断面に青色の着色レジンを含浸させた, 豊浜水冷破碎岩)
(a): 通常の偏光顕微鏡写真, (b)~(d)は画像処理によりそれぞれ, 青色のレジン, スメクタイト, 鉄の酸化物に類似した色の画素を取り出し白色で, それ以外の画素を濃色で示したもの

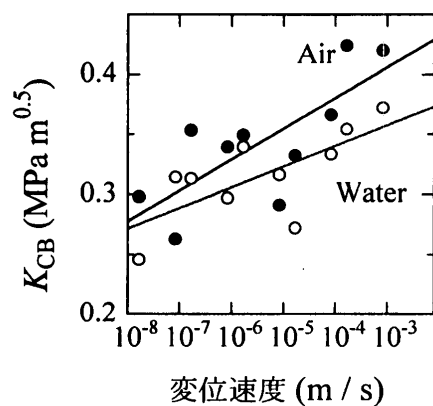


図-7 最大荷重点における応力拡大係数と変位速度との関係(支笏溶結凝灰岩)

4. 破壊靱性値に及ぼす風化変質の影響

4.1 キナウシ水冷破碎岩の試験結果

キナウシ水冷破碎岩の試料は一般国道229号神恵内村キナウシにおいて崖の上から斜め下の崖面に向けて行われたA-B-2孔と名付けたボーリングの深度10 m~15 m, 25 m~35 m, 50 m~55 mからコアとして採取した(採取位置の詳細や薄片写真については文献13を参照されたい。以下に述べる岩石についても同様)。ボーリング深度10 m~15 mは地表近傍, 25 m~35 mはほぼ地山, 50 m~55 mは崖面近傍に対応する。深度10 m~15 mのボーリングコアは部分的に赤褐色に変色し, 深度25 m~35 mと深度50 m~55 mのボーリングコアは比較的新鮮にみえる。

深度25 m~35 mの試料は細礫を含む灰白色の水冷破碎岩であり, デイサイト~角閃石安山岩質の岩片・鉱物片を多数含む。鉱物片は多いものから次の順になっている: 火山ガラス・デイサイトの集班晶・斜長石・褐色普通角閃石>普通輝石・不透明鉱物>紫蘇輝石。この中に急冷周縁相をもつ丸みを帯びた黒色の普通輝石玄武岩

表-3 キナウシ水冷破碎岩の物性値（かさ比重と有効間隙率は1つの供試体に関する計測値、その他は水中にて試験した2～4個の供試体に関するデータ）

	10 m～15 m	25 m～35 m	50 m～55 m
かさ比重	1.97	1.97	2.03
有効間隙率 (%)	24.8	24.0	21.4
一軸圧縮強度 (MPa)	14.8, 21.4	6.9, 7.4, 8.0, 10.7	15.4, 16.5
ヤング率 (GPa)	8.9, 10.0	2.3, 2.7, 3.6, 5.7	5.4, 9.8
圧裂引張強度 (MPa)	0.55, 1.83, 3.42	0.27, 0.44, 0.77, 0.83	0.81, 1.20

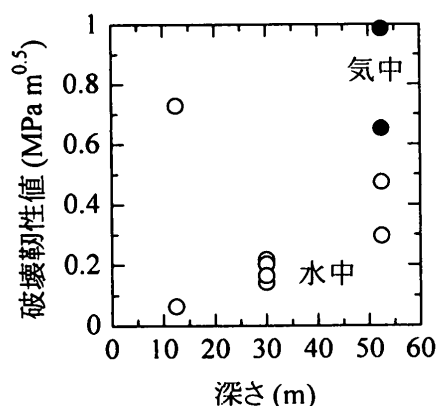


図-8 破壊靱性値と試料の採取深度との関係(キナウシ水冷破碎岩)

(最大径2 cm)が散在する。基質は、上述した鉱物の破片と微細なガラス片等塵芥状物質からなるが、ガラスは変質し、スメクタイトや微細な珪長質鉱物(石英・クリストバライト・トリディマイトの可能性)を生じている。なお、上述の火山ガラスは丸みを帯び、径0.02 mm～0.1 mmであるが変質し、珪長質鉱物に交代されている。火山ガラス片の粒間にはスメクタイトが多数分布している。

深度10 m～15 mの試料の特徴は非変色部とはほぼ同様であるが、ガラス片は、中心がスメクタイトに交代され、周辺が微細なスメクタイトに交代されるものと、全体がスメクタイトに交代されるものがあり、不良結晶度のスメクタイトがより多く分布している。

一軸圧縮試験や圧裂引張試験等で得た物性値を表-3に示す(かさ比重と有効間隙率は気乾状態下の値で、その他は含水飽和状態下の値である)。

4.2 実験結果

前述の3つのグループ毎に直径50 mm、長さ178 mmの供試体を数個ずつ作製し、含水状態でCB試験に供し破壊靱性値を評価した。載荷速度は 1.67×10^{-3} m/sとし、時間依存割れの影響が小さくなるようにした。また、50 m～55 mのグループに属する供試体については気乾状態下でのCB試験にも供した。

深度10 m～15 mのグループに属する供試体の中に、シェブロンノッチ先端以外から亀裂が成長したものが1個あったが、この供試体の破断面は著しく変色していた。図-8に破壊靱性値と深度との関係を示す。含水状態下の破壊靱性値は気乾状態下の値に比べて平均値で53%小さい。この原因は豊浜水冷破碎岩と同様と考えられる。表-3から深度25 m～35 mグループに属する供試体の一軸圧縮強度・ヤング率・圧裂引張強度はいずれも小さいことがわかる。データ数が少なく、かつ、ばらつきが大きいものの、破壊靱性値のデータにも同様な傾向がみられる。すなわち強度に及ぼす風化変質の影響を定量的に表すことはできなかった。この原因として、供試

体作製上の都合から比較的健全な部分を選んでサンプリングしたことなどが考えられる。

5. 破壊靱性値に及ぼす凍結融解の影響

5.1 実験方法

滝ノ沢水冷破碎岩、来岸水冷破碎岩、ルベシベツ花崗閃緑岩を試料として用いた。直径50 mm、長さ178 mmの供試体は脱イオン水にて24時間真空ポンプで脱気した後、室温約23°Cの実験室に置いた脱イオン水槽中で48時間以上放置し、その後凍結融解サイクルに供した。

凍結融解はASTMで奨励されているコンクリートの試験方法¹³⁾を参考に、以下のような方法で実施した。まず作製した供試体を湿らせたガーゼで包んだ後、バットに置き、凍結融解槽にセットした。バットには2日に一度脱イオン水を補給した。次に槽内の温度を+5°C～-20°Cの間で繰り返し変化させた。この時最低、最高温度を1時間保ち、昇温、降温は共に25°C/hで行った。試料内部の温度は実測していないものの、後述するように凍結融解サイクル中にいくつかの供試体が破断したので、少なくとも供試体が凍結・融解を繰り返したことは確かである。1サイクルに4時間要するので1日に6サイクルだけ進行する。20サイクル毎に恒温槽から取りだし含水状態下のCB試験に供した。

載荷速度としてルベシベツ花崗閃緑岩では 1.67×10^{-4} m/s、他の岩石試料では 0.833×10^{-3} m/sを採用した。また、CB試験で2つに破断した試験片から直径50 mm、長さ50 mmの円柱形供試体を作製し、含水飽和状態下の供試体の圧裂引張試験を気中で実施した(載荷速度は 5×10^{-6} m/s)。

5.2 滝ノ沢水冷破碎岩の実験結果

滝ノ沢水冷破碎岩は径1 mm～10 mmの暗灰色で班晶の少ない両輝石安山岩角礫主体で基質は帯褐色を呈し、同質物質の破片や水酸化鉄鉱物からなる。ただし基質は量が少ない。岩片は全て同質の両輝石安山岩で、班晶は斜長石、次いで、普通輝石・紫蘇輝石が多い。石基はガラス基流晶質で、ガラスは残存しているものが多い(一部は変質している)。基質は同質物質の大小の破片からなるが、微細な不良結晶度スメクタイトを生じている。微細な珪長質鉱物も少量生成し、また、局所的に水酸化鉄鉱物が生成している。試料はB-3孔の深さ1.2 m～8.9 mから採取した。

かさ比重は2.16、有効間隙率は14.5%である。2つの供試体を湿润状態で試験し、圧裂引張強度として0.63 MPaと0.39 MPaが得られた。

供試体数が少ないので、凍結融解を受けない場合と、サイクル数が10回と100回の場合について破壊靱性値を測定した。凍結融解のサイクル数100回に供した3本の供試体の内1本が、凍結膨張のため恒温槽内で破壊した。また、シェブロン部で破壊が起こらず破壊靱性値が評価不可能になったものがあった。評価可能だった供試体についての試験結果を図-9に示す。破壊靱性値は凍結融解サイクル数が増加するとともに低下しているようにも見えるが供試体数が少ないので断定はできない。

圧裂引張試験ではCB試験より多くの試験結果が得られ、凍結融解の回数に伴う圧裂引張強度の低下が確認できた(図-10)。

5.3 来岸水冷破碎岩の実験結果

来岸水冷破碎岩は、褐色の基質に、寸法が火山礫炭灰岩と同程度の暗灰色～褐色の岩片が散在している水冷破碎岩である。岩片・鉱物片には多い順に紫蘇輝石普通角閃石普通輝石安山岩・斜長石>普通角閃石(褐色)>普通輝石・火山ガラス>石英>黒雲母・紫蘇輝石・不透明鉱物が認められる。火山ガラスの破片中には長柱状の斜

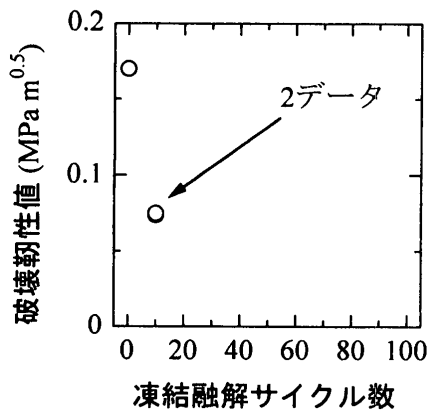


図-9 破壊靱性値と凍結融解の繰り返し回数との関係(滝ノ沢水冷破砕岩)

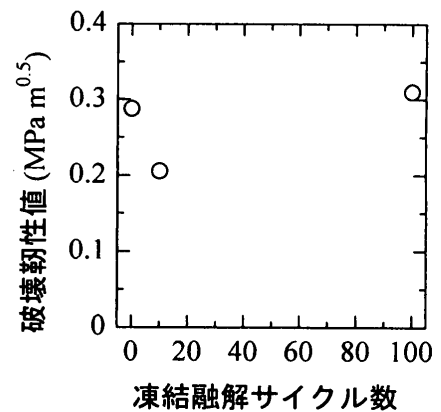


図-11 破壊靱性値と凍結融解の繰り返し回数との関係(来岸水冷破砕岩)

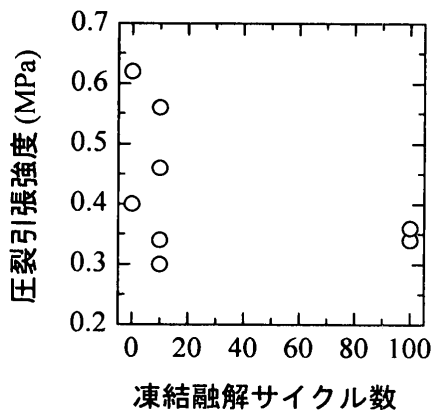


図-10 圧裂引張強度と凍結融解の繰り返し回数との関係(滝ノ沢水冷破砕岩)

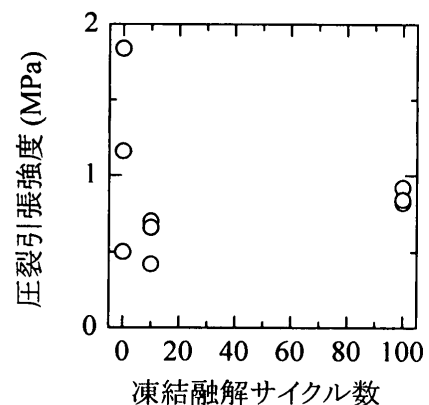


図-12 圧裂引張強度と凍結融解の繰り返し回数との関係(来岸水冷破砕岩)

表-4 来岸水冷破砕岩の物性値(水中にて試験した3個の供試体に関するデータ)

一軸圧縮強度 (MPa)	3.8, 8.6, 11.9
ヤング率 (GPa)	1.2, 5.7, 7.4
圧裂引張強度 (MPa)	0.51, 1.17, 1.85

長石等の結晶が少量生成している。基質は上述鉱物の微細破片からなる。火山ガラスは変質し、微細な珪長質鉱物と不良結晶度のスメクタイトを生じている。試料はB-2孔の深さ5.4 m~11.5 mからサンプリングした。

気乾状態のかさ比重は1.90、有効間隙率は26.1%である。一軸圧縮試験、圧裂引張試験で得られた物性値を表-4に示す。

滝ノ沢水冷破砕岩と同様の試験方法を採用した。凍結融解のサイクル数10回と100回を経て取り出した2本の供試体のうち各1本が恒溫槽内で破壊していた。また、シェブロン部で破壊が起こらず破壊靱性値が評価不可能になったものがあった。図-11に示した破壊靱性値と凍結融解の回数との関係から破壊靱性値に及ぼす凍結融解の影響は認められない。凍結融解を経験した供試体の圧裂引張強度の平均値は、未経験のもの50%~73%の大きさを示した(図-12)。

凍結融解後の岩石の薄片写真を図-13に示す。凍結融解前と岩石の特徴には変わらないが、微細な開口亀裂が生じている。

5.4 ルベシベツ花崗閃緑岩の実験結果

2号孔からサンプリングしたが、風化変質の著しい部位はサン

リング不能であり、深さ8 m~16 mからのみ試料を得た。当該岩石はゴマ塩状を呈する灰色の完晶質岩で、通常の花崗岩類に比べて柱状の斜長石が多い(卓状のものは少量)のが特徴である。初生鉱物の組み合わせは、斜長石>石英・カリ長石>黒雲母>不透明鉱物>スフェーンである。不透明鉱物が1%~2%も含まれること、スフェーンを含むことなどから、磁鉄鉱系列の花崗岩類と考えられる。変質鉱物は全体の1%程度と見積もられ少ない。緑泥石が黒雲母の一部を置換し、絹雲母が斜長石を斑点状に交代している。炭酸塩鉱物細脈も認められる。

気乾状態のかさ比重は2.62、有効間隙率は0.7%である。湿潤状態下の一軸圧縮強度、ヤング率、圧裂引張強度はそれぞれ150.1 MPa、22.2 GPa、10.1 MPaである。

試験方法は滝ノ沢水冷破砕岩や来岸水冷破砕岩と同じである。凍結膨張による破壊はみられなかった。破壊靱性値は図-14のようになった。この図において変色した弱面から破断した供試体は黒丸で示した。凍結融解の影響は判然としない。

比較的風化変質の影響を受けていないところを選択して供試体を作製し圧裂引張試験に供した試験結果を示した図-15からわかるように圧裂引張強度は凍結融解によりやや低下する傾向がみられる。

5.5 凍結融解に関するまとめと考察

岩石の強度に及ぼす凍結融解の影響をまとめると以下のようになる。

(1) 滝ノ沢水冷破砕岩では凍結融解サイクル100回を受けた3本のうち1本が破断した。破壊靱性試験では凍結融解の影響を確認できなかったが圧裂引張強度は凍結融解により低下した。

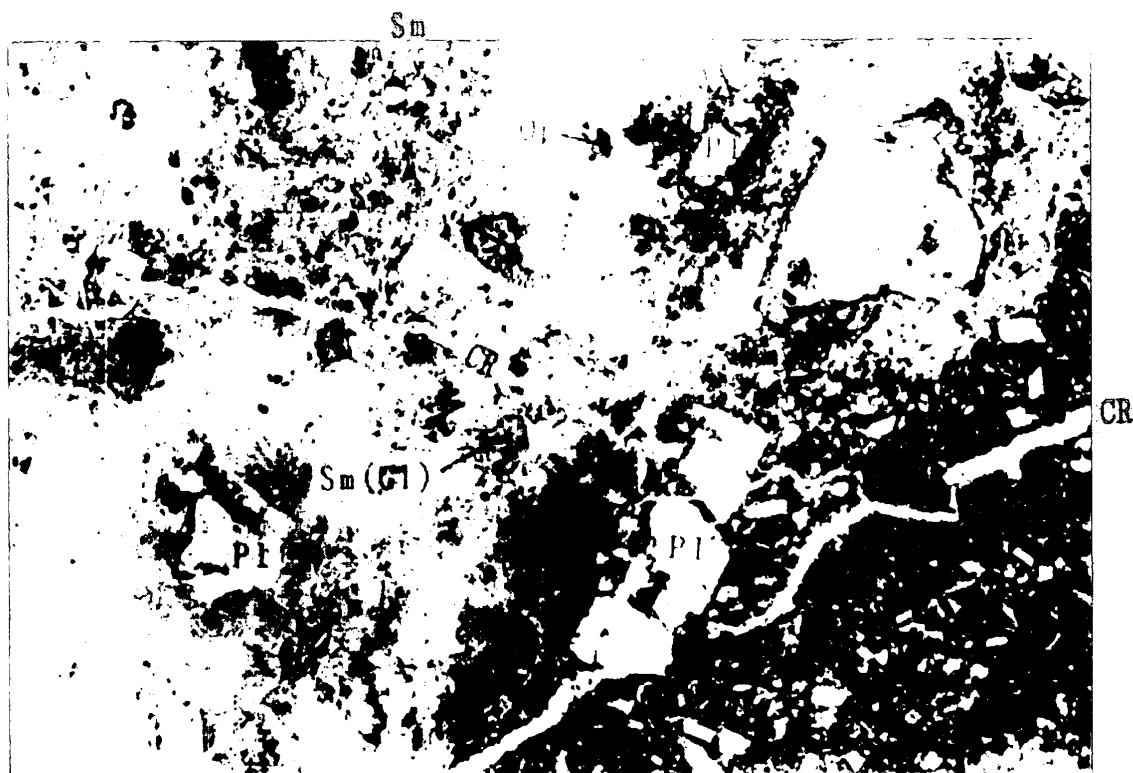


図-13 来岸水冷破碎岩(横幅2.8 mm, 凍結融解後)
CR: 開口亀裂, Pl: 斜長石, Sm: スメクタイト, Op: 不透明鉱物

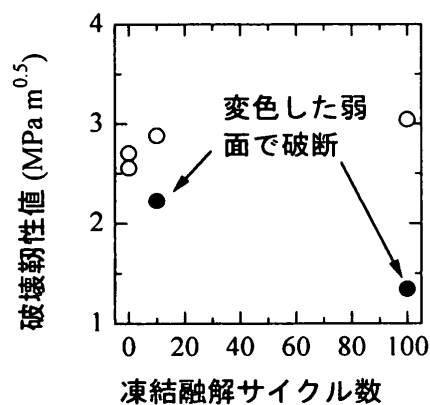


図-14 破壊靱性値と凍結融解の繰り返し回数との関係(ルベシベツ花崗閃緑岩)

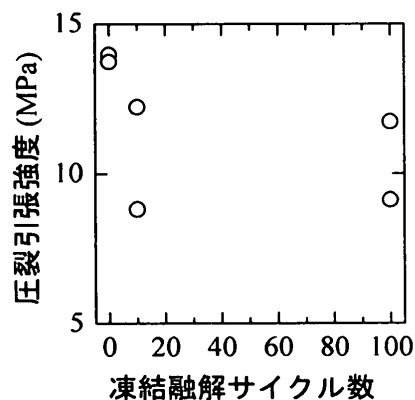


図-15 圧裂引張強度と凍結融解の繰り返し回数との関係(ルベシベツ花崗閃緑岩)

表-5 岩石試料の有効間隙率

岩石	有効間隙率(%)
来岸水冷破碎岩	26.1
滝ノ沢水冷破碎岩	14.5
支笏溶結凝灰岩	33.0
ルベシベツ花崗閃緑岩	0.7

(2) 来岸水冷破碎岩では凍結融解サイクル数10回, 100回を受けた各2本のうちそれぞれ1本が破断した。破壊靱性試験では凍結融解の影響を確認できなかったが圧裂引張強度は凍結融解により低下した。

(3) ルベシベツ花崗閃緑岩では凍結融解による破断はなかった。破壊靱性試験では凍結融解の影響を確認できなかった。圧裂引張強度は凍結融解によりやや低下した。

凍結融解による岩石の劣化は、間隙水の凍結膨張による亀裂の生成・成長に起因するものと考えられる。¹⁴⁾ この現象がはなはだしい場合には供試体は破損し、そうでない場合でも、供試体内に亀裂が生じるであろう。ここには示さなかったが、支笏溶結凝灰岩の試験結果は次のようである。すなわち、岩石は凍結融解により破断しなかったが、破壊靱性値、圧裂引張強度ともに凍結融解の影響を受けることがわかった。以上から、凍結融解の影響の程度は次の順であると判断される。

来岸水冷破碎岩 > 滝ノ沢水冷破碎岩 > 支笏溶結凝灰岩 > ルベシベツ花崗閃緑岩

これら試料の有効間隙率は表-5のようであり、有効間隙率の大きさと凍結融解の影響の程度は一致しない。この原因として以下が考

えられる。

(1) 表に示した有効間隙率は試料全体の値であり、水冷破碎岩の基質部の有効間隙率は同表中の値よりも大きいものと思われる。

(2) 浸透率が大きい場合に凍結圧が生じにくくなる可能性がある。

6. 結 論

北海道の急崖を構成する岩石について種々の環境下での破壊靱性と圧裂引張強度を調査した。主な知見を以下に示す。

(1) 急崖を構成する岩盤の強度

一軸圧縮試験、圧裂引張試験、CB 試験等を行い、急崖を構成する岩石の強度等を調査した。試験に供した水冷破碎岩類の破壊靱性値は $0.02 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5} \sim 0.4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 、一軸圧縮強度は $4 \text{ MPa} \sim 18 \text{ MPa}$ 、圧裂引張強度は $0.35 \text{ MPa} \sim 1.01 \text{ MPa}$ であった(各供試体毎の平均値による)。

(2) 乾湿の影響

豊浜水冷破碎岩の破壊靱性は含水により約44%低下し、含水の影響は載荷速度が小さい場合に大きかった。キナウシ水冷破碎岩については含水状態下の破壊靱性値は気乾状態下の値に比べて平均値で53%小さかった。一方、支笏溶結凝灰岩の破壊靱性値の含水による低下は8%であった。

(3) 破壊の時間依存性

豊浜水冷破碎岩の破壊靱性は、載荷速度1オーダーの減少につき空気中・水中でそれぞれ4.5%、12.6%低下した。

(4) 風化変質の影響

各深度から採取したキナウシ水冷破碎岩については、スメクタイト含有量が地表付近で大きいことを鏡下で定性的に確認したものの、破壊靱性値に及ぼす風化変質の影響を定量的に表すことはできなかった。

(5) 凍結融解の影響

滝ノ沢水冷破碎岩・来岸水冷破碎岩・ルベシベツ花崗閃緑岩について凍結融解を経験した供試体の材料試験を行った。いずれの岩石でも凍結融解に伴う破壊靱性値の低下をはっきりと確認することはできなかったものの、圧裂引張試験では凍結融解による強度低下が確認できた。

破壊靱性値や引張強度は亀裂成長に対する抵抗力の指標であり、岩盤斜面の変形・破壊挙動を解析する際の重要な入力データである。本研究により北海道の急崖を構成する岩石の破壊靱性値や引張強度、ならびに、それらに対する諸条件の影響がある程度明らかにされたので、岩盤崩落の発生メカニズムに関して従来よりも正確な検討が可能になるものと期待される。

謝 辞

本研究は、地盤工学会岩盤崩落の機構解明と計測技術に関する研究委員会の研究活動の一部として実施された実験にいくつかの実験結果と考察を加えまとめたものである。岩石試料や各種資料を提供いただいた北海道開発局、ならびに、多大なアドバイスをいただいた研究委員会委員各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 福田正己・播磨屋敏生・原田鉦一郎(1996): 岩石の凍結-融解による風化が基盤崩落に与える影響について, *月刊地球*, **18** (9), 574-578.
- 2) 佐野修(1988): ダブルトーション法による岩石内のクラック進展現象の異方性に関する実験的研究, *材料*, **37** (143), 46-52.
- 3) ISRM (1988): Suggested methods for determining the fracture toughness of rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **25**, 71-96.
- 4) 日本材料科学会(1992): 破壊と材料, 裳華房.
- 5) 地盤工学会北海道古平町国道229号岩盤崩落調査委員会(1997): 北海道古平町国道229号岩盤崩落調査委員会報告書, 地盤工学会.
- 6) 横山幸満・今泉繁良・上野勝利・水沼孝恵(1997): 大谷地区空洞陥没のメカニズム, *土木学会論文集*, (568/III-39), 113-123.
- 7) 藤田泰之・藤井義明・石島洋二(2000): 白浜砂岩の変形・破壊挙動に及ぼす水と載荷速度の影響, *資源と素材*, **116** (7), 565-571.
- 8) Freiman, S. W. (1984): Effects of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics, *J. Geophys. Res.*, **89** (B6), 4072-4076.
- 9) Parks, G. A. (1984): Surface and interfacial free energies of quartz, *J. Geophys. Res.*, **89** (B6), 3997-4008.
- 10) 日本機械学会編(1989): 岩石破壊力学とその応用, コロナ社.
- 11) 宇野泰章・伊藤祐子(1999): スメクタイトのイオン交換と吸水膨張特性, 平成11年度資源・素材学会春季大会講演要旨集, (II) 素材編, 40-41.
- 12) Atkinson, B. K. (1984): Subcritical crack growth in geological materials, *J. Geophys. Res.*, **89** (B6), 4077-4114.
- 13) ASTM (1975): Standard method of test for resistance of concrete to rapid freezing and thawing (C666-75), *Annual Book of A. S. T. M. Standards*, (14), 371-375.
- 14) 福田正己(1970): 凍結-融解による岩石の風化について, *地理学評論*, **43**, 408.