

凍結融解劣化の影響による岩石の損傷パラメータの変化
Change in damage parameter of rock due to freezing and thawing degradation

○山本清仁, 小林晃, 青山咸康
Kiyohito Yamamoto, Akira Kobayashi & Shigeyasu Aoyama

1. はじめに 岩盤斜面崩壊の予知や予防のために, 岩石の変形挙動の把握を行う. 岩石の変形は, 岩石内部の亀裂が影響すると考えられる. 岩石を一軸圧縮すると, 内部の亀裂が増加して, 供試体の有効な断面積が減少して, 応力とひずみが増加する. そのひずみは直接的に計測されるが, 応力は初期断面積から求められるので, 実際より小さな応力を測定してしまい, 応力とひずみの傾きである割線弾性係数を小さく見積もることになる. また, 内部の亀裂が増加すると, 供試体全体の体積が増加して, 膨張する体積ひずみが増加する. ここでは, 割線弾性係数の減少と膨張体積ひずみを, 損傷パラメータで表す. 損傷パラメータを比較して, 劣化による岩石内部の亀裂の力学的性質変化を把握する.

2. 損傷パラメータ 弾性ひずみ ε_{ij}^e と岩石内部の亀裂が原因となる等方な膨張ひずみ ε_{ij}^v の和が全ひずみ ε_{ij} であると仮定する. ここで, 膨張ひずみは負の値で, 圧縮は正とする.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^v \quad (1)$$

等方な損傷進展について, 全応力 σ_{ij} と全ひずみの関係は次式によって示される.

$$\sigma_{ij} = (1-D) \left\{ \left(\lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \right) - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^v (3\lambda + 2\mu) \delta_{ij} \right\} \quad (2)$$

ここで, D は損傷変数, λ と μ はラーメ定数, 等方な膨張による体積ひずみ ε_{kk}^v は $\varepsilon_{kk}^v = 3\varepsilon_{11}^v$ の関係がある. 相当損傷共役力 Y_{eq} と ε_{kk}^v および Y_{eq} と D の関係を, それぞれ次式で表す.

$$Y_{eq} = K_v \left(-\frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^v \right)^{n_v} \quad (3) \quad Y_{eq} = K_d D^{n_d} + B_0 \quad (4)$$

ここで, n_v と K_v は膨張ひずみの進展を規定するパラメータであり, n_d と K_d は損傷変数の進展を規定するパラメータである. 膨張ひずみは载荷と同時に発生するが, 損傷変数は Y_{eq} が初期損傷ポテンシャル B_0 より大きくなったときに発生する. この損傷規準¹⁾は, 損傷ポテンシャルの増加量 B とともに次式によって示される.

$$F(Y_{ij}, B) = Y_{eq} - (B_0 + B) = 0 \quad (5)$$

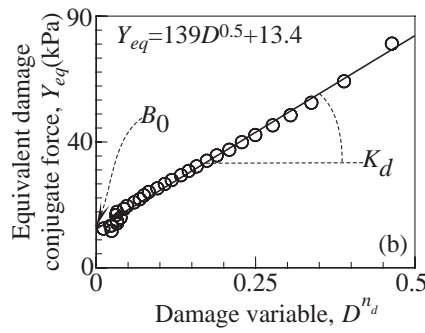
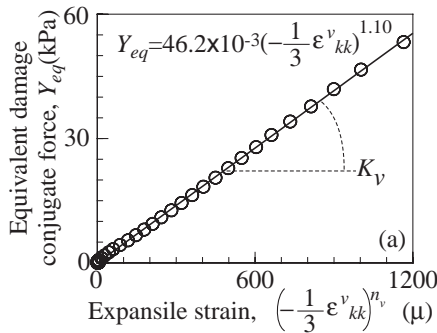
ここに, Y_{eq} は相当損傷共役力で, Y_{ij} は損傷共役力であり, 次式のように示される.

$$Y_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} Y_{ij} Y_{ij}} \quad (6) \quad Y_{ij} = -\frac{1}{2} \left(\lambda \varepsilon_{kk}^e \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}^e \right) \varepsilon_{ij}^e \quad (i=1,2,3, j=1,2,3, \text{no sum.}) \quad (7)$$

3. パラメータの同定 栗橋花崗岩, 船生凝灰岩, 田下凝灰岩の3種類の岩石から円柱の

Table.1 力学定数および損傷定数一覧 Mechanical parameters and damage parameters

Rock(Condition of specimen)	E_0 (GPa)	ν_0	K_v (MPa)	n_v	K_d (kPa)	n_d	B_0 (kPa)
Kurihashi-granite(intact)	51.7	0.199	25.0	0.72	413	0.9	17.8
(degraded)	42.5	0.115	12.3	0.67	231	0.7	25.9
Funyu-tuff (intact)	5.32	0.132	24.2	0.85	549	1.2	0.0
(degraded)	6.88	0.136	45.7	0.94	430	1.2	0.0
Tage-tuff (intact)	2.37	0.042	46.2	1.10	139	0.5	13.4
(degraded)	4.16	0.043	3.82	0.70	56.8	0.5	22.3



$$\frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^v = \frac{\varepsilon_{22} + \nu_0 \varepsilon_{11}}{1 + \nu_0} \quad (8)$$

$$Y_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} E_0 \varepsilon_{11}^e \varepsilon_{11}^e \right)^2} \quad (9)$$

$$D = 1 - \frac{\sigma_{11}}{E_0 \varepsilon_{11}^e} \quad (10)$$

Fig.1 Y_{eq} と ε_{kk}^v 関係および Y_{eq} と D 関係 (田下凝灰岩健全供試体)
 Y_{eq} - ε_{kk}^v relation and Y_{eq} - D relation (Tage-tuff intact specimen)

○ intact specimen(calculated) △ degraded specimen(calculated) — intact specimen(measured) ---- degraded specimen(measured)

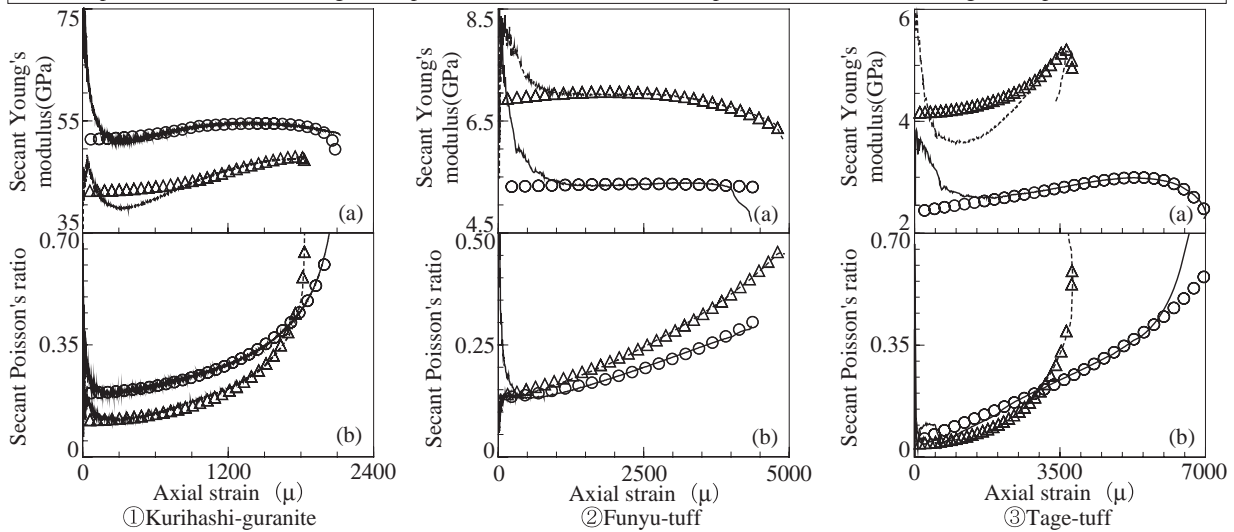


Fig.2 各力学定数と軸ひずみ関係 Each mechanical parameter-axial strain relation

健全供試体と凍結融解供試体を作成した. それらの一軸圧縮試験結果²⁾を式(3)と式(4)にフィッティングすることにより, 損傷パラメータを同定した. ここで, パラメータの同定に関して式(8)~(10)を用いた. また, ν_0 は载荷初期の割線ポアソン比の最小値, ε_{11} は軸ひずみ, ε_{22} は周ひずみ, ε_{11}^e は弾性軸ひずみ, σ_{11} は軸応力である. 式(3)と式(4)のフィッティングの概要をそれぞれ Fig.1(a)と Fig.1(b)に示す. 求めたパラメータを Table.1 に示す. Table.1 の定数と式(1)~(7)より計算した力学定数と軸ひずみの関係を Fig.2 の記号で示す. Fig.2 より計算値は実測の力学定数の挙動と概ね一致しており, 変形挙動が良好に再現されている.

4. パラメータの比較 まず, 損傷変数について, Table.1 の n_d と K_d より, 全供試体の K_d は減少している. よって, 岩石は凍結融解によって損傷の進展が早くなる. さらに, 栗橋花崗岩の n_d は凍結融解により減少しているため, 栗橋花崗岩は凍結融解によって, 損傷の進展が著しく早くなる. 次に, 膨張体積ひずみについて, 栗橋花崗岩と田下凝灰岩は凍結融解により, n_v と K_v が減少しているが, 船生凝灰岩では増加している. よって, 凍結融解により栗橋花崗岩と田下凝灰岩は膨張体積ひずみは増加するが, 船生凝灰岩では減少する.

5. まとめ 一軸圧縮試験より求めた岩石の損傷パラメータを, 凍結融解の有無で比較した. その結果, 以下のことが推定された. 1.凍結融解で岩石の損傷変数は増加しやすくなる. 2.凍結融解で栗橋花崗岩の損傷変数は著しく増加する. 3.凍結融解により栗橋花崗岩と田下凝灰岩の膨張体積ひずみは増加するが, 船生凝灰岩の膨張体積ひずみは減少する.

参考文献 1)S.Murakami, K.Kamiya : Constitutive and Damage Evolution Equations of Elastic-Brittle Materials Based on Irreversible Thermodynamics, Int. J. Mech. Sci., Vol39, No.4, pp.473-486,1997 2)山本清仁, 小林晃, 藤居宏一: 凍結融解の影響による岩石の力学定数の変化, 土木学会論文集, III-53, pp.44-53,2000.12