

## 脆性材料のクリープ現象における応力再配分に関する考察

CONSIDERATIONS OF STRESS REDISTRIBUTION  
ON CREEP PHENOMENA OF BRITTLE MATERIALS吉田 秀典<sup>1)</sup>, 福原 健司<sup>2)</sup>

Hidenori YOSHIDA and Kenji FUKUHARA

1) 香川大学 工学部 (〒761-0396 高松市林町 2217-10, E-mail: yoshida@eng.kagawa-u.ac.jp)

2) 芝田化工設計 技術部 (〒590-0002 堺市砂道町 1-13-25, E-mail: k-fukuhara@sks-eng.co.jp)

Recently, the interest in tension creep of brittle materials such as concrete or rock mass has been increased. In this research, the constitutive model for the tension creep is constructed from a mechanical point of view for the brittle materials. The model is constructed on the basis of a stress-corrosion and implemented into finite element analysis code. In analyses, a stress redistribution of the material is numerically considered and the sensitive analyses in terms of input parameters are carried out. The numerical results indicate that the tension creep behavior of the brittle materials can be roughly reproduced by the proposed method, and that the stress redistribution can be one of the most important factors so as to express the creep phenomena of the brittle materials.

**Key Words:** Stress Redistribution, Creep, Brittle Material, Crack Growth

## 1. 緒言

近年, 原子力施設, 燃料貯蔵施設あるいは廃棄物処分施設などにおいて, 様々な観点からクリープ現象に関する関心が高まりつつある。例えば, 高レベル放射性廃棄物を地層処分する場合, 放射性物質の半減期が極めて長く, 処分施設については, 数千年のオーダーで施設の健全性が求められており, 「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次取りまとめ-」<sup>(1)</sup>では, 岩盤など施設を構成する材料のクリープに関する研究の必要性を論じている。

各種材料のクリープ現象を論じるためには, 数値解析的なアプローチが補完的な役割を果たすものと思われるが, 室内実験や計測より解析パラメータを設定する現象論的なモデルでは, 寸法効果や応力再配分などが相俟って, 時間依存的な挙動を精度良く表現できるとは限らない。したがって, いかなる条件においても普遍的な状況を再現しうるメカニズム立脚的なモデルが不可欠であると考える。

ここで, メカニズム立脚的なモデルが不可欠であると考える理由の一つである, 応力再配分という現象に着目する。材料は一般に, 何かしらの原因で剛性が低下した場合, 元々当該領域に存在した余分な応力を, 剛性が低下していない領域(健全領域)に再配分する。例えば, 岩岡と高田<sup>(2)</sup>は, 燃料電池改質器の反応管について, クリープ解析から得られる

応力の時刻歴変化と反応管素材のクリープ破断強度からクリープ累積損傷値を求め, さらに破断寿命を推定する方法を考察しているが, その中で, 応力再配分の重要性を指摘している。コンクリートや岩盤といった脆性材料においても, ひび割れ/クラックの発生および成長によって剛性が低下し, 応力が再配分されることが知られており, 濱島と元島<sup>(3)</sup>は, クリープ挙動を考慮に入れることが出来る岩盤の変形モデルを提案しているが, クリープ挙動と応力再配分の関係は明確となっていない。コンクリートや岩盤といった土木分野の脆性材料に関しては, クリープ挙動と応力再配分の関係に関する研究事例が少なく, また, そのメカニズムが汎用の解析手法に組み込まれていないのが現実である。

そこで本研究では, 土木分野の脆性材料における引張クリープを例に, まず, メカニズム立脚的な引張クリープのモデル化を行い, さらに, そのモデルを有限要素解析コードに組み込むことで, クリープ挙動と応力再配分の関係について考察を加える。

## 2. 引張クリープのモデル化

引張応力下における脆性材料のクリープ現象のモデル化に関しては, 本研究では, 応力腐食割れの考え方に基づいてモデル化を行うこととした。脆性材料の内部にあるクラックにおいて, その先端に生じる引張力が臨界値(強度値)以下でもそのクラックが進展することがある。こうしたクラック

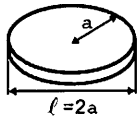


Fig. 1 Penny-shaped crack

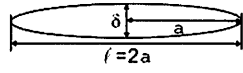


Fig. 2 cross-section

の進展はサブクリティカルなクラック進展 (subcritical crack growth) と言われるが、この中でも、引張力の助けを借りた環境に含まれる腐食種 (水分, 化学種) による化学反応によって引き起こされるものを応力腐食 (stress corrosion) 割れと言う<sup>(4)</sup>。応力腐食割れは、一般的には金属の分野で研究が進んできたものであるが、岩石などの脆性材料でも確認されている<sup>(5)</sup>。

ここで、Fig1に示すように、半径  $a$  のコイン型のクラック (その断面は Fig2) が存在し、無限遠方において、クラック面に対して垂直となる方向に引張一様応力  $\bar{\sigma}$  が作用していると仮定する。この場合、クラック先端における応力拡大係数  $K_I$  は、以下のように表される。

$$K_I = \frac{2}{\pi} \bar{\sigma} \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

応力拡大係数が材料の固有の値である破壊靱性  $K_{IC}$  より小さい場合、応力拡大係数とクラックの進展速度は、対数軸上で線形近似できることが知られている<sup>(5)</sup>。すなわち、クラックの進展速度  $dl/dt$  は応力拡大係数の関数として、

$$\frac{dl}{dt} = R(K_I)^n \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $R$  と  $n$  は実験より定まる材料定数で、温度・含水率・pH といった環境条件によって変化することが知られている。これより、与えられた応力に対してクラック長と時間の関係が得られる。

また、クラックの平均開口変位量  $\bar{\delta}$  (Fig2 参照) は、次式で表される<sup>(6)</sup>。

$$\bar{\delta} = \frac{16(1-\nu^2)a}{3\pi E} \times \bar{\sigma} \quad (3)$$

ここで、 $E$  および  $\nu$  は基質材料の弾性係数およびポアソン比である。

さらに、平均ひずみ  $\bar{\epsilon}_{ij}$  は次式で定義される。

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_{ij} &= \frac{1}{V} \int_V \epsilon_{ij} dV = \frac{1}{V} \int_V \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) dV \\ &= \frac{1}{V} \int_S \frac{1}{2} (u_i n_j + u_j n_i) dS \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $V$  と  $S$  は供試体の体積と境界面、 $u_i$  は変位ベクトルの成分、 $n_i$  は  $S$  における単位法線ベクトルの成分である。上述したようなクラックが変形することにより生ずる法線方向ひずみ  $\bar{\epsilon}_n^c$  は、式 (3) を式 (4) に代入して、

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_n^c &= \frac{N}{V} \int_{S^c} \frac{16(1-\nu^2)a}{3\pi E} \bar{\sigma} dS \\ &= \frac{N\pi a^2}{V} \frac{16(1-\nu^2)a}{3\pi E} \bar{\sigma} \end{aligned} \quad (5)$$

と表される。ここで、 $N$  は体積  $V$  中に含まれるクラックの個数を表す。一般に、全体ひずみは弾性ひずみとクリープひ

ずみのような非弾性ひずみとの和となることから、次式が得られる。

$$\bar{\epsilon}_n = \left( \frac{1}{E} + \frac{N\pi a^2}{V} \frac{16(1-\nu^2)a}{3\pi E} \right) \bar{\sigma} \quad (6)$$

これより、平均ひずみと平均応力の関係が得られ、こうした関係を有限要素解析コードに組み込むことで、クリープに関する有限要素解析が可能となる。これら一連の式は、与えられた応力  $\bar{\sigma}$  に対して経過時間とともにクラックが進展し、それと同時にその開口変位が増大するため、クラックを包含する材料のクラック面と直交する方向の等価な弾性係数は時間とともに小さくなることを示唆している。

### 3. 適用例

#### 3.1. 解析概要

本研究では、前章の手順で導かれた構成モデルを3次元有限要素解析コードに組み込み、任意の形状/境界条件における、主として脆性材料に関するクリープ解析を可能にした。用いた要素は、すべて3次元8節点ソリッド要素である。解析例としては、文献<sup>(7)</sup>にて実施しているコンクリートのクリープ実験を参考に解析を行った。供試体の大きさは100 mm × 100 mm × 400 mm の角柱体で、載荷引張応力を0.8 MPa, 1.2 MPa および1.6 MPa の3ケースについて実験を行っている。なお、それぞれのケースにおける載荷引張応力/引張強度比は0.29, 0.52, 0.63となっている。若齢クリープを検討事項から排除するために、載荷時材齢を3日とし、ひずみの測定は供試体の両側面に埋め込んだプラグを介してホイットモア型ひずみ計により実施している。実験に関する詳細は文献<sup>(7)</sup>を参照されたい。実験における対象性を考慮し、本解析では、供試体全体の8分の1の領域 (50 mm × 50 mm × 200 mm, 全部で2048要素) を解析領域とした。境界条件としては、側面の2面 (50 mm × 200 mm の面) および底面 (50 mm × 50 mm の面) では面に直交する方向の変位を固定し、上面 (50 mm × 50 mm の面) に載荷した。

本論文では、紙面の都合より、載荷応力 ( $\bar{\sigma}$ ) を0.8 MPa および1.6 MPa のケースに関する解析結果を掲載することとした。両ケースにおける静弾性試験より得られた結果を参考にして、 $\bar{\sigma}=0.8$  MPa および1.6 MPa のケースの弾性係数をそれぞれ30.0 GPa および27.0 GPa とした。なお、文献にはポアソン比に関する情報が無かったため、コンクリートとして一般的な0.2を採用した。

前章で示したクリープモデルの解析パラメータは、上述した弾性定数の他に、クラックの初期長 ( $l_0 = 2a_0$ )、クリープ定数 ( $R, n$ )、そしてクラックの個数 ( $N$ ) である。ここで、供試体全体の体積  $V$  に占めるクラックの密度  $\rho$  を定義すると以下のようなになる。

$$\rho = \frac{NV^c}{V} \quad (7)$$

ここで、 $V^c$  はクラック1個の体積であり、本研究では、コイン型のクラックを仮定していることから、 $V^c = \pi a^2 \bar{\delta}$  となる。全体の体積  $V$  とクラックの個数  $N$  は変化しないので、載荷直後におけるクラックの密度 ( $\rho_0$ )、半長 ( $a_0$ ) および平均

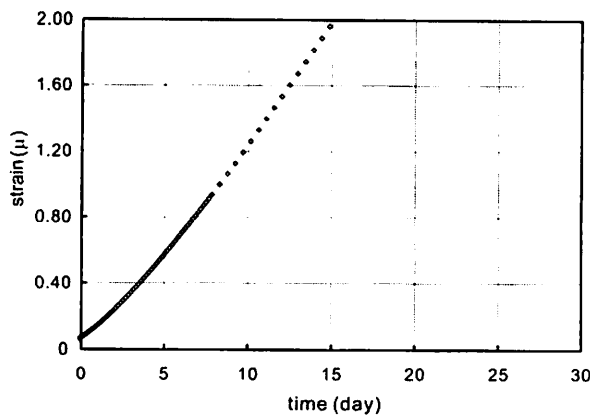


Fig. 3 Strain vs. time (All elements are creep elements)

Table 1 Numerical cases and their parameters

	$\bar{\sigma}$	$R$	$n$	$\rho_0$
Case1-1	0.8	$6.0 \times 10^{-7}$	0.4	$1.0 \times 10^{-5}$
Case1-2	0.8	$6.0 \times 10^{-7}$	0.4	$1.0 \times 10^{-6}$
Case1-3	0.8	$6.0 \times 10^{-7}$	0.8	$1.0 \times 10^{-6}$
Case1-4	0.8	$6.0 \times 10^{-7}$	1.2	$1.0 \times 10^{-6}$
Case2/3-1	1.6	$6.0 \times 10^{-7}$	0.4	$1.0 \times 10^{-5}$
Case2/3-2	1.6	$6.0 \times 10^{-7}$	0.4	$1.0 \times 10^{-6}$
Case2/3-3	1.6	$6.0 \times 10^{-7}$	0.8	$1.0 \times 10^{-6}$
Case2/3-4	1.6	$6.0 \times 10^{-7}$	1.2	$1.0 \times 10^{-6}$
Case2/3-5	1.6	$6.0 \times 10^{-6}$	0.4	$1.0 \times 10^{-6}$

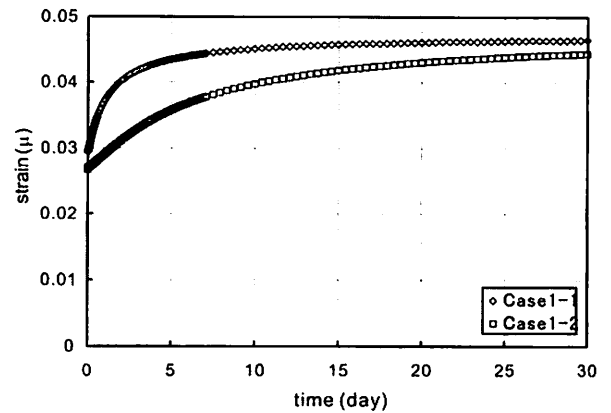


Fig. 4 Strain vs. time (Case1, various densities)

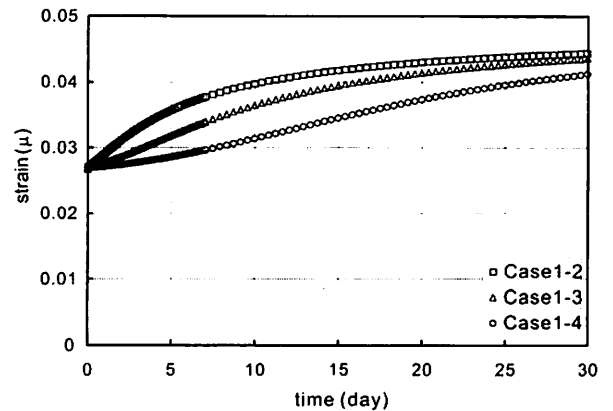


Fig. 5 Strain vs. time (Case1, various  $n$ )

開口変位 ( $\bar{\delta}_0$ ) を用いると次式が得られる。

$$\frac{N}{V} = \frac{\rho}{V_c} = \frac{\rho_0}{V_0^c} = \frac{\rho_0}{\pi a_0^2 \bar{\delta}_0} \quad (8)$$

なお、クラックの初期長に関しては、引張クリープに影響を及ぼす空隙の細孔直径が  $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$  <sup>(7)</sup> であることから、本解析では  $0.1 \mu\text{m}$  を採用した。また、クリープ定数 ( $R$ ,  $n$ ) については、岩石の結果ではあるが文献 <sup>(5)</sup> より類推して用いた。その他のパラメータに関しては調査が難しいため、実験結果に近いものになるように設定した。

まず、 $R = 6.0 \times 10^{-7}$ ,  $n = 0.4$  とし、供試体全体に微視クラックが存在し、そのクラックが進展するような要素（以降、クリープ要素と呼ぶ）を配置した解析を実施した。載荷応力 ( $\bar{\sigma}$ ) を  $0.8 \text{ MPa}$  におけるひずみ（載荷方向と同方向の直ひずみで、以降プロットするひずみも同様）を Fig.3 にプロットする。なお、本解析では、供試体の頂部中央における変位を抽出し、それを供試体の高さで除すことでひずみを求めている。また、0日の段階で生じているひずみは弾性ひずみを意味し、その後の増分がクリープひずみに相当する。図より、クリープひずみは時間とともに増大し、収束することはない。また、ひずみのレベルもかなり大きい。これは、式(1)よりクラックの進展とともに応力拡大係数が大きくなり、さらに、式(2)よりクラック進展速度が増加するため、時間とともにクラックの開口変位は雪だるま式に大きくなる。したがって、全領域にクリープ要素を配置してしまうと、クラックの進展にともなう応力再配分を期待することができず、領

域全体が同等にクリープして大きなひずみを生じることとなる。なお、この傾向は、載荷応力 ( $\bar{\sigma}$ ) が  $1.6 \text{ MPa}$  の場合も同じであった。

### 3.2. 応力再配分を考慮した解析

#### (1) ひずみ

前節のように、全領域にクリープ要素を配置してしまうと、クラックの進展にともなう応力再配分といった現象が起こらず、領域全体が同等にクリープして大きなひずみを生じてしまう。そこで本節では、応力再配分が生じるような問題設定を行うこととした。具体的には、潜在的に微視クラックを含むクリープ要素の周囲に、そうしたクラックを含まない領域（本研究では弾性要素）を配置することとした。これによって、クリープ要素ではクラックの進展にともなって、その要素におけるクラック開口方向のコンプライアンスが増大すると同時に応力が低下し、その応力低下に相当する応力が周辺の弾性要素に配分されることとなる。本解析では、載荷応力 ( $\bar{\sigma}$ ) が  $0.8 \text{ MPa}$  の場合 (Case1) は、全要素の体積に対してクリープ要素の体積を 20%、弾性要素の体積を 80% とした。これは、例えば一辺  $L$  の立方体領域（これが1つのユニット）を考えた場合、その中央に一辺  $0.59L$  の立方体領域にクリープ要素を、そしてクリープ要素を包含するように弾性要素を配置することで表現している。こうした2系統の要素を含むユニットを解析領域全体に配置して解析を行なう。また、載荷応力 ( $\bar{\sigma}$ ) が  $1.6 \text{ MPa}$  の場合は、全要素

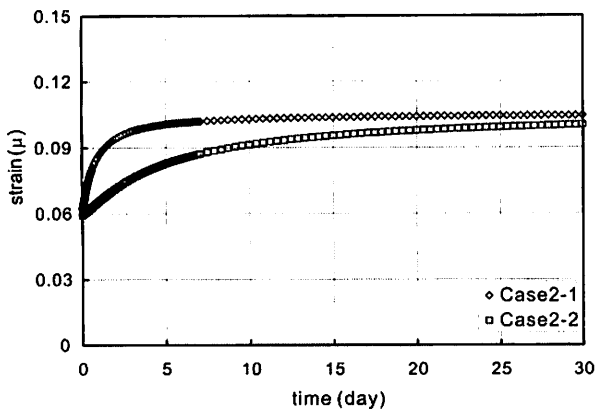


Fig. 6 Strain vs. time (Case2, various densities)

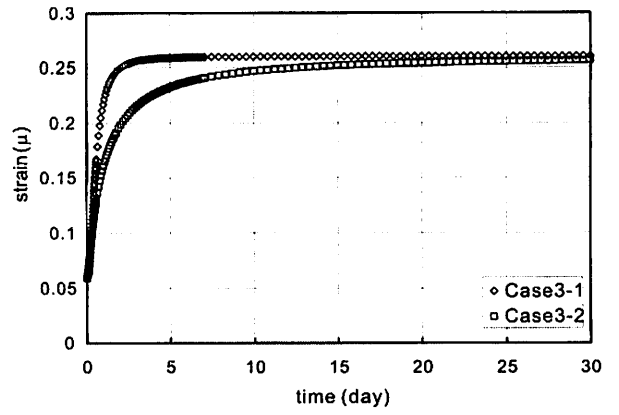


Fig. 9 Strain vs. time (Case3, various densities)

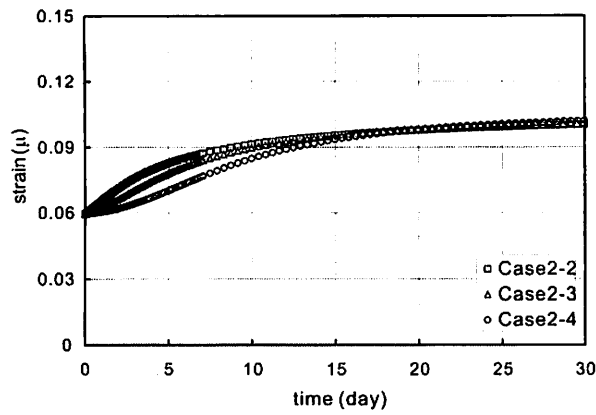


Fig. 7 Strain vs. time (Case2, various  $n$ )

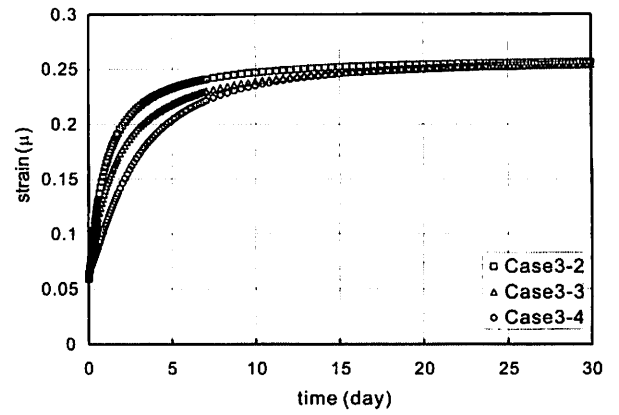


Fig. 10 Strain vs. time (Case3, various  $n$ )

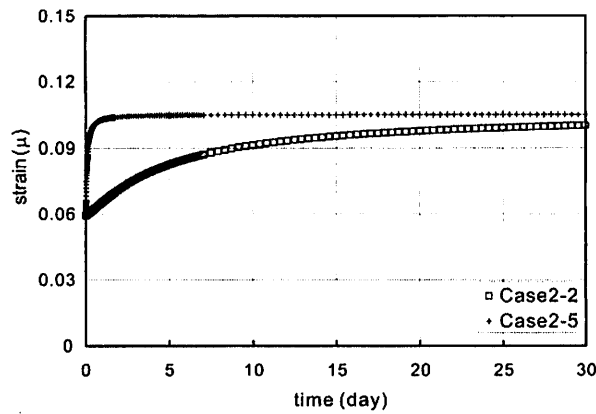


Fig. 8 Strain vs. time (Case2, various  $R$ )

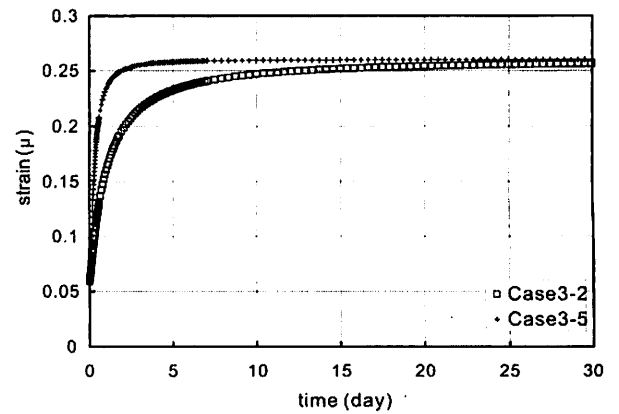


Fig. 11 Strain vs. time (Case3, various  $R$ )

の体積に対してクリープ要素の体積が 20% (Case2) および 50% (Case3) という 2 ケースを考え, Case1 と同様に配置した。

こうしたユニットを配置することで, どのような挙動を呈するのかについて考察を行う。同時に, 解析において設定したクリープ定数 ( $R$ ,  $n$ ) およびクラックの初期密度 ( $\rho_0$ ) がどのような影響を及ぼすかについて把握するために, こうしたパラメータを変化させて解析 (感度解析) を実施した。解析ケースの一覧を Table1 に示す。

載荷応力 ( $\sigma$ ) が 0.8 MPa の場合 (Case1) における初期密度 ( $\rho_0$ ) およびクリープ定数  $n$  の影響を考察するために, ひずみを Fig.4 と Fig.5 にプロットする。図より, 初期密度を

増加させることで初期段階よりひずみが大きくなるが, クリープ要素から弾性要素へ応力が再配分されてクリープがほぼ停止するため, 初期密度の大小に関わらず, 30 日ほど経過するとクリープ量はそれほど変わらないことが分かる。また,  $\rho_0 = 1.0 \times 10^{-6}$ ,  $R = 6.0 \times 10^{-7}$  に固定して  $n$  を変動させた場合, 今回設定した範囲では, 上述した初期密度を変動させた場合に比べ, 変化が穏やかであることが分かる。

載荷応力 ( $\sigma$ ) が 1.6 MPa で, 全要素に対してクリープ要素が 20% の場合 (Case2) における初期密度 ( $\rho_0$ ) およびクリープ定数 ( $R$ ,  $n$ ) の影響を考察するために, ひずみを Fig.6 から Fig.8 にプロットする。図より, 他のパラメータを固定させ初期密度あるいは  $n$  を変動させた場合, ひずみのレベ

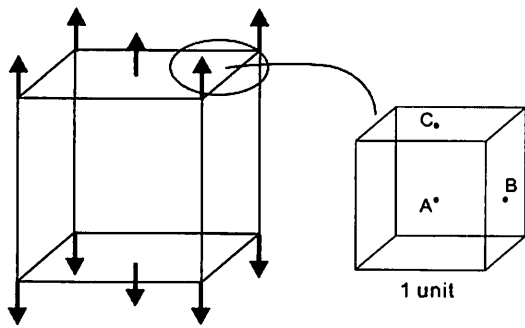


Fig. 12 Basic concept of numerical specimen

ルこそ異なるが、その傾向は Case1 と同じことが分かる。また、 $\rho_0 = 1.0 \times 10^{-6}$ ,  $n = 0.4$  に固定して  $R$  を変動させた場合、 $R$  が大きいほど初期の段階のクリープひずみが大きく、傾向としては、初期密度を増加させた場合と同じである。

載荷応力 ( $\bar{\sigma}$ ) が 1.6 MPa で、全要素に対してクリープ要素が 50% の場合 (Case3) における初期密度 ( $\rho_0$ ) およびクリープ定数 ( $R, n$ ) の影響を考察するために、ひずみを Fig. 9 から Fig.11 にプロットする。パラメータに関する感度としては、Case1 あるいは Case2 と同じであるが、載荷応力が同じである Case2 と比較すると、クリープ要素数の増加にもなってクリープの収束値が増加していることが分かる。

なお、全要素に対してクリープ要素が 50% の場合の解析と実験結果が近く、引張応力が 1.6 MPa では、Case3-2 が最も実験結果に近かったことから、適当なクリープ要素の割合および解析パラメータを用いることで、より実験結果に近い値が得られるものと思われる。しかしながら、温度、湿度、新規クラックの発生など、複雑な要因がクリープ挙動に影響を及ぼすものと思われることから、本モデルのみで現象を再現することにどれだけの意味があるかについては別途議論が必要であろう。

## (2) 応力

上述したように、潜在的に微視クラックを含むクリープ要素の周囲に弾性要素を配置することで、前節で見られたようなひずみの発散現象は見られなくなり、ほぼ収束する現象が得られた。ここでは、応力がどのような方向に再配分されるのかを確認するために、前述したようなクリープ要素とそれを包含するように配置された弾性要素を含む 1 つのユニットに着目し、その中央 (A, クリープ要素)、側面部 (B, 弾性要素)、上面部 (C, 弾性要素) において (Fig.12 参照)、載荷方向と同じ方向成分の応力を抽出した。

Case1-2, Case2-2 および Case3-2 における応力の経時変化をそれぞれ、Fig.13, Fig.14 および Fig.15 に示す。図より、どのケースにおいても同じような応力変化が起こっていることが分かる。これより、クリープ要素では応力が解放されるが、その解放分の応力は弾性要素へ配分、つまり再配分が生じることが分かる。

ここで、A と B の要素を比較すると、時間の経過とともに A の要素では応力が減少しているのに対し、B の要素では応

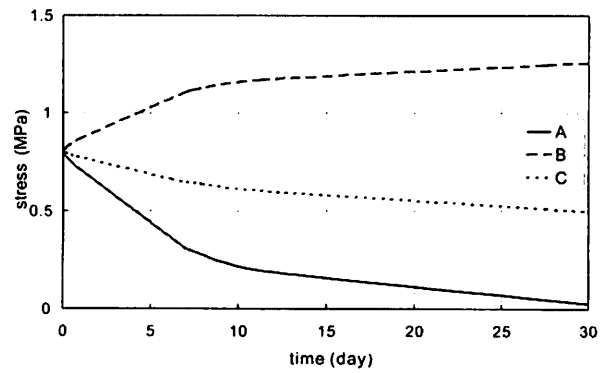


Fig. 13 Stress vs. time (Case1-2)

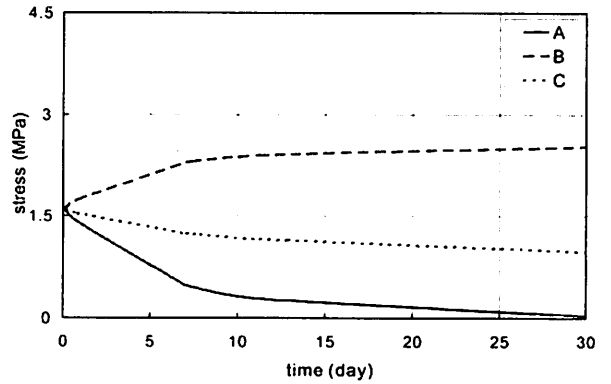


Fig. 14 Stress vs. time (Case2-2)

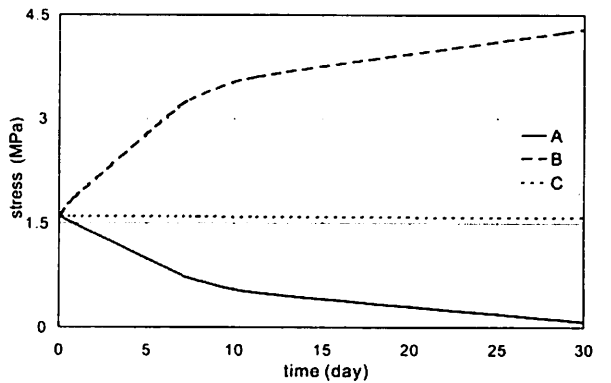


Fig. 15 Stress vs. time (Case3-2)

力が增大している。また、B と C の要素を比較すると、いずれも弾性要素であるが、時間の経過とともに B の要素では応力が增大しているのに対して、C の要素では応力が減少ないしは横ばいである。これより、クリープ要素から全ての弾性要素に応力が均等に再配分されるわけではないことが分かる。一般に、クラックが開く方向では、その方向のみのコンプライアンスが増大、つまり剛性が低減することから、この方向におけるクリープ要素から弾性要素への応力の再配分はほとんどない。逆に、クラックが開く方向と直交する方向ではコンプライアンスの変化がないことから、この方向においてクリープ要素から弾性要素への応力の再配分が生じる。そして、場合によっては、クラックが開く方向に位置する弾性要素 (C) よりクラックが開く方向と直交する方向に位置する弾性要素 (B) へも応力は再配分される (Fig.13 および Fig.14 を参照)。Case3-2 では、クリープ要素

と弾性要素の割合が同じ（体積比が1:1）であるため、メッシュ作成上、1つのユニットにおいて、弾性要素が一番外側に1層となるようなメッシュになった。その結果、Cの要素（弾性要素）の近傍で載荷応力（1.6 MPa）を負担するような形になり応力再配分が見られないが、これに関しては、メッシュを細かくすることで変化するものと思われる。

さらに、載荷応力が同じである Case2-2 と Case3-2 を比較すると、Aの要素の応力の経時変化はそれほど変わらないが、Bの要素の応力の収束値には差がある。これは、クリープ要素と弾性要素の割合（体積比）が異なるため、弾性要素が相対的に少ない Case3-2 では、Bの要素（弾性要素）で応力の増大が著しい。なお、Case3-2のBの要素においては応力がほぼ4.0 MPaに達していることから、材質によっては引張破壊を生じる可能性もあり、こうした現象も、実際のクリープ現象においては奇与があるものと思われる。

#### 4. 結言

本研究では、主として土木分野の脆性材料（コンクリートや岩盤/岩石）の時間依存現象について、いかなる条件においても普遍的な状況を再現しうるメカニズム立脚的なモデルが不可欠であるという観点から、メカニズム立脚的な引張クリープのモデル化を行った。モデル化においては、応力腐食割れの考え方に基づいて引張クリープの予測式を構築し、それを有限要素解析コードに組み込むことで、任意の境界条件に対するクリープ解析手法を開発した。解析にあたっては、応力再配分の効果を論じるために、応力再配分の発生の有無を解析的にモデル化した。この際、併せて解析パラメータ、載荷応力およびクリープ要素数の影響がクリープ現象に与える影響についても簡単に考察を行い、また、実験との関連についても議論を行った。

まず、供試体全領域にクリープ要素を配置する解析を実施した。この解析では、クラックの進展にともない領域全体がクリープして大きなひずみを生じてしまい、モデルの性格上、当然ではあるが、クリープひずみが収束するというような一般的な現象が得られなかった。

次に、こうした実現象との乖離を解消する目的で、供試体にクリープ要素と、それを包含するように非クリープ要素（弾性要素）を配置した。その結果、クリープひずみが収束するような現象が得られた。これは、クラック進展によってクリープ要素のコンプライアンスが増大し、それとともなってクリープ要素から非クリープ要素への応力再配分が生じるためである。解析パラメータがクリープに及ぼす影響としては、指数的に影響を与えるクリープ定数の $n$ が1.0より小さいため、比例定数である密度およびクリープ定数 $R$ の方がクリープ現象に与える影響は大きく、同時に、これらはひずみ速度を支配していることが判明した。また、最終クリープ量は、主として、載荷応力およびクリープ要素と非クリープ要素の体積比に依存することが分かった。

さらに、応力の経時変化より、クリープ要素から非クリープ要素に応力が再配分される解析結果が得られたが、クラッ

クが開口する方向に存在する非クリープ要素には応力が再配分されず、クラックの開口方向と直交する方向に存在する非クリープ要素に応力が再配分されることが確認できた。

本研究では、可能な限り類推/仮定などを導入せず、理論式のみを用いて引張クリープのモデル化を行い、また、応力再配分という現象を解析的に取り込むことで、比較的現実に近いクリープ挙動の再現を可能とした。土木系の脆性材料に関するクリープモデルにおいては、コンプライアンスが変化する、あるいは応力再配分するというようなメカニズムに立脚したモデルが少なく、依然、現象論的なモデルが実際の設計などで採用されることが多い。しかしながら、重要施設、例えば高レベル放射性廃棄物の処分施設を構成する材料については、より精度/確度の高い解析が望まれていることから、こうしたメカニズム立脚型のモデルの開発にもエネルギーを注ぐべきであると考えられる。

なお、前章でも論じた通り、本研究ではクリープに影響を与える温度、湿度などの外部要因を考慮していないため、あくまで定性的なことしか言及できない。したがって、今後はこうした影響因子についても考えていく必要がある。また、今回の一連の解析ではクリープ要素/弾性要素の配置が全体挙動に及ぼす影響について検討していないが、今後、これについても議論の必要があるものと思われる。

#### 参考文献

- (1) 核燃料リサイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性、一層処分研究開発第2次取りまとめ一 総論レポート、IV-20(1999)。
- (2) 岩岡誠人、高田志郎：高温機器のクリープ解析、MEEエンジニア、48(2003)、pp. 16-18。
- (3) 濱島良吉、元島三明：開口、すべりを考慮した3次元岩盤の変形・破壊シミュレーション、前橋工科大学紀要論文、70(2003)、pp. 13-18。
- (4) 工業技術院資源環境技術総合研究所編：資源環境技術総合研究所/80年史(CD-ROM)(2001)、pp. 46-54。
- (5) Atkinson, B. K.: Subcritical Crack Growth in Geological Materials, Journal of Geophysical Research. 89(B6)(1984)、pp. 4077-4114。
- (6) H.Horii and S.Nemat-Nasser: Brittle failure in compression: splitting, faulting and brittle-ductile transition, Phil. Trans. Roy. Soc. London. 319(1549)(1986)、pp. 337-374。
- (7) 熊野知司、西林新蔵、井上正一、吉野 公：コンクリートの空隙構造の変化に基づく引張クリープ予測モデルに関する研究、土木学会論文集、613/V-42(1992)、pp. 121-135。