# 塩水化学劣化作用による 岩盤の損傷パラメータの変化

# 小林 晃<sup>1\*</sup>•山本清仁<sup>1</sup>•青山 咸康<sup>1</sup>

#### <sup>1</sup>京都大学 大学院農学研究科 地域環境科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町) \*E-mail: kobadesu@kais.kyoto-u.ac.jp

塩水化学劣化作用による力学挙動の変化を調べる.10%塩水と蒸留水にそれぞれ90日間浸した2パターンの岩石試料を作成し、それらの一軸圧縮試験結果より損傷パラメータを求めた.損傷パラメータは、膨張ひずみおよび損傷変数とひずみエネルギーの関係を示す4つのパラメータと、1つの損傷変数増加開始時のひずみエネルギー値からなる.さらに、その損傷パラメータを用いて一軸圧縮試験を模擬したFEMシミュレーションを行った.その結果、蒸留水の場合と比べて、10%塩水浸潤試料は損傷開始が早く、膨張性に富む材料であると推察された.また、FEMシミュレーションより、側面の局所的な変形は応力の急減を促し、応力急減時の応力とひずみ分布は弾性領域に支配されると推定された.

Key Words : chemical degradation, salt water, rock, damage mechanics, finite element method

# 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分場の建設において、処分 坑に隣接する岩盤は様々な劣化過程にさらされる.まず、 掘削により岩盤内部に乱れが生じる.掘削作業の工期中、 人が作業できる環境を作るために換気が行われ、壁面に 近い岩盤は不飽和状態となる.廃棄体の設置後は、廃棄 物からの放熱により温度は上昇し、緩衝材の膨潤圧は直 接岩盤に働く.さらに、地下水位が回復するにつれて、 高圧の地下水が周囲から処分坑に流入する.この一連の 現象が、数百年の間続くと予想され、化学的・物理的劣 化過程は岩盤内部で長期間進行するので、処分坑の力学 的安定を検討することが重要となる.

トンネル側壁に近い岩石の力学的・水理学的挙動に よる化学作用を検討するために、Bäckström<sup>1)</sup>らは塩水に 浸して劣化した試料の一軸圧縮試験を行った. 試料はス ウェーデンÄspö HRL産出のもので、塩水、地層水およ び蒸留水にそれぞれ90日間浸した後、それら3パターン の試料に一軸圧縮試験を行った.

塩水により化学的に劣化した岩石の力学挙動につい て、劣化の影響を推定するために本論では損傷力学<sup>3)</sup>を 用いる.従来の損傷モデルに加えて損傷による膨張ひず み<sup>3)</sup>を考慮し、一軸圧縮試験結果より本論で用いるモデ ルの損傷パラメータを同定し、損傷パラメータを比較す ることにより塩水劣化作用による力学挙動の変化を推定 する.また、損傷パラメータを用いたFEM計算を行い、 ー軸圧縮試験の供試体内部の損傷分布と応力およびひず み分布をシミュレーションした.

# 2. 塩水劣化及び一軸圧縮試験

#### (1) 試料

スウェーデンÄspö地下実験所の深度450mからSKBに より採掘された51mmコアより20本のÄspö花崗岩試料を 作成した.それら試料のうち5本は塩水、3本は蒸留水、 2本は地層水に浸した.その計10本の試料の浸潤期間は 90日である.塩水は10%NaCl溶液であり、地層水の塩分 濃度は0.68%である.

#### (2)一軸圧縮試験

それぞれの溶液に浸した後, ISRM規準<sup>4</sup>の一軸圧縮試 験を行った. 試験では, 軸方向と周方向の変形を記録し た. 90日間浸潤試料の一軸圧縮強度を表-1に示す. 塩分 濃度が増加するに従い, 一軸圧縮強度は減少する傾向が ある. 弾性係数も塩分の増加にともない微減している.

塩水と蒸留水の90日間浸潤ケースの一軸圧縮試験結果 より、後述の方法を用いて、損傷パラメータを同定する.

## 3. 膨張性損傷モデル

#### (1) 基本概念

材料内部の損傷が増加して応力伝達に有効な断面積

	表-1 供試体の力学定数	
体	一軸圧縮強度	Ę

/11.⇒

(供試)体	一	弾性徐釵
	(MPa)	(GPa)
	最小 274	70
乾燥	平均 302	72
(個数:5)	最大 336	73
	最小 249	68
蒸留水	平均 271	69
(個数:3)	最大 287	69
	最小 233	66
地層水	平均 249	67
(個数:2)	最大 264	67
	最小 220	65
10%塩水	平均 249	67
(個数:5)	最大 277	68

が減少すると、見かけの弾性係数は減少し、大きなひず みが発生すると考えられる.この挙動を弾性係数の減少 率である損傷変数 D を用いて表現するのが損傷力学で ある.また、本モデルで導入する膨張ひずみは、材料の 変形にともなって増加する亀裂や間隙の量が等方に膨張 する体積ひずみとして現れると仮定したひずみである.

弾性ひずみ $\varepsilon_{ij}^{e}$ と材料内部の損傷が原因となる等方な膨張ひずみ $\varepsilon_{ij}^{v}$ の和が全ひずみ $\varepsilon_{ij}$ であると仮定する.ここで、膨張ひずみは正で、圧縮は負値とする.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^v \tag{1}$$

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

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

 $\lambda \succeq \mu$ はラーメ定数で、また、等方膨張による体積ひ ずみ $\varepsilon^{v}_{kk}$  (膨張は正) は $\varepsilon^{v}_{kk}=3 \varepsilon^{v}_{11}$ の関係がある.相当損 傷共役力  $Y_{eq} \succeq \varepsilon^{v}_{kk}$ および  $Y_{eq} \succeq D$ の関係を、それぞれ次 式で表す.

$$Y_{eq} = K_{\nu} \left(\frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^{\nu}\right)^{n_{\nu}} + B_{0}^{\nu}$$
(3)

$$Y_{eq} = K_d D^{n_d} + B_0 \tag{4}$$

 $n_v \ge K_v$ は膨張ひずみの進展を規定する損傷パラメー タであり、 $n_d \ge K_d$ は損傷変数の進展を規定する損傷パ ラメータである.

損傷変数 D は  $Y_{aq}$ 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<sup>9</sup>はポテンシャルの増加量  $\dot{B}$ とともに次式により示される.

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

また,膨張ひずみ $\varepsilon_{k}^{v}$ は, $Y_{eq}$ が初期膨張ポテンシャル  $B_{0}^{v}$ より大きくなったときに発生する.この膨張規準を 次式で表す.

$$F^{\nu}(Y_{ij}, B^{\nu}) = Y_{eq} - (B_0^{\nu} + \dot{B}^{\nu}) = 0$$
(6)

ここで、初期膨張ポテンシャルは  $B_0$ と等しいとした ( $B_0^{"} = B_0$ ).相当損傷共役力  $Y_{aq}$ と損傷共役力  $Y_{ji}$ は、次 式のように表される.



図-1 Y<sub>ag</sub>と č<sub>k</sub>関係および Y<sub>ag</sub>とD関係 (10% 塩水供試体)

$$Y_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} Y_{ij} Y_{ij}}$$
(7a)  
$$Y_{ij} = -\frac{1}{2} \left( \lambda \varepsilon_{kk}^{e} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}^{e} \right) \varepsilon_{ij}^{e} \quad (i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, \text{ nosum.})$$
(7b)

## (2) 損傷パラメータの同定

ー軸圧縮試験の最大応力までの結果を式(3)と式(4)に フィッティングすることにより,損傷パラメータを実験 記録より同定した.フィッティングに用いる膨張ひずみ  $\varepsilon^{v}_{k}$ は次式で計算する.

$$\frac{1}{3}\varepsilon_{kk}^{\nu} = \frac{\varepsilon_{22} + \nu_0 \varepsilon_{11}}{1 + \nu_0} \tag{8}$$

ここで, いは載荷初期の割線ポアソン比最小値, *ε*<sub>1</sub> は軸ひずみ, *ε*<sub>2</sub>は横ひずみである.そして,損傷変数 Dは次式で評価する.

$$D = 1 - \frac{\sigma_{11}}{E_0 \varepsilon_{11}^e}$$
(9)

ここで、 *G*<sub>1</sub><sup>e</sup>は弾性軸ひずみ、 *G*<sub>11</sub>は軸応力、 *E*<sub>0</sub>は割線 弾性係数で載荷過程で最大の弾性係数とする. 相当損傷 共役力 *Y<sub>ac</sub>*は一軸圧縮においては次式で計算できる.

$$Y_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} E_0 \varepsilon_{11}^e \varepsilon_{11}^e\right)^2}$$
(10)

式(3)と式(4)のフィッティングの概要をそれぞれ図-1(a), (b)に示す. 膨張ひずみの進展を規定する損傷パラメ ータの同定は、図-1(a)に示すグラフでプロットが線形に なるようにn,を決め,線形近似式よりK,を決定する. 損 傷変数に関する損傷パラメータもほぼ同様に決定する.  $B_0$  =  $B_0$ になるのが望ましいが、図-1(a)(b)のように異なる 場合,損傷変数および膨張ひずみの増加開始初期ポテン



図-2 有限要素メッシュおよび境界条件

シャルBoには平均値を用いることとする.

#### (3) 膨張性損傷モデルを用いたFEMシミュレーション

岩の一軸圧縮試験を模擬した FEM シミュレーション を行う.図-2に有限要素メッシュと境界条件を示す.1 ステップ 2.5µm の強制変位を図-2 右上のように円柱メ ッシュ上端面に与え,初期不整として上端面と下端面の 厚さ 1mm の部分(図-2 左上)に初期損傷変数 D'=0.01 を 与える.実験では供試体と載荷板の不完全接触により供 試体内部の応力分布が不均一となっていると考えられ, それを模擬するために初期損傷変数を端面に与える. 表-2 に損傷パラメータの同定結果を示しているが,式 (3)(4)との関係より初期損傷変数に対応する初期膨張ひ ずみを 1/3 ε<sup>v</sup><sub>kk</sub>、初期ポテンシャルを B'0 としてそれぞれ 示している.表-2 のパラメータを用いて蒸留水および 10%塩水ケースの FEM 計算を行う.

3 次元の微小ひずみ弾性 FEM プログラムに膨張性損 傷モデルの計算を追加し、積分点の応力ひずみマトリッ クスを以下に示す  $C_{at}$ にすることで本モデルの計算が行 われる.  $C_{at}$ は増分型の応力ひずみ関係を示すものであ り、応力ひずみ関係は次式によって示される.

$$\left\{ \dot{\boldsymbol{\sigma}}_{ij} \right\} = \mathbf{C}_{ed} \left\{ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{ij} \right\} \tag{11}$$

全応力増分 $\dot{\sigma}_{ij}$ と全ひずみ増分 $\dot{\epsilon}_{ij}$ はベクトル表示している.  $C_{al}$ は次式により示される.

 $C_{ed} = (1-D)(C-C_d)$  (12) Cは弾性の応力ひずみ関係を示すマトリックス,  $C_d$ は応 力ひずみ損傷マトリックスで,

$$\mathbf{C}_{d} = \left(3\lambda + 2\mu\right) \frac{A_{mn}\delta_{ij}}{A_{kk} + G} + \frac{\widetilde{\sigma}_{ij}A_{pq}}{H} - \frac{\widetilde{\sigma}_{ij}A_{pq}A_{mn}\delta_{pq}}{H(A_{kk} + G)}$$
(13)

である.ここで、H、Gおよび $A_{ij}$ についてはそれぞれ次式のようになる.

$$H = (1 - D)K_d n_d D^{n_d - 1} \tag{14}$$

$$G = K_{\nu} n_{\nu} \left(\frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^{\nu}\right)^{n_{\nu} - 1}$$
(15)

表-2 実験結果より求めた損傷パラメータ

	蒸留水	10%塩水
$E_0$	57MPa	60MPa
$\nu_0$	0.20	0.23
$K_d$	1.2MPa	1.7MPa
$K_{\nu}$	141MPa	106MPa
$n_d$	0.5	0.95
$n_v$	0.80	0.80
$B_0$	225kPa	180kPa
D'	0.01	0.01
$B'_0$	345kPa	223kPa
$1/3\varepsilon^{v_{kk}}$	0.000145	0.0000422

$$A_{ij} = \frac{1}{8Y_{eq}} \left[ \lambda \left( \varepsilon^e \right)_{ij}^2 \widetilde{\sigma}_{ij} \delta_{ij} + 2\mu \left( \varepsilon^e \right)_{ij}^2 \widetilde{\sigma}_{ij} + \left( \widetilde{\sigma} \right)_{ij}^2 \varepsilon_{ij}^e \right] \quad (16)$$

弾性ひずみ $\varepsilon_{ij}^{e}$ と有効応力 $\tilde{\sigma}_{ij}$ およびDは以下の関係がある.  $\sigma_{ij}$ 

$$\widetilde{\sigma}_{ij} = \lambda \varepsilon^e_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon^e_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{(1-D)}$$
(17)

式(5)(6)で示される損傷と膨張のポテンシャルが一致 しているとした場合( $B_0^{\nu} = B_0$ ),下式を満たすときに損 傷変数と膨張ひずみが増加する.

$$F = 0 \text{ and } \dot{Y}_{eq} > 0 \tag{18}$$

また,損傷変数増分と膨張ひずみ増分は,それぞれ次の 計算により求められる.

$$\dot{D} = \frac{(1-D)}{H} \left\{ A_{ij} \right\}^{\mathrm{T}} \left\{ \dot{\varepsilon}_{ij}^{e} \right\}$$

$$\frac{1}{E} \dot{\varepsilon}^{v} = \frac{1}{H} \left\{ A_{ij} \right\}^{\mathrm{T}} \left\{ \dot{\varepsilon}_{ij} \right\}$$
(19)

$$3^{c_{kk}} - \frac{1}{A_{kk} + G} (n_{ij}) (e_{ij})$$
 (20)  
本モデルの計算途中で損傷状態にある積分点が弾性  
状態と判定され、積分点の $C_{al}$ が0となるときは、現ステ  
ップの計算をやり直すこととする. 一方、弾性状態から  
損傷状態に移行した際の再計算は行わないとした. 損傷  
変数が0.999より大きくなった積分点は、 $D=0.999$ とし、  
それ以降の計算では弾性状態にしている. 最初のステッ  
プでのFEM計算は、すべての積分点で $C_{al}$ が0なので弾性  
計算となる. FEM計算では15節点三角柱要素(積分点数

21) と20節点6面体要素(積分点数27)を用いているが, 上記の各変数は積分点ごとに計算している.

## 4. 結果と考察

# (1) 化学劣化作用による岩盤の損傷パラメータの変化 a) 結果

損傷パラメータの同定結果を表-2に示す.ここで, K<sub>d</sub> n<sub>d</sub> K<sub>v</sub>, n<sub>v</sub>の値をそれぞれ変えて式(2)を計算し,得られ た一軸圧縮の軸応力ー軸ひずみ関係<sup>の</sup>から,以下のよう な損傷パラメータの特性が考察できる.K<sub>d</sub>は増加すると 最大応力が増加し,破壊ひずみも増加する.n<sub>d</sub>は増加す ると最大応力が減少する.K<sub>v</sub>は減少すると破壊ひずみが 減少し,体積ひずみの膨張が急激になる.n<sub>v</sub>は減少する



と破壊ひずみが増加し、膨張が穏やかになる.

最大応力の減少は劣化による強度低下であると判断 でき,破壊ひずみの減少と体積ひずみ急増は劣化による 脆性化を示すものである.

#### b)考察

10%塩水ケースのK<sub>d</sub>は蒸留水と比べ大きくなっている が、n<sub>d</sub>も大きくなっているので、塩水劣化作用によって 最大応力の減少はそれほど激しくないと予想される.一 方、K<sub>s</sub>の減少から、体積ひずみの急激な増加が劣化によ り強調されている.しかし、K<sub>d</sub>が増加し、K<sub>s</sub>が減少して いるので破壊ひずみの変化は小さくなっていると推定さ れる.

*B*<sub>0</sub>が減少していることから、小さな相当損傷共役力 (ひずみエネルギー)で損傷の進展が発生すると考えら れ、早い時期での破壊の原因となる.これにより剛性が 低下する可能性がある.

# (2) 膨張性損傷モデルを用いたFEMシミュレーション a) 結果

図-3に軸応力-軸ひずみ関係を示す.また,体積ひず みー軸ひずみ関係を図-4に示す.図-5には、図-3の最大 応力付近計算結果を拡大したものを示している.計算結 果の軸応力は図-2(A)で示す端面上反力の総和を変形前 断面積で割ったものである.軸ひずみは、100mm間隔で 軸ひずみを算出する場合、図-2(A)が示すz座標上の側面



にある全節点のz方向変位についての平均を求め、同様 に図-2(E)上の平均を求め、それら2つの値と初期長さ (100mm)より(A)-(E)間の軸ひずみを求めた.また、局 所的な軸ひずみの挙動を見るために、12mm間隔の軸ひ ずみ(図-2(B)-(D)間)も同様に求めた.図-4に示す軸ひ ずみは100mm間隔の軸ひずみを。で、体積ひずみをは、 と半径方向ひずみをより次式で求めた.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r \tag{21}$$

**図-6**に*ç*の説明を示す.図中の大円は、**図-2**(C)の側線で ある.その円周上の全節点においてΔrを求め、その平均 を変形前半径r(25mm)で割ることで半径方向ひずみ*ç* を求めた.

損傷変数,体積ひずみ,最小主応力の分布図をそれ ぞれ図-7,8,9に示す.それぞれ図の上段は蒸留水のケー ス,下段は10%塩水ケースをであり,分布の値は要素ご との平均である.図中(a)~(f),(A)~(F)は図-5のそれらと 対応している.分布図はメッシュを切断した内部の分布 であるが,切断箇所を図-2左の破線で示している.

以上,全図にわたり圧縮が負である.

# b)考察

図-3,4より実験結果と解析結果を比べると、載荷初期 より最大応力近傍までは実験と計算は良好に一致してい る.最大応力以降の軸ひずみの挙動が実験と計算の間で 大きく異なるが、蒸留水ケースの最大応力が10%塩水ケ ースより大きいことや、10%塩水ケースの体積ひずみ膨 張が急激であることは、傾向として一致している.



これより先では図-2の条件でFEM計算した結果のみに ついてについて考察し,岩石破壊挙動について定性的な 議論を行う.

図-3より、蒸留水ケースでは最大応力以降の応力減少が著しいが、10%塩水ケースでは最大応力以降の応力減少は小さく、大きい応力を維持している.また、蒸留水のものは応力減少にともない12mm間隔軸ひずみは大きく変形している.一方、図-4の体積ひずみの挙動を見ると、10%塩水の体積膨張が著しく4.(1)b)で述べたK<sub>4</sub>の特性が反映されており、その曲線は比較的なめらかで、安定した膨張が続いている.

損傷変数分布(図-7)より、蒸留水の損傷変数分布 (図-7上段)は大小の差が激しいが、10%塩水(図-7下 段)は全体的に大きな値となっている.また、10%塩水 では損傷変数の大きい領域が体積ひずみの膨張域(図-8 下段)と概ね対応している.

体積ひずみ分布(図-8)より,蒸留水の場合(図-8上 段)は側面に膨張の大きな領域が存在するが,10%塩水 (図-8下段)では内部にその領域が存在する.また,蒸 留水では膨張域と収縮域が混在するが,10%塩水の(C)~ (F)ではほとんど一様に膨張域である.

最小主応力分布(図-9)から、蒸留水(図-9上段)では、局所的に極めて大きな圧縮応力が発生しているが、 10%塩水(図-9下段)では、そのような領域は少ない、 また、両ケースともに圧縮応力が大きい部分は体積ひず みの膨張域(図-8)に対応している。

図-5(b)~(c)および(B)~(C)間が最大応力以降大きく応 力が減少する区間であるが、体積ひずみと最小主応力分 布(図-8,9)では両ケースとも大きく分布が変化してい る.損傷変数分布でも10%塩水の場合は、その区間で分 布に変化があるが、蒸留水は分布にあまり変化がない. よって、蒸留水では応力減少時に損傷変数の変化が小さ く、多くの領域が弾性状態にあると考えられ、弾性変形 が応力とひずみの分布に変化を与えていると推定される.

以上のような計算結果の考察より,蒸留水の場合, 側面に局所的な損傷変数増加および変形が生じ,応力が 急減し、そのときの応力とひずみの分布は弾性領域に支配されると推定される.また10%塩水の場合、供試体全体でほぼ一様に損傷変数が増加するために、最大応力以降の応力減少が抑えられ、靱性に富む挙動を示すと考えられる.

## 5. まとめ

塩水化学劣化作用による力学挙動変化を損傷パラメ ータを用いて検討した.また,損傷パラメータを用いて 一軸圧縮試験を模擬したFEMシミュレーションを行った. その結果,損傷パラメータの検討より,蒸留水の場合と 比べて,10%塩水浸潤試料は損傷開始が早く,膨張性に 富む材料であると推察された.FEMシミュレーションよ り,側面の局所的な変形は応力の急減を促し,応力急減 時の応力とひずみ分布は弾性状態の領域に支配されると 推定された.

#### 参考文献

- Bäckström, A., Lanaro, F. and Christiansson, R. : Coupled Chemical-Mechanical Behaviour: The Influence of Salinity on the Uniaxial Compressive Strength of the Smalands Granite, Sweden Proc. of the Geoproc 2006 International Symp. pp.437-443, 2006.
- 2) Lemaitre, J.: A course on damage mechanics. Springer-Verlag, 1992.
- Yamamoto, K., Kobayashi, A. and Aoyama, S. : Change in damage parameters of rocks due to degradation, *Proc. Of the international workshop on prediction and simulation methods in geomechanics*, Athens, pp.49-52, 2003.
- Fairhurst, C.E. and Hudson, J.A. : International Society for Rock Mechanics Commission on Testing Methods, Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 36, pp279-289, 1999.
- Murakami, S. and Kamiya, K. : Constitutive and Damage Evolution Equations of Elastic-Brittle Materials Based on Irreversible Thermodynamics, *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 39(No. 4), pp.473-486, 1997.
- 6) Kobayashi, A., Yamamoto, K., Aoyama, S., Chijimatsu, M. and Fujita, T. : Changes in Intact Rock Damage Parameter due to Chemical Effects and Their Influence on Failure Phenomena, *Proc. of the Geoproc 20-06 International Symp.* pp.281-286, 2006

# CHANGES IN ROCK DAMAGE PARAMETERS DUE TO CHEMICAL EFFECTS OF SALT WATER

# Akira KOBAYASHI, Kiyohito YAMAMOTO, and Shigeyasu AOYAMA

To investigate the effect of the chemical degradation on the mechanical behavior, the rock samples preserved in the 10 % salt water and distilled water for 90 days are subjected to the unconfined compression test. The rock samples were obtained from Äspö HRL in Sweden. The damage parameters were identified from the unconfined compression tests for two types of rock samples. By investigating the change in the damage parameters of the chemically degraded rock, the effect of the chemical degradation was tried to infer. Moreover, the 3-D finite element simulation was carried out using the damage parameters.