

凍結融解の影響による岩石の力学定数の変化

山本清仁¹・小林晃²・藤居宏一³

¹正会員 農修 京都大学研究生 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

²正会員 工博 京都大学大学院助教授 農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

³正会員 農博 岩手大学助教授 農学部農業生産環境工学科 (〒020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8)

凍結融解による岩石の力学定数の変化を一軸圧縮試験の結果で比較検討した。試料は栗橋花崗岩、船生凝灰岩、田下凝灰岩である。一軸圧縮試験ではひずみゲージにより応力-ひずみ関係を、画像処理では最大応力から破壊までのひずみ分布を計測した。その結果、栗橋花崗岩と船生凝灰岩の凍結融解前後の力学定数の変化は逆の傾向を示した。栗橋花崗岩と田下凝灰岩は脆性的になるのに対して、船生凝灰岩は延性的になった。また、画像解析による体積ひずみ分布と破壊時の亀裂を対応させると、引張領域と亀裂部が比較的一致することが判った。さらに、岩石の水分上昇観察から推定した凍結融解前後の岩石内部の亀裂変化から、応力-ひずみ関係の変化の原因は亀裂発生の状況に依存すると推定された。

Key Words : *freezing and thawing, unconfined compression test, image processing, slope failure, rock*

1. はじめに

岩盤斜面が凍結融解にさらされる地域は日本全国に分布している¹⁾。このような地域では凍結融解現象が原因となる岩盤斜面の崩壊の危険性がある。北海道豊浜トンネル崩落事故²⁾のように、岩盤斜面の崩壊は、予兆を把握することが難しい突然の破壊が生じる。これは、岩石の脆性破壊と大きな関係を持っていることが推定される。脆性破壊は岩石内部の微小な割れ目が進展するため³⁾に起こるので、岩石の破壊は岩石内部の微小な亀裂と密接な関係がある。また、空隙率の大きい岩石ほど凍結破碎を受けやすいこと⁴⁾から、岩石内部の亀裂(空隙)にある水が凍ることにより亀裂が成長(進展)することが想像できる。このような岩石の脆性挙動を把握することで、岩石がいつ破壊するかを予測できれば、岩盤斜面の崩壊予知も可能になるかもしれない。

岩石の凍結融解劣化指標について、石丸⁵⁾は、凍結融解現象による典型的なクラック(亀裂)の性状から判定基準をつくる必要がある、と指摘している。それに関連する研究成果が、菅原⁶⁾や陳ら⁷⁾によって、弾性波速度測定や AE 測定を組み合わせられて出されている。そこでは、岩石が外界と接する表層部について、凍結融解の進行速度による亀裂の形のパターンが考察されている。また、田中ら⁸⁾は、岩石内部の亀裂を定量的に把握するために、岩石の空隙に高圧で水銀を注入し、空隙径を求めている。そこで

は凍結融解による空隙径の変化と引張強度の関係について考察している。

本論では、凍結融解の影響を受けた岩石の表層部ではなく、岩石の内部を対象としている。3種類の岩石(栗橋花崗岩、船生凝灰岩、田下凝灰岩)から、ひずみゲージを貼り付けた円柱供試体を作成し、凍結融解を受けた岩石の力学定数の変化を一軸圧縮試験により観察する。また、供試体表面のひずみ分布を画像解析により観察し、破壊に至るまでのひずみ分布変化と亀裂の発生具合を比較し、有効な観察指標について検討した。さらに、一軸圧縮試験より求められた応力-ひずみ関係の変化の原因を推定するために、水分上昇試験を行い、凍結融解の有無による亀裂状況の変化を検討した。

2. 供試体および室内実験

(1) 供試体

試料は岩手県釜石鉱山産の栗橋花崗岩、栃木県宇都宮市産の船生凝灰岩および田下凝灰岩の3種類である。栗橋花崗岩は一般の花崗岩と比べ空隙率が小さく、弾性波速度が速い⁹⁾。船生と田下凝灰岩は大谷石の一種で、加工が容易なので蔵などの建材として使われる軟岩である。試料の基本物性値を表-1に示す。ここで、 ρ_b, ρ_s, n, i は、試料を2週間程度水に浸し、その飽和重量と飽和水中重量を計測し、その後炉乾燥させた試料の乾燥重量を計測して求めた。

表-1 健全な試料の基本物性値

岩種	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	有効空隙率 n (%)	吸水率 i (%)	弾性波速度 V_p (km/sec)
栗橋花崗岩	2.7	2.8	1.5	0.5	4.6
船生凝灰岩	1.7	2.0	32	19	2.2
田下凝灰岩	1.7	2.0	32	19	1.8

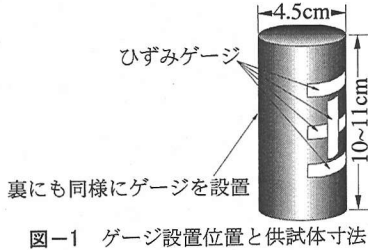


図-1 ゲージ設置位置と供試体寸法

V_p は気乾状態供試体の超音波の伝播速度で求めた。2つの凝灰岩とも堆積方向を示すような層理は観察されず、ここでは等方と仮定した。

試料塊を2つに分けて片方を健全な試料とし、残りを凍結融解試験機にかけた。それぞれの岩種について同一方向から試料塊をダイヤモンドビットでくりぬき、両端をコンクリート用の研磨機にかけて、直径約4.5cm高さ10~11cmの円柱供試体を作成した。ひずみゲージは図-1に示すように、軸方向に2箇所周方向に6箇所を設置した。上部と中部、中部と下部の周ひずみ計測ゲージの間隔は栗橋花崗岩と船生凝灰岩は4.0cmで田下凝灰岩は2.5~3.0cmである。ここで用いたひずみゲージは、共和電業製のKFG-30-120-C1-11で、これを同製の接着剤(CC-33A)を用いて、供試体に貼り付けた。一軸圧縮試験時、船生凝灰岩の供試体には石膏でキャッピングをした。また、そのときの供試体の含水比は、試験終了直後、栗橋花崗岩で0.1~0.2%、船生凝灰岩で0.8~2.8%、田下凝灰岩で2.7~3.7%である。

(2) 凍結融解

40×10×7.5cmのコンクリート製長柱を規準試料として、その中心に温度計を埋め込み、図-2に示すようにその中心温度が-18℃になるまで冷却し、試料を水で満たすことで+6℃になるまで加熱する凍結融解を行った。この冷却加熱が1回終わるのに約90分を要し、これを凍結融解1サイクルとして、各試料に240サイクル凍結融解を施した。従って、岩種の熱伝導係数および水分状態によって内部の温度履歴は岩ごとに異なるが、外部から与えた条件は同一である。そして、この条件はコンクリートの凍結融解試験⁹⁾に準じており、本邦において凍結融解事象が起こる最も厳しい自然条件である。また、サイ

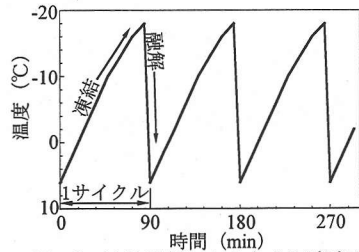


図-2 凍結融解にともなう温度変化

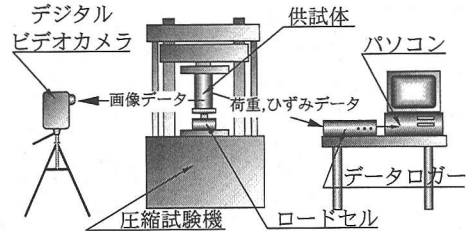


図-3 実験装置概要

クル数は田下凝灰岩の塊から供試体を採取できる限界で、これを超えた付近で岩塊は跡形もなく崩れる。凍結融解試料の形状は、栗橋花崗岩は直径22cm高さ10cmの円柱、船生凝灰岩は15×30×18cmの塊、田下凝灰岩は15×30×12cmの塊である。凍結融解を施した供試体は、この試料から凍結融解の影響が大きい試料表面を除いて、円柱供試体を採取した。

(3) 一軸圧縮試験

供試体を一軸圧縮し、ひずみゲージで破壊までのひずみと荷重を時刻と同時に荷重78.4N(8kgf)毎にパソコンに記録した(図-3)。載荷速度はダイアルゲージを用いた外部計測で1~4 μ /secである。ひずみと荷重のデータより力学定数(一軸圧縮強度、割線縦弾性係数、割線ポアソン比、軸応力-軸ひずみ関係、体積ひずみ-軸ひずみ関係、割線ポアソン比-軸ひずみ関係、割線縦弾性係数-軸ひずみ関係、割線体積弾性係数-軸ひずみ関係)を求めた。

軸応力は、各荷重の計測時刻に対応する周ひずみの全平均から補正した供試体の断面積より計算した。割線縦弾性係数(割線ヤング率)は、軸応力-軸ひずみ関係において原点と曲線上の点を結ぶ直線の勾配である。同様に割線ポアソン比は、周ひずみ-軸ひずみ曲線におけるものであり、割線体積弾性係数は、平均応力-体積ひずみ関係におけるものである。平均応力は、軸応力を3で割ったものを使用した。

周ひずみの値を用いる力学定数(体積ひずみ、割線体積弾性係数、割線ポアソン比)については、6箇所の周ひずみの値を用いたものと、中心部2箇所の周ひずみを用いたものの2通りでまとめた。6箇所の周ひずみの値を用いた場合の体積ひずみは、上

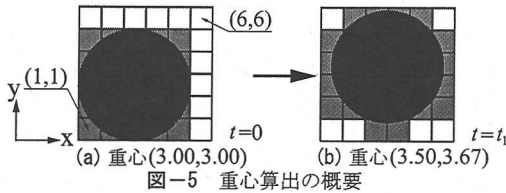
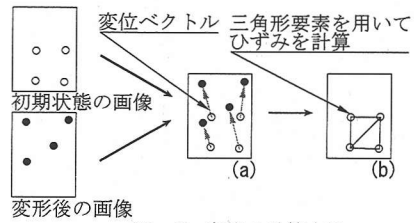
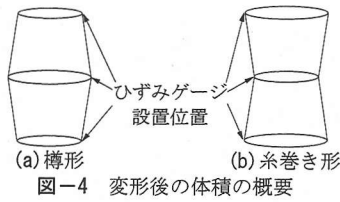


図-6 変位の計算方法

図-5 重心算出の概要

中下部それぞれ2組の周ひずみの平均と、軸ひずみの平均を用い、図-4のような形状の円錐の台形の体積として求めた。2箇所周ひずみを用いた体積ひずみは、2つの周ひずみの平均と軸ひずみの値を用い、円柱の体積を出す方法で求めた。

(4) ひずみ分布

a) 手法

ひずみ分布を求める工程は、まず画像処理で標点の座標を求め、次に有限要素法と同様に各要素のひずみを算出する。

最初に供試体表面を白または黒地に着色し、標点を設ける。これは後述の画像処理とひび割れ観察を容易にするためである。この供試体を、荷重のない状態から破壊までの間、デジタルビデオカメラで撮影する(図-3)。撮影した映像はパソコンに画像として取り込み、256階調の白黒画像にした後、標点の重心座標を抽出するために2値化を行う。そして、標点の重心を求める。図-5に重心座標の求め方の概要を示す。標点の形状が直径5ピクセルの円である場合、2値化画像は薄墨部のようなになる。この薄墨部の図形の重心を標点の重心として求める。図-5の(a)→(b)のように標点に変位したとき、変位ベクトルは(0.50, 0.67)となる。2値化と重心測定はアメリカ国立衛生研究所より無償配付されている画像解析ソフトNIHImageを用いた。

変形前と変形後の2つの供試体画像から得た節点(標点の重心)座標を重ね合わせ、2つの画像間に対応する節点間のベクトルを変位として算出する(図-6(a))。そして、変形前の画像の節点より三角形要素を作成し(図-6(b))、節点に変位を与え、各要素のひずみを出す¹⁰⁾。計算に用いた節点の数は40~66個で、節点間の距離と節点の大きさを図-7に示す。

ここでは、平面におけるひずみを算出するので、

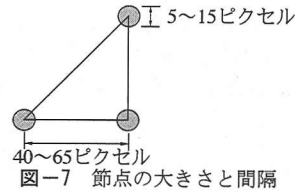


図-7 節点の大きさと間隔

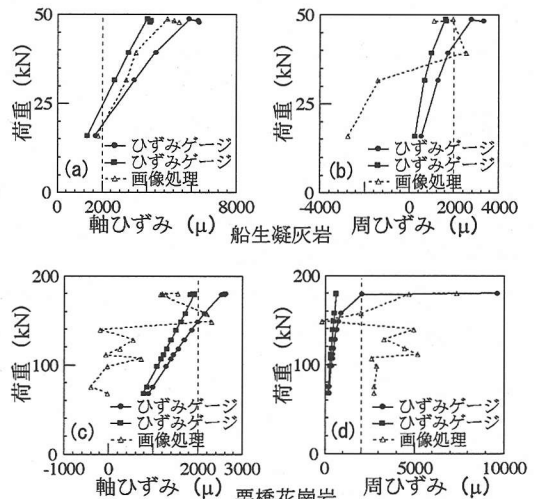


図-8 ひずみゲージと画像処理の比較

円柱供試体の曲面を平面に修正する。まず、画像の供試体半径から、画像のX座標に相当する正面からの角度を求め、その角度に半径を掛けることにより曲面を平面にする。

b) 精度の検討

ひずみゲージは1次元のひずみを測定し、画像処理のひずみは2次元のひずみなので、比較は一概にはできないが、図-8に画像処理とひずみゲージの測定結果の比較を示す。ここで、ひずみゲージの値は、測定値の最小と最大である。また、画像処理の値は、各要素でひずみと面積を掛けた値を出し、その値を総和し、全面積で割ったものである。

ひずみの値が大きい軟岩の軸ひずみ(図-8(a))では、ひずみゲージと画像処理とで良好な一致が見られる。また、ひずみの値が小さい硬岩の軸ひずみ(図-8(c))と軟岩の周ひずみ(図-8(b))では、2000μ以下では画像処理の値が小さくなり、2000μを超えると両者はだいたい同様な値になっている。

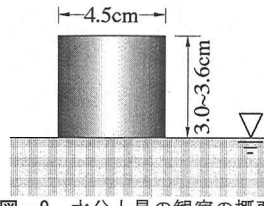


図-9 水分上昇の観察の概要

また、さらにひずみの値が小さい硬岩の周ひずみ(図-8(d))では、画像処理の値は大きくなっているが、破壊ひずみ近傍では良い一致を示している。よって、最大応力から破壊寸前までの画像処理によるひずみ分布は、大概妥当であると思われる。

(5)水分上昇の観察

インクで着色した溶液の水面に供試体底面を図-9のように接触させ、溶液の上昇を観察する。1つの試料に対し供試体が飽和と不飽和状態で、凍結融解と未凍結融解の4パターン行った。設置から5日後の供試体上面のインクの着色具合の観察を行った。

これは、不飽和供試体の場合は、毛管上昇による水分移動であり、飽和供試体の場合は、岩石中の間隙への拡散による移動を観察したことになる。従って前者は間隙の幅に関する情報が得られ、後者は間隙の量に関する情報が得られることになる。

3. 結果

(1)凍結融解の有無による物性の変化

a) 結果

弾性波速度の測定結果を表-2に示す。ここで V_p の計測法は表-1と同じである。また、計測結果一覧を表-3に示す。ここで、圧縮を正とした。供試体番号の K は栗橋花崗岩、F は船生凝灰岩、T は田下凝灰岩を表す。K, F, T の隣の数字は凍結融解を施したサイクル数を表す。供試体本数はそれぞれのケースに対して2本である。 q_u は最大応力(一軸圧縮強度)であり、 ε_{yq_u} は最大応力時の軸ひずみである。 E_{50} および ν_{50} は、それぞれ軸応力が $q_u/2$ であるときの割線弾性係数と割線ポアソン比である。 $\varepsilon_{y\max}$ と α_{\max} はそれぞれ最大体積ひずみ $\varepsilon_{v\max}$ 時の軸ひずみと軸応力である。この最大体積ひずみは、この時点の前後で体積変化が圧縮から膨張へと変わることを示している。 $\varepsilon_{yv\max}/\varepsilon_{yq_u}$ は体積ひずみが収縮から膨張へと転換する軸ひずみ段階を示す。同様に $\alpha_{v\max}/q_u$ は軸応力段階を示す。

図-10に上中下部6箇所周ひずみでまとめた力学定数と軸ひずみ関係を、図-11に中部2箇所の周ひずみでまとめた関係を示す。ここで、横軸は軸ひ

表-2 凍結融解の有無による弾性波速度の比較

岩種	個数	凍結融解無し V_p (km/sec)	凍結融解有り V_p (km/sec)
栗橋花崗岩	5	4.6	4.6
船生凝灰岩	5	2.2	2.5
田下凝灰岩	1	1.8	1.8

ずみを ε_{yq_u} で正規化したものである。

b) 結果の考察

表-2より、凍結融解を施した船生凝灰岩供試体の V_p が、施さないものと比べ、0.3km/sec 大きい。田下凝灰岩と栗橋花崗岩では変化がない。著しい劣化を起こしている岩石表層部を除いた岩石内部の弾性波速度はあまり変化しないことが判る。

試料別に凍結融解の有無による力学定数の変化を検討する。栗橋花崗岩では、表-3より ε_{yq_u} の値は、凍結融解を施した供試体で小さくなっているが、 q_u の値はあまり変わっていないことが判る。また、図-10①(d)によると割線弾性係数は荷重にともない増加している。また、表-3より $\varepsilon_{v\max}$ は増加し、 ν_{50} は減少している。図-11①(b)を見ると、凍結融解を施した供試体で収縮が大きく、体積ひずみが収縮から膨張へ変わる時期が破壊時へと近づいている。これは、 $\varepsilon_{yv\max}/\varepsilon_{yq_u}$ の値が大きくなっていることでも判る。図-11①(d)を見ると、凍結融解を施した供試体のポアソン比は、軸ひずみ段階のほとんどの領域で0.1程度小さな値である。以上の現象は、凍結融解により生じた内部の亀裂が徐々に閉じることにより、割線弾性係数が上昇し、横方向へのひずみが亀裂の閉差により吸収されているものと推測される。そして、全体としては、より脆性的な材料に変化している。

船生凝灰岩では、表-3より凍結融解を施した供試体で q_u と E_{50} が増加している。 $\varepsilon_{yv\max}/\varepsilon_{yq_u}$ と $\varepsilon_{v\max}$ の値は減少し、 ν_{50} は増加している。図-10②(c)と図-11②(b)を見ると、凍結融解を施した供試体で収縮が小さく、体積ひずみが収縮から膨張へ変わる時期が早くなっている。図-10②(a)(d)を見ると、凍結融解した供試体で全軸ひずみ段階を通して、割線弾性係数の値が大きいことが判る。これは、前述した花崗岩と逆な現象であり、船生凝灰岩の場合、凍結融解により既存の亀裂が閉じるような現象が生じているものと推定される。すなわち、亀裂が閉じたことによって固相の接触が強くなり、変形しにくい状況になるものと思われる。

田下凝灰岩では、表-3より E_{50} が凍結融解を施した供試体で増加し、 ε_{yq_u} が減少している。また、 $\varepsilon_{yv\max}/\varepsilon_{yq_u}$ の値は凍結融解を施した供試体で増加し、

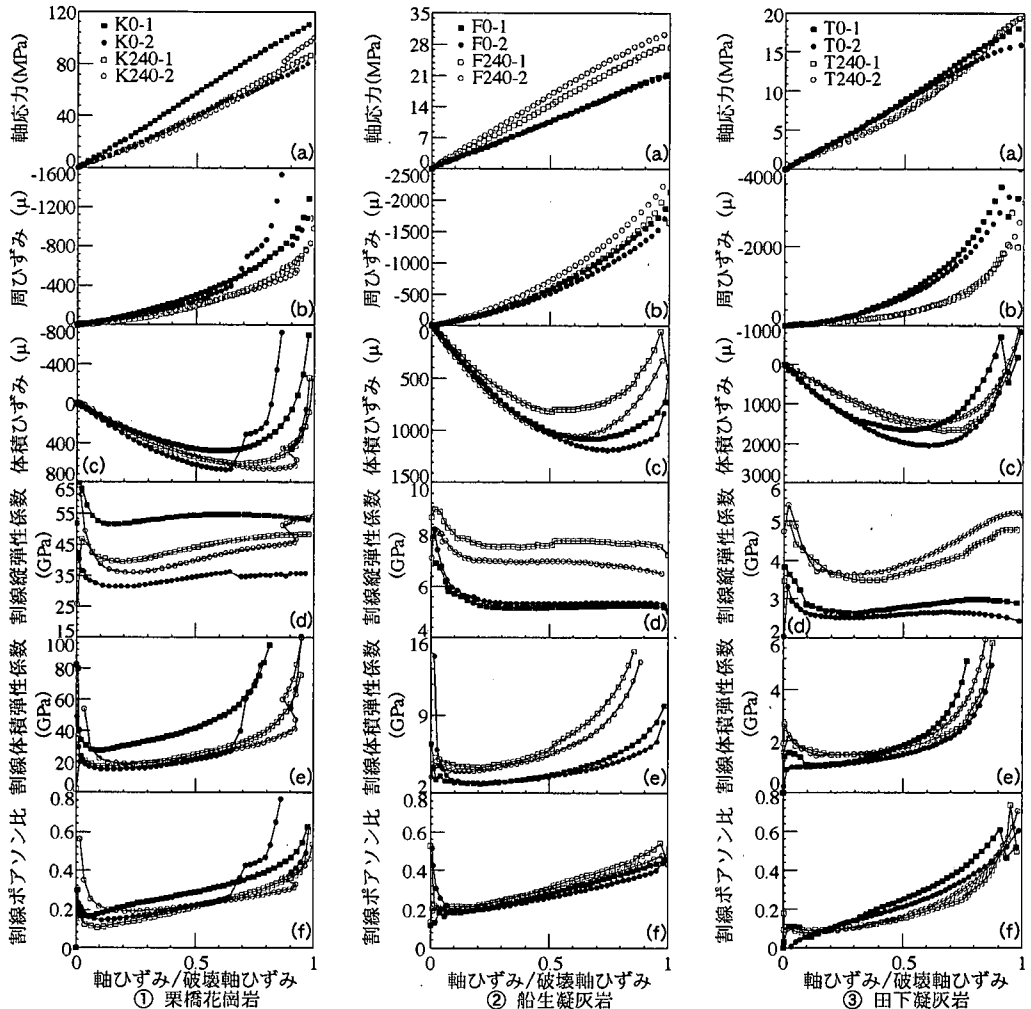


図-10 上中下部の周ひずみを用いて算出した各力学定数と軸ひずみの関係(軸ひずみは破壊軸ひずみで正規化)

ϵ_{vmax} の値は減少している。図-10③(c)を見ると、凍結融解を施した供試体で収縮が小さく、体積ひずみが収縮から膨脹へ変わる時期は破壊へと近づいている。図-10③(f)と図-11③(d)を見ると、凍結融解を施した供試体のポアソン比は、軸ひずみ段階のほとんどの領域で小さな値である。図-10③(d)より、凍結融解を施した岩石の割線弾性係数の上昇は、施していないものより大きい。 ϵ_{vmax} の値は減少している。図-10③(c)を見ると、凍結融解を施した供試体で収縮が小さく、体積ひずみが収縮から膨脹へ変わる時期は破壊へと近づいている。図-10③(f)と図-11③(d)を見ると、凍結融解を施した供試体のポアソン比は、軸ひずみ段階のほとんどの領域で小さな値である。図-10③(d)より、凍結融解を施した岩石の割線弾性係数の上昇は、施していないものより大きい。これは、 E_{50} が上昇し、 ϵ_{vmax} が減少する点を除いて、栗橋花崗岩と同様の傾向が見られる。従って、田下凝灰岩の場合も凍結融解により内部に亀裂が生

じたものと思われる。

以上より傾向としては、田下凝灰岩と栗橋花崗岩は凍結融解により脆性的になっているが、船生凝灰岩においては逆に延性的になっているといえる。また、凝灰岩においては、凍結融解により、より堅い石になっているといえる。

次に、図-10と図-11および表-3より、計測部位の違いによる計算結果の比較をする。表-3より、いずれの供試体においても中部のみで計測した ϵ_{vmax} の値が大きい。つまり中部の収縮が他の部位より大きいことが判る。図-10と図-11の周ひずみとポアソン比のグラフを比べると、中部(図-11(a),(d))の曲線の勾配が緩やかである。これらのことは、上下部の周ひずみの値が中部のものより大きく、上下部のひずみゲージに挟まれた部分の体積が糸巻き形(図-4(b))に変形しているためである。また、中部の $\epsilon_{vmax}/\epsilon_{yqu}$ の値も大きく、体積の膨脹は供試体中部よりも、上下部のひずみゲージに挟まれた部分の

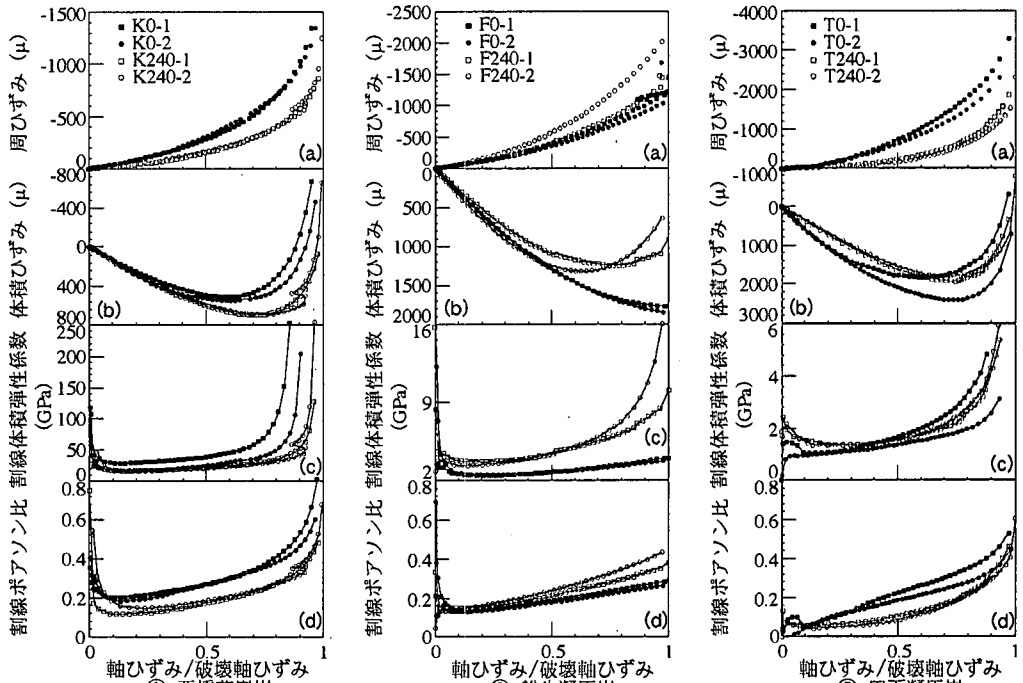


図-11 中部の周ひずみを用いて算出した各力学定数と軸ひずみの関係 (軸ひずみは破壊軸ひずみで正規化)

表-3 計測結果一覧

供試体 番号	q_u (MPa)	E_{50} (GPa)	ϵ_{yq_u} (μ)	上中下部の周ひずみで計算				中部の周ひずみで計算			
				ν_{50}	ϵ_{vmax} (μ)	$\epsilon_{yvmax}/\epsilon_{yq_u}$	σ_{vmax}/q_u	ν_{50}	ϵ_{vmax} (μ)	$\epsilon_{yvmax}/\epsilon_{yq_u}$	σ_{vmax}/q_u
K0-1	111.7	54.2	2121	0.28	482	0.60	0.62	0.27	510	0.61	0.63
K0-2	82.6	34.8	2313	0.22	672	0.63	0.64	0.28	548	0.62	0.62
K240-1	88.4	44.7	1831	0.22	612	0.69	0.66	0.18	696	0.70	0.68
K240-2	101.4	42.5	1848	0.25	662	0.60	0.64	0.22	691	0.76	0.61
F0-1	21.4	5.2	4159	0.28	1077	0.68	0.70	0.19	1772	1.01	0.99
F0-2	21.1	5.4	3987	0.26	1183	0.74	0.75	0.18	1869	1.04	0.99
F240-1	27.6	7.6	3762	0.30	826	0.52	0.54	0.21	1246	0.81	0.85
F240-2	30.6	7.0	4768	0.29	1054	0.61	0.66	0.22	1322	0.67	0.72
T0-1	18.2	2.8	6405	0.26	1649	0.50	0.49	0.23	1835	0.65	0.66
T0-2	16.0	2.6	6666	0.20	2042	0.59	0.65	0.18	2422	0.79	0.87
T240-1	19.4	3.9	4121	0.19	1661	0.67	0.57	0.14	1943	0.77	0.69
T240-2	19.7	4.2	3778	0.22	1446	0.65	0.53	0.13	1825	0.74	0.65

体積の方が早いことが判る。よって、体積の膨張は、中心よりも上下端面に近いところから始まっているといえる。

(2) ひずみ分布

a) 結果

図-12 にせん断ひずみ分布を図-13 に体積ひずみ分布を示す。ひずみ分布上の白線は、破壊時の亀裂である。図-12 左の荷重-軸ひずみ関係のプロットは、ひずみ分布と対応する同時刻のひずみゲージ測定値である。また、図-13 右は破壊時の供試体画像である。各供試体の各6枚のひずみ分布は、(a)

から(f)に行くに従い、時間的に破壊に近くなる。体積ひずみ分布においては、圧縮が正であり、凡例のコンターは対数ひずみである。

b) 結果の考察

栗橋花崗岩において、未凍結融解供試体のせん断ひずみ分布(図-12①)では、(d)と(e)の間で分布に違いが現れている。また、図-12①で(a)から(d)の間の分布では、せん断ひずみの値が正負逆となる境界を、亀裂の一部が走っているように見える。体積ひずみ分布(図-13①)では、(a)から(f)に行くに従い、亀裂周辺部の引張領域が増加している。凍結融解を施した供試体のせん断ひずみ分布(図-12②)

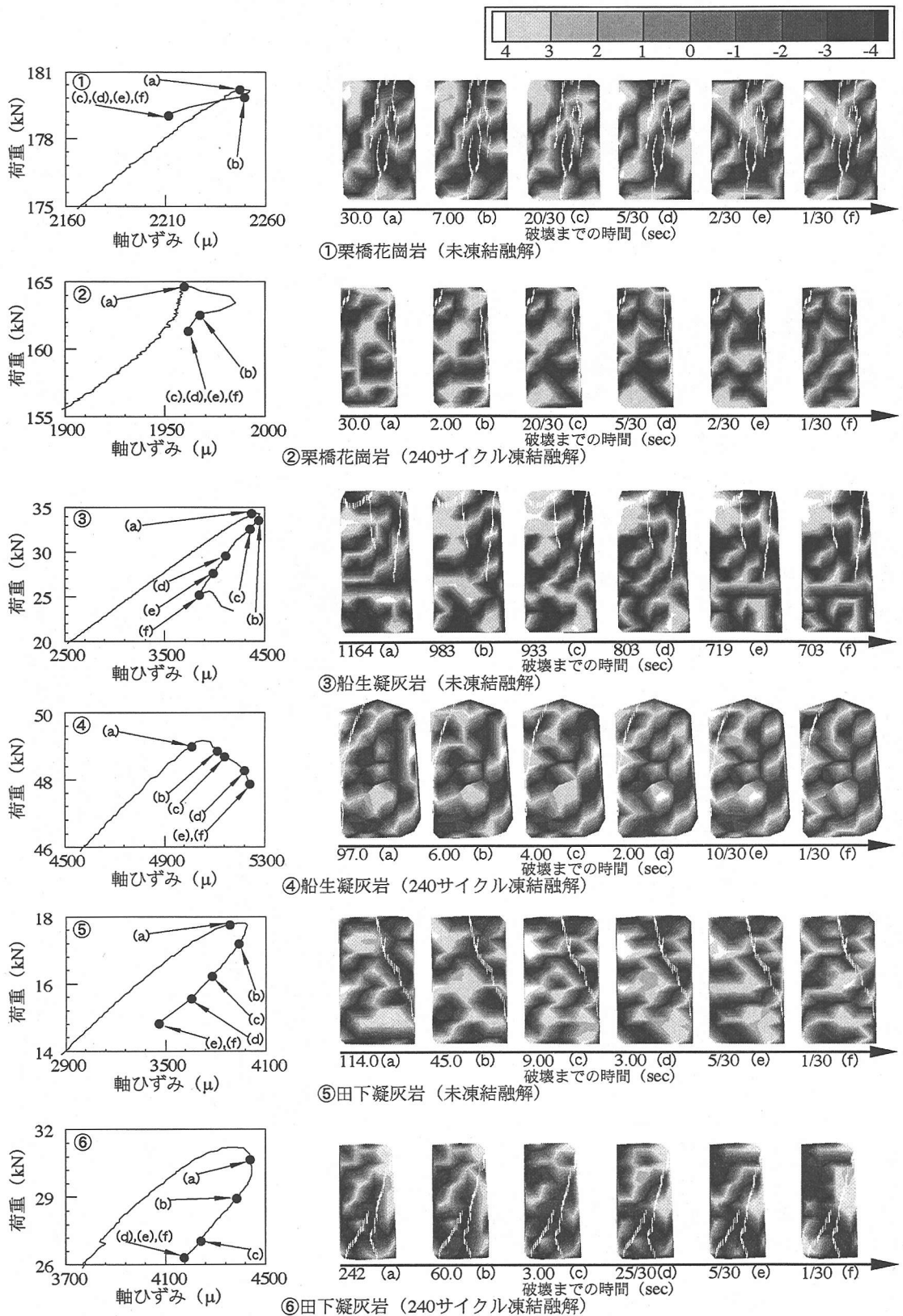


図-12 供試体表面のせん断ひずみ分布とそれに対応する荷重-ひずみ関係(コンタースケールは対数ひずみで全図同一)

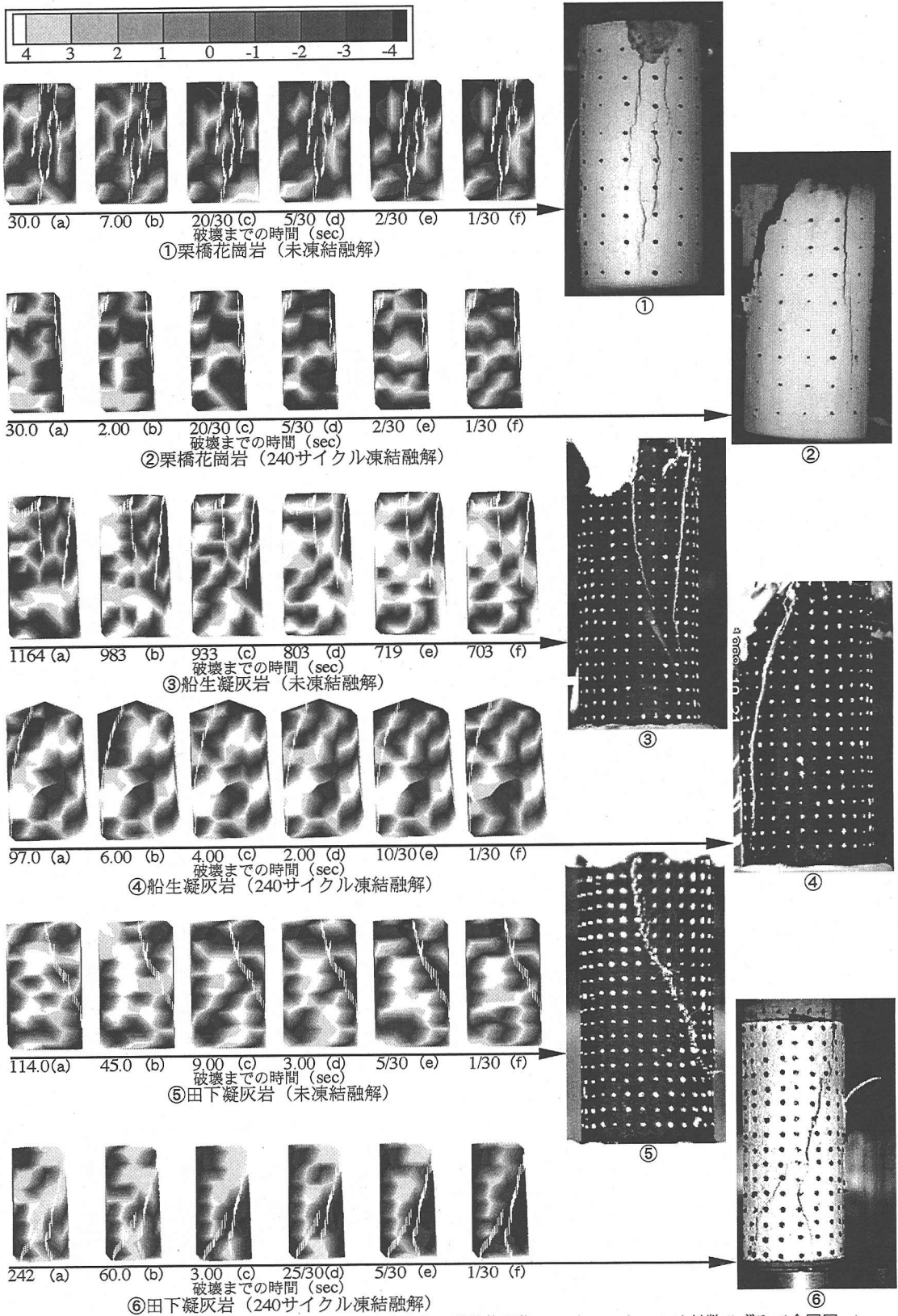


図-13 供試体表面の体積ひずみ分布と破壊直後の供試体画像(コンタースケールは対数ひずみで全図同一)

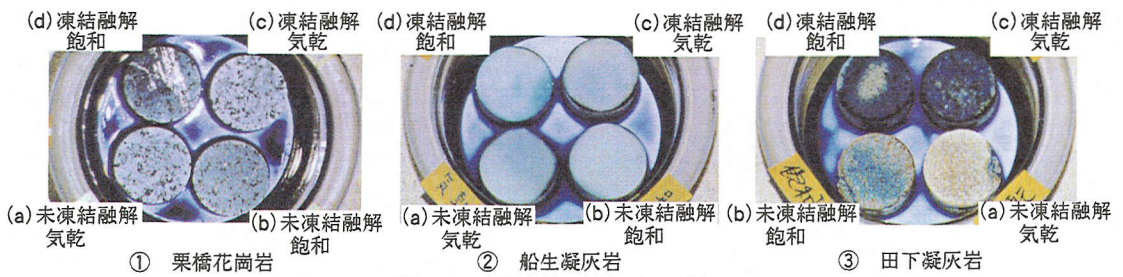


図-14 水分上昇の観察 (5日後)

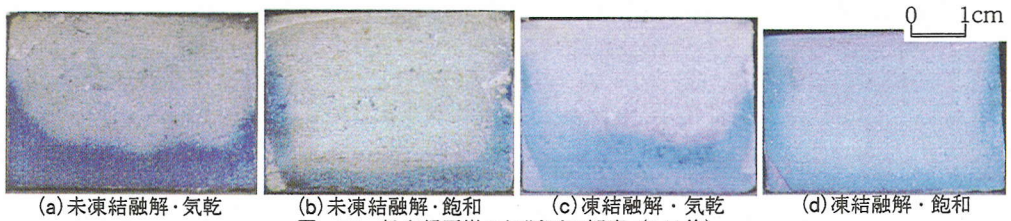


図-15 船生凝灰岩の切断面の観察 (7日後)

では、(e)と(f)の間で分布の違いが現れており、破壊直前に変化が現れていることが判る。また、図-12②で(a)から(f)の破壊までの全時間にわたって、せん断ひずみの値が正負逆となる境界を亀裂の一部が走っているように見える。体積ひずみ分布(図-13②)では、(d)から(e)で分布が変わり、亀裂は引張領域に走っていることが判る。

船生凝灰岩において、未凍結融解供試体のせん断ひずみ分布(図-12③)では、分布の際立った違いは見られなく、亀裂との関係も把握しづらい。図-13③では、亀裂が体積ひずみの引張領域を選択して走っている。また、破壊に近づくにつれ、分布の圧縮領域が増している。凍結融解を施した供試体のせん断ひずみ分布(図-12④)でも、分布の際立った違いは見られず、亀裂との関係もない。また、図-13④の(a)と(b)で、亀裂が体積ひずみの引張領域を走っているが、それ以後では分布と亀裂の関係はない。そして、破壊に近づくにつれ全体に黒味が増しており、引張領域が増していることが判る。

田下凝灰岩において、未凍結融解供試体のせん断ひずみ分布(図-12⑤)では、(a)から(f)の間で一様に分布が変化し、せん断ひずみの値が正負逆となる境界を、亀裂の一部が走っているように見える。体積ひずみ分布(図-13⑤)では、(a)から(f)に行くに従い、亀裂周辺部の引張領域が増加している。凍結融解を施した供試体のせん断ひずみ分布(図-12⑥)でも、(a)から(f)の間で一様に分布が変化し、せん断ひずみの値が正負逆となる境界を、亀裂の一部が走っているように見える。体積ひずみ分布(図-13⑥)でも、(a)から(f)に行くに従い、亀裂周辺部の引張領域が増加している。

ひずみ分布と亀裂の関係において、体積ひずみの引張領域に破壊時の亀裂があることが共通している。

次に、亀裂の入り方について検討すると、凍結融解を施した栗橋花崗岩と田下凝灰岩では亀裂が縦に入る傾向が強くなり(図-13 右①→②, ⑤→⑥)、船生凝灰岩では斜めに入る傾向が強くなる(図-13 右③→④)。亀裂が縦に入ることは脆性的物質に生じる破壊形式¹¹⁾であり、亀裂の急激な進展がその要因となる引張破壊である。一方、斜めに入る現象は粒状体で見られる現象であり、粒子間のすべりが要因となるせん断破壊である。そして、図-12 左の船生凝灰岩の荷重-軸ひずみ曲線を見ると、③のグラフでは軟化過程で軸ひずみは減少するが、④のグラフでは増加している。このことから、船生凝灰岩は凍結融解により亀裂の幅が減少し、固相の接触が増加したことにより延性化しているといえる。

(3)水分上昇の観察

溶液に供試体底面を接触させてから5日後の、供試体上面のインクの染まり具合を図-14に示す。上面の色が濃いほど、インクの成分が上面に集まっていることを示す。

凍結融解により顕著な違いが現れたのは、栗橋花崗岩と田下凝灰岩である。栗橋花崗岩については、飽和供試体について、凍結融解を施した供試体で上面の色が濃くなっている。田下凝灰岩については、気乾と飽和の両供試体について、凍結融解を施した供試体で上面の色が濃くなっている。このことより、栗橋花崗岩と田下凝灰岩においては、凍結融解を施すことにより、拡散による溶液上昇の経路が増加することが推定され、間隙量が増加していることが判

る。また、田下凝灰岩の気乾供試体のインク上昇が大きいことより、田下凝灰岩では間隙径の小さな亀裂が増加していることも判る。船生凝灰岩については、上面の色だけで凍結融解の有無において比較ができないので、図-15に7日後の切断した供試体の写真を示す。インクの色の高さを、底面からの高さで比較すると、飽和供試体では差異は観察されないが、気乾した供試体では凍結融解を施した供試体で高さが若干大きい。このことにより、船生凝灰岩では間隙量の変化は小さいが、亀裂径が小さくなっていることが判る。この理由を検討するために光学顕微鏡により凍結融解前後の亀裂面の変化を観察したが、有為な差は見られなかった。従って現時点では亀裂幅が閉じた理由は不明である。

以上のように、弾性波速度では顕著な変化が観測されなかったが、内部の状態は凍結融解により変化していることが判る。また、力学定数の変化をあわせて考えると、凍結融解による亀裂量の増加は、亀裂の進展による破壊傾向を増進させ、岩石を脆性化させることが判る。そして、凍結融解により亀裂径が小さくなる場合は、固相の接触が増加し、船生凝灰岩ではそのことが粒子間のすべりによる破壊形態を支配的にし、岩石を延性化させると思われる。

4. まとめ

健全な岩石と凍結融解を施した岩石を用い、一軸圧縮試験を行うことにより、応力が無い状態から最大応力までの各力学定数の変化と、最大応力から破壊までの供試体表面のひずみ分布を、凍結融解の有無において比較検討した。また、水分上昇の観察を行うことにより、岩石内部の亀裂の変化を推定した。

その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 田下凝灰岩と栗橋花崗岩の破壊軸ひずみは凍結融解により減少し、船生凝灰岩と田下凝灰岩の一軸圧縮強度と割線弾性係数は上昇する。凍結融解により体積ひずみが収縮から膨張に変わる時期は変化し、栗橋花崗岩と田下凝灰岩についてはその時期は破壊に近くなり、船生凝灰岩では逆に遠

くなる。また、栗橋花崗岩と田下凝灰岩では亀裂が縦に入る傾向が強くなり、船生凝灰岩では斜めに入る傾向が強くなる。よって、栗橋花崗岩と田下凝灰岩では凍結融解により脆性的になり、船生凝灰岩では逆に延性的になる。

- 2) 岩石に入る破壊時の亀裂は、体積ひずみ分布の引張領域とほぼ一致する。このことは、斜面崩壊の予測において、斜面の体積ひずみを観察することが有用であることを示している。
- 3) 凍結融解を施した栗橋花崗岩と田下凝灰岩では、岩石内部の亀裂の量が増加したことが推測され、田下凝灰岩では亀裂幅の小さな亀裂も増加したことが、水分上昇試験より判った。これは1)の現象の定性的説明を裏付けるものである。また、船生凝灰岩では亀裂が閉じるように変化することが判り、これが1)の凍結融解による延性化の原因になっているものと思われる。

参考文献

- 1) 日本応用地質学会：斜面地質学，日本応用地質学会，pp.45-47，1999。
- 2) 日本材料学会：岩の力学 基礎から応用まで，pp.90-113，丸善株式会社，1993。
- 3) 地盤工学会：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，1997。
- 4) 菅原勝彦：風化岩石の強度劣化速度に関する基礎的研究，科研費補助金試験研究報告書，研究課題番号05452320，1993-1994。
- 5) 陳天城，森訓保，後藤隆司，鈴木輝之，平松雅弘：寒冷地における岩盤斜面の劣化・破壊機構に関する基礎的研究，第33回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1215-1216，1998。
- 6) 陳天城，後藤隆司，平松雅宏，森訓保：凍結融解時における岩石供試体のAE発生及びひずみの特性，第42回地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.77-78，1998。
- 7) 田中寛史，田野久貴，渡辺英彦：凍結融解を受けた大谷石の強度低下と細孔分布について，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，第3部(A)，pp.696-697，1998。
- 8) 動力炉・核燃料開発事業団：東濃鉱山と釜石鉱山の岩石の力学特性および初期応力状態，地層処分研究開発の現状（平成8年度），PNC TN1410 96-071，pp.261-263，1996。
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書(平成6年度版)規準編，1994。
- 10) P.S.フヤコーン，G.F.ピンダー：地下水解析の基礎と応用・上巻基礎編，pp.44-45，現代工学社，1987。
- 11) M.S.パターソン：実験岩石力学，古今書院，1986。

(1999.7.9 受付)

EFFECT OF DEGRADATION DUE TO FREEZING AND THAWING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ROCK

Kiyohito YAMAMOTO, Akira KOBAYASHI and Koichi FUJII

Influence of freezing and thawing on the mechanical properties of rock is investigated. The rocks used for the examination are Kurihashi-granite, Funiyu-tuff and Tage-tuff. The difference between the intact and degraded specimens is investigated for mechanical parameters and distribution of strain by unconfined compression test. The strain distribution is observed through the image processing. As the results of the test, it is found that the change in mechanical behaviors of Kurihashi-granite is quite different from that of Funiyu-tuff. Granite and Tage-tuff become brittle with degradation while Funiyu-tuff becomes hard rock. It is inferred that the volumetric strain distribution may be good measure for failure.