

## 亀裂性岩盤における透水-変形連成挙動に関する研究

A Study on Flow-Deformation Coupled Behavior of Discontinuous Rock Mass

吉田秀典\*・乗金悠里\*\*・森本亮司\*\*\*・井上純哉\*\*\*\*

Hidenori YOSHIDA, Yuri NORIKANE, Ryoji MORIMOTO, Junya INOUE

\*正会員 博士(工学) 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

\*\*株式会社リオス (〒702-8006 岡山県岡山市藤崎 564-5)

\*\*\*香川大学大学院生 大学院工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

\*\*\*\*正会員 博士(工学) 東京大学准教授 大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

In Japan, it is planned to dispose high-level radioactive waste and TRU waste in a stable rock mass. As for the HLW problems, it is necessary to ensure that residual radioactive substances are kept from reaching the biosphere after many thousands of years. Thus the mathematical model by which not only mechanical but also hydraulic behaviors can be predicted for a long-term is of prime importance. The mechanical and hydraulic properties of discontinuous rock mass have strong correlations respectively. In this study, a creep test with associated to the coupled behaviors is conducted with the use of an artificial specimen so as to seize the mechanism of the mechanical and hydraulic behaviors. Moreover, the numerical analysis by which the coupled behavior in the creep test is reproduced is carried on, and the numerical result has modestly good accordance with the measured data. From the comparison of the experiment and the analysis, the mechanism of coupled behavior is discussed.

**Key Words :** *discontinuous rock mass, discontinuity, permeability, flow, deformation, coupled behavior*

## 1. はじめに

2002年に原子力発電環境整備機構が高レベル放射性廃棄物の処分場建設に向け、候補地選定のための概要調査地区の公募を開始し、また、2005年には、九州電力が玄海原発で実施を目指すプルサーマル発電計画が国から許可され、地元自治体からも了解が得られるに至っている。わが国だけでなく米国においても、国際的な核不拡散と米国内の放射性廃棄物削減のため、直接地下に処分する方式から再処理方式へと方針転換し、2020年に高速増殖炉の運転を開始する計画がある。こうしたエネルギー施設の稼働にともなう、低レベルから高レベルに至るまで様々な放射性廃棄物が排出されることとなる。

わが国では含有放射性廃棄物の濃度などの特性に応じて、地層処分、余裕深度処分、トレンチ処分、ピット処分を検討し、トレンチ処分やピット処分の一部については操業に至っている<sup>1)2)</sup>。地層処分、余裕深度処分については、対象となる廃棄物の放射能レベルが高くその処分の期間は長期に亘るため、処分坑道周辺岩盤に関する長期健全性の確保が課題となる。特に、両処分事業では、核種が地下水により生物圏に運搬される時間とその量によって安全性が評価されるため、力学性能だけではなく透水性能についても詳細に検討しておく必要がある。

地層処分の場合、その処分深度は300m以深である

ことを考慮すると、処分坑道の周辺は主として岩盤ということになる。わが国の岩盤の成因を考えると、岩盤中には少なからず亀裂が存在する可能性が高い。さらに、大きな地山応力の下で処分空洞などの地下空洞を掘削した場合、空洞周辺においてEDZ(掘削損傷領域, Excavation Damaged Zone)が出現することが懸念される<sup>1)2)</sup>。この場合、岩盤の透水性能は、調査段階のものと大きく異なることが予想される。

岩盤の浸透流に関する研究は、ダム、トンネル、地下空洞の建設といった土木工学的な分野だけでなく、森林の機能(洪水抑制・保水機能)の解明(農学的観点)、鉱山採掘後の斜面の安定(資源工学的観点)、地下水汚染の問題(水環境科学的観点)など多岐にわたる。



図-1 従来試験の概要図

こうした岩盤浸透流に関する研究の中でも、特に岩盤中に包含される亀裂に関する研究事例に焦点を絞ると、原位置において亀裂の透水性を判定する試み<sup>3)</sup>や透水箇所の特定制に関する研究<sup>4)</sup>といった透水性能の評価に関する研究、亀裂の方向分布に関する研究<sup>5)</sup>、亀裂の大きさに関する研究<sup>6)7)</sup>、亀裂の空間分布に関する研究<sup>8)</sup>、亀裂の頻度に関する研究<sup>1)</sup>、亀裂の開口幅に関する研究<sup>9)10)</sup>などが挙げられる。このうち、亀

裂／不連続面の物性や特性と変形に関することを論じたものはそれほど多くなく、Sundaram et al. <sup>11)</sup> など、件数は限られているのが現実である。

岩盤における力学現象と水理現象の連成現象に関しては、金子ら <sup>12)</sup> の研究によれば、従来の試験機では、载荷（変形）にともなって発生する亀裂の透水性能を評価することは困難であると報告されている。図-1には従来試験機の概要を示す。従来試験機では、円柱供試体に対して軸方向に载荷し、同時に軸方向に水を流して流量の変化を測定している。一般的な円柱供試体の場合、軸方向の圧縮によって図のような亀裂（せん断帯）が発生する。载荷にともなってその亀裂は変形を大きくし開口などを生じるが、この場合、軸方向に水を流しても流量に大きな変化がみられない。

そこで、著者らの一部（吉田と井上）は発生した亀裂に平行な方向に水を流すことが可能な試験が必要であると考え、それが可能な装置の開発を実施した（特許出願番号：特願 2006-224400、発明の名称：透水試験機および透水試験方法）。図-2に、開発装置の概要を示す。開発装置は平面ひずみ圧縮試験をベースとしているので、面外方向の変形を拘束し、側部から拘束圧を与え、底部を固定して上部から载荷を行う。この場合、载荷にともなって面外方向と垂直となる亀裂が形成されるが、こうした亀裂の形成にともなって変化する透水性能を評価するために、開発装置では面外方向に流体を流すこととした。つまり、開発装置では载荷にともなう亀裂の発生方向を制御でき、その方向に水を流すことから、最も透水係数が大きくなる方向における透水性能の評価が可能となった。

本研究では、この装置を用いて透水－変形挙動の連成試験を行い、こうした連成挙動のメカニズムを解明するために、数値解析による検討を行うこととした。具体的には、供試体内の亀裂内を流れる浸透モデルを構築し、構築モデルを用いて試験の再現を行い、得られた数値解析結果を基に、変形（本研究ではクリープ変形に着目）にともなって変化する透水性能を評価することとした。

## 2. 解析モデル

軟岩のクリープ現象は内在する間隙などによる影響を強く受け、比較的大きな変形量が確認されるが、硬岩の場合、クリープ変形はほとんど見られないと言われる <sup>13)14)</sup>。一方、透水係数については、処分坑道などの掘削によって既存の亀裂が変形する、あるいは新規亀裂が形成されることにより、透水係数は100倍になるとも言われている <sup>14)</sup>。特に、処分坑道掘削後の周辺岩盤の応力状態は複雑で、一般には、坑道の放射方向の応力が解放され、逆に、周方向の応力が卓越するという偏差的な状態になる。こうした偏差的な応力状態

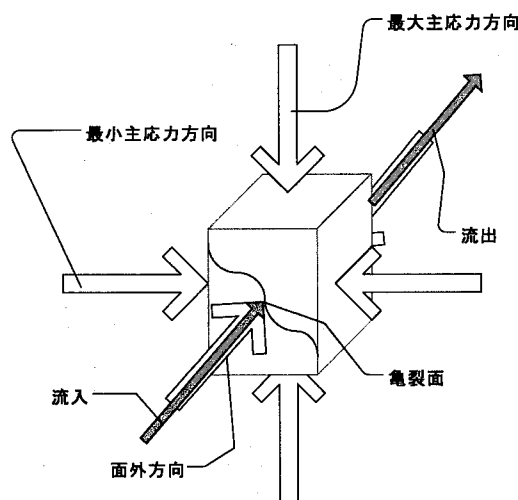


図-2 試験機の概要

によって、亀裂の変形は増大する可能性がある。こうした現象は、短期的な観点からは周知の事実であるが、長期的な観点からはほとんど議論されていない。亀裂が、短期、長期に関わらず変形する場合、周辺岩盤の透水性が増大し、放射性廃棄物の処分シナリオに影響を及ぼす可能性も否定できない。そこで本研究では、比較的硬質な亀裂性岩盤を対象とし、こうした亀裂性岩盤がクリープ変形を生じた際に変化する透水性能について、数値解析を用いて考察することとした。

### 2.1 流体モデル

一般に、狭い平板中を流れる流体の解析には、土木工学の分野では「ヘルショーの流れ」が用いられることが多い。しかしながら、変形にともなって平板の間隔が広がったり、あるいは狭くなったりするような場合は、「ヘルショーの流れ」よりもベアリング流体に近い挙動を呈すると考え、本研究では、亀裂間を流れる流体の解析には以下に示すようなモデルを採用することとした。

説明を容易なものとするために、今、2次元平面内に亀裂があるものとする。亀裂に挟まれた区間（幅  $h$ ）において、その亀裂面に直交する方向の流体の流れを無視する場合、Navier-Stokes の運動方程式は以下のように記述される。ただし、亀裂面に沿う方向を  $x$  方向、亀裂面に直交する方向を  $y$  方向としている。

$$0 = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

ここで、 $p$  は圧力、 $u$ 、 $\rho$  および  $\mu$  はそれぞれ、流体の  $x$  方向の速度、密度、そして粘性係数である。式 (1) を  $y$  に関して2回積分すると次式が得られる。

$$u(y) = \frac{1}{2\nu} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (2)$$

ここで、 $\nu$  は流体の動粘性係数、 $C_1$  および  $C_2$  は積分定数である。問題を簡単とするために、速度は亀裂間の下面 ( $y=0$ ) と上面に位置する亀裂 ( $y=h$ ) の相対速度を考え、境界条件を  $(y,u) = (0,0), (h,U_0)$  ( $U_0$  は相対速度) とする。これらを (2) に代入すると、積分定数は、

$$C_1 = \frac{U_0}{h} - \frac{1}{2\nu} \frac{\partial p}{\partial y} h, \quad C_2 = 0 \quad (3)$$

となる。また、平均流速  $\bar{u}$  は以下のように定まる。

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u(y) dy = \frac{U_0}{2} - \frac{h^2}{12\nu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4)$$

2次元平面内で考えていることから、流入側および流出側の高さはそれぞれ  $h$ ,  $h + \frac{\partial h}{\partial x} dx$ , 幅が  $dx$  の領域へ、ある微小時間  $dt$  の間に流入および流出する質量はそれぞれ  $\rho \bar{u} dt h$  および  $\rho \left( \bar{u} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} dx \right) dt \left( h + \frac{\partial h}{\partial x} dx \right)$ , そして、高さ  $h$  が微小時間  $dt$  間に変化することにもなう質量変化は  $\rho \frac{\partial h}{\partial t} dt dx$  と表される。ここで、(1) 流体はニュートン流体 (一定の粘性を有する), (2) 鉛直方向への圧力勾配はない, (3) 層流状態, (4) 慣性項は無視, (5) 流体は非圧縮流体 (一定の密度を有する), (6) 熱の効果は無視, というような前提の下で質量保存則を考えると、式 (4) を用いることで次式が導かれる。

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_0 h) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{12\nu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (5)$$

この他に、流れている流体とは別の流体の流入/流出などがある場合は、式 (5) に加えればよいが、本研究ではこうした流入/流出などは考えない。また、式 (5) を三次元問題に拡張すると、

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \cdot (\rho U_0 h) - \nabla \cdot \left( \frac{\rho h^3}{12\nu} \nabla p \right) = 0 \quad (6)$$

となる。これを離散化し、有限要素解析を行なう。

## 2.2 クリープ変形モデル

### (1) 材料基質部のクリープ

本研究と並行して実施した試験は以下の通りである。

1. 亀裂を有しない供試体に対する静的平面ひずみ試験同時透水試験
2. 亀裂を有する供試体に対する静的平面ひずみ同時透水試験
3. 亀裂を有しない供試体に対する平面ひずみクリープ同時透水試験
4. 亀裂を有する供試体に対する平面ひずみクリープ同時透水試験

本論文では亀裂を有する岩盤のクリープ現象を対象としていることから、対応する試験は「亀裂を有する供試体に対する平面ひずみクリープ同時透水試験」とい

うことになるが、「亀裂を有しない供試体に対する平面ひずみクリープ同時透水試験」を実施した結果、亀裂を有しない供試体でも大きなクリープひずみが観測されたことから、解析においては、亀裂を除く材料基質部のクリープについても何らかのモデル化が必要となる。なお、試験においては、亀裂を有しない供試体はクリープ変形を呈するが透水性が増大するというような現象は確認されなかった。

本来、数値解析をするにあたっては、供試体の組成などを詳細に調査し、その上で力学的挙動をモデル化する必要がある。しかしながら、本研究の主眼は、変形にともなって変化する透水性能の評価にあること、また、亀裂を有しない供試体における試験では透水性の増大が確認できなかったことから、材料基質部のクリープ現象については詳細なモデル化を行わず、本研究では、Carter ら<sup>15)</sup>が岩塩の一軸クリープについて検討したクリープ則、

$$\dot{\epsilon}^c = k \sigma^n T^p t^q \quad (7)$$

を採用することとした。ここで、 $\dot{\epsilon}^c$  は相当クリープひずみ、 $\sigma$  は軸応力、 $T$  は温度、 $t$  は時間で、 $k$ ,  $n$ ,  $p$  および  $q$  はクリープに関する係数である。どの係数がどの程度の感度があるのかを検討する上で、全ての係数について感度分析を実施すると膨大な計算パターンになるため、本論文では、定温下を仮定し、Norton Bailey の式<sup>16)</sup>を採用した。さらに、対象岩盤が非線形的な挙動を呈することから、Norton Bailey の式を時間微分した次式 (増分式) を採用した。

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}^c &= q A \sigma^n t^{q-1} && \text{時間硬化則} \\ &= q A^{\frac{1}{q}} \sigma^{\frac{n}{q}} \dot{\epsilon}^c \frac{q-1}{q} && \text{ひずみ硬化則} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $A = k T^p = \text{一定である}$ 。これを多軸応力状態に拡張するには、まず、塑性力学における normality rule をクリープひずみ速度に適用し、以下のようにクリープひずみ速度テンソル  $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ ,

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \dot{\epsilon}^c \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} \right\} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \\ &\quad + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \} \end{aligned} \quad (10)$$

を定義し、さらに、式 (8) の単軸応力  $\sigma$  を相当応力  $\bar{\sigma}$  と置き換える<sup>16)</sup>。

なお、クリープ現象は第1期から第3期のクリープに分けられるが、相当クリープ則では第3期のクリープには対応できない。本来であれば可能な限り第3期のクリープを考慮に入れるべきであるが、前述の通り、変形にともなって変化する透水性能の評価を本研究の目的としているため、ここでは簡素化された式 (8) を採用することとした。なお、試験では、クリープ応力をピーク強度の 80% として実施し、この範囲では明確

な塑性変形を呈していなかったことから、材料基質部については、クリープ変形は考慮するが、塑性変形は考慮しないこととした。

## (2) 亀裂の変形

本研究では、亀裂性岩盤において亀裂がクリープ変形を呈し、その結果、透水性能も変化するという問題を取り扱うわけであるが、圧縮下において亀裂が変形する場合、摩擦すべりの現象が起こることが予想される。したがって、本研究では、こうした摩擦すべり現象を表現できるモデルが必要となる。著者らの一部は、亀裂の摩擦すべりに関する問題に対して、クーロン摩擦則に基づくモデル（以降、「摩擦すべり要素」と呼ぶ）を採用し、その妥当性などについて検討を行っている<sup>17)18)19)</sup>。その結果、本論文で扱う程度の単純な亀裂の摩擦すべり問題であれば、この「摩擦すべり要素」でもおよそその検討が可能であるという結論に至っている。そこで本研究においても、亀裂に相当する箇所に、この「摩擦すべり要素」を導入することとし、また、それ以外の材料基質部（連続体部分）には、通常のソリッド要素を使用することとした。詳細については参考文献を参照されたい。

## (3) 亀裂のクリープ

一般に、亀裂性材料は、主として材料基質部（連続体部分）と亀裂（不連続体部分）で構成される。材料基質部のクリープについては、前述の通り、Norton-Bailyモデルを適用する。亀裂のクリープについては、本研究では、亀裂が徐々に滑動することで、見かけ上、供試体がクリープするような現象を考え、著者らの一部が提案しているモデル<sup>19)</sup>を適用することとした。提案モデルは、亀裂が接触面において減耗するとともに摩擦係数が変化するものと仮定し、次式に示すような摩擦係数低減モデルとなっている。

$$\mu(t) = \begin{cases} \mu_i & \dots\dots\dots (\sigma_n^J(t) < \sigma_y^J) \\ (\mu_i - \mu_r) \times \exp \{-D(\sigma_n^J(t) - \sigma_y^J)\} + \mu_r & \dots\dots\dots (\sigma_n^J(t) \geq \sigma_y^J) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 $\mu(t)$  と  $\sigma_n^J(t)$  は任意時刻の摩擦係数と亀裂における法線応力で、 $\sigma_y^J$  は亀裂に露出した部分の材料の初期降伏応力である。実験から得られた経過時間とクリープひずみより、解析における1ステップ当たりの時間を決定する。このモデルでは、亀裂面の法線方向応力が降伏応力を超えると面が徐々に破壊し、その結果、亀裂面の摩擦係数  $\mu(t)$  が、その初期値  $\mu_i$ （静止摩擦係数）より低下し、最終的には残留値である  $\mu_r$ （動摩擦係数）に至る。摩擦係数が低下すると亀裂は摩擦すべりを生じ、亀裂は徐々に変形する。これによって、上下の亀裂が接触している面積が変化するため、応力状態が変化し、さらに変形が生じる。このような挙動は、巨視的には、クリープ挙動として表現される。

最終的に、上述した理論を組み合わせ、有限要素解

析コードに組み込むことにより、亀裂を有する供試体のクリープ挙動の数値解析が可能となる。

## 3. 透水－変形の連成解析

本章では、亀裂性岩盤がクリープ変形をした際に変化する透水性能を評価するということを念頭におき、透水－変形の連成解析を行う。解析の対象として、本研究と並行して実施した人工供試体に対する平面ひずみ圧縮試験同時透水試験を参考とする。

### 3.1 試験概要

亀裂性岩盤を模擬した人工供試体は豊浦標準砂、石膏そして水を用い、その配合を調節することでやや硬質なものとしている。試験機の制約（試験機の容量が約 100 kN）により、一軸強度を 5MPa 程度にする必要があるため、石膏/砂比を 1 に固定し、水の割合だけを増加させて一軸圧縮強度がおおよそ 5 MPa となるような配合試験を実施し、石膏：砂：水：混和剤の比を 1:1:0.7:0.002 とすることとした。なお、水と石膏の分離に伴うブリージングを抑制するため、混和剤には分離低減材（グリオキサール処理水溶性セルロースエーテル）を用いている。打設した供試体の養生期間については、3時間から7日間の範囲で室温で水封養生した供試体に対し一軸圧縮試験を実施した結果、養生期間が3時間以上であれば長期的な強度の変化が無い事が確認できたため、十分なマージンを考慮し、室温で1日水封養生することとした。また、供試体を複数作成し、試験ごとに初期段階の透水係数に大きな変動が無いことを確認している。平面ひずみ圧縮試験同時透水試験に用いる供試体の寸法は、高さ 80 mm、幅 60 mm、奥行 80 mm である。平面ひずみ試験は拘束圧 1.0 MPa、ひずみ速度 0.002 %/s の変位制御で単調載荷し、クリープ応力（静的試験にピーク応力 3.98 MPa の 80% = 3.19 MPa）に達した後は、応力を一定に保つ。前面から後面にかけて円筒メンブレンで供試体を覆うことで供試体と外部を分離し、さらに、メンブレン上下面と試験機ヘッドおよび底面の間にグリースを塗布することで試験機ヘッドおよび底面と供試体上面および下面の間の摩擦の低減を図っている。同様に、前後方向（面外方向）も四角いメンブレンとグリースで供試体とアクリル板および金属板の摩擦の低減を図っている。

試験装置は平面ひずみ圧縮試験装置をベースとしているので、面外方向の変形を拘束し、側部から拘束圧を与え、底部を固定して上部から載荷を行う。面外方向に透水試験用にペDESTALが付いており、そのペDESTALから外部まではパイプでつながっていて、流入側の水タンクの圧力と流出側のビュレットの圧力差で片方のパイプより水を流入し、他方のパイプより流出

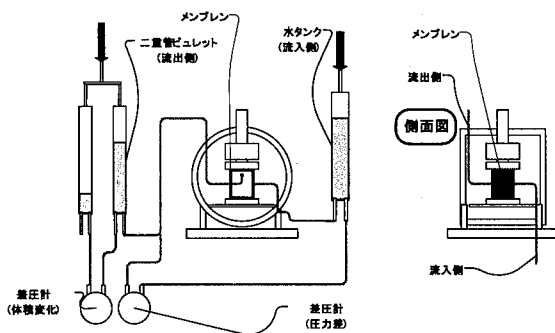


図-3 変形—透水試験装置の概略

するということに構成されている。流出した水は一方のビュレットだけに蓄積され、もう一方のビュレットの水位は変わらないことから、二本のビュレットの差圧を測定することで流出量の測定が可能となる。試験では、流入側に 300 kPa、流出側に 100 kPa、つまり差圧として 200 kPa を与えている。図-3 に、試験の概要を示す。

本研究では、亀裂のクリープ変形にともなう透水性能について評価を行うことを目的としているため、供試体には予め単一の亀裂を導入することとした。亀裂の形状については、(1) フラットな亀裂の場合、変形しても透水性の増大が見込めない、(2) 天然の岩盤に包含される亀裂群は、少なからず凹凸や起伏を有している、(3) ランダムな起伏を有した亀裂や複数の亀裂を考慮した場合、試験結果の解釈が煩雑になる、ということを考慮し、奥行方向一定の正弦波形状としている。数パターンの波長と振幅を組み合わせることで試験を実施しているが、本解析では、亀裂形状である正弦波の波長を 16.8 mm (波の山が 6 個)、振幅を 1.0 mm の供試体に対する試験を解析の対象とした。

亀裂供試体は上下面 2 つのパートからなり、2 つを合わせることで、単一亀裂を有する一つの亀裂供試体となる。亀裂供試体の作製については、まず、亀裂表面のデータを作成し、そのデータを基に亀裂供試体の片面の三次元データを作り、さらにその三次元データをもとにウレタンを三次元プロッターで切断する。そして、そのウレタンをシリコン樹脂で型取りすることで亀裂供試体の片面の型枠が完成する。最終的にそのコンクリート用型枠に、材料を流し込み、半分の供試体を作製する (図-4 参照)。このようにして作製された半分の亀裂供試体を 2 つ合わせて、単一亀裂面を有する亀裂供試体が出来上がる。単一亀裂面は 80.0 mm (奥行) × 100.7 mm の平面として、供試体の水平面から 52 度ほど傾いた位置に入る。図-5 に亀裂の形状を示す。

なお、材料基質部のクリープ特性を把握するために、亀裂を有しない供試体 (同じ大きさで同配合) につい

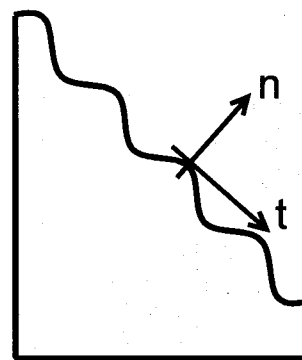


図-4 供試体断面図

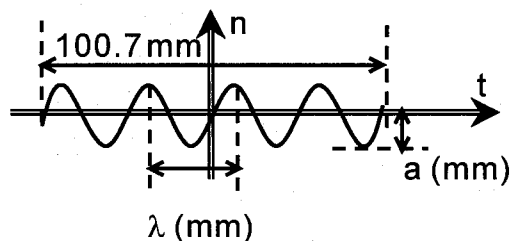


図-5 亀裂の形状 (正弦波)

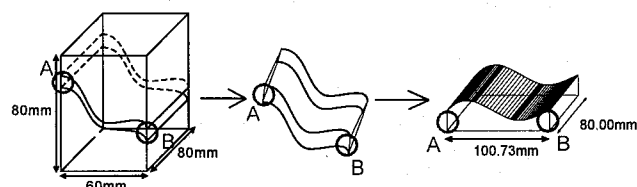


図-6 解析領域設定の概念図

てもクリープ試験を行っている。この試験についても、拘束圧 1.0 MPa、ひずみ速度 0.002 %/s の変位制御で単調載荷し、クリープ応力 (静的試験にピーク応力 6.40 MPa の 80% = 5.12 MPa) に達した後は、応力を一定に保つ。

### 3.2 解析概要

解析の手順は、以下の通りである。

1. 亀裂を有しない解析供試体についてクリープ解析を行い、基質部に対するクリープパラメータの同定を行う。
2. 亀裂を有する解析供試体について (図-6 の左図) クリープ解析を実施する。
3. 任意に時間ステップにおいて、亀裂に相当する部分 (解析モデルとしては、摩擦すべりを適用した要素の節点) の変位分布 (図-6 の中央図) を抽出する。
4. 抽出した変位分布より、点と直線 (亀裂面上 2 つ

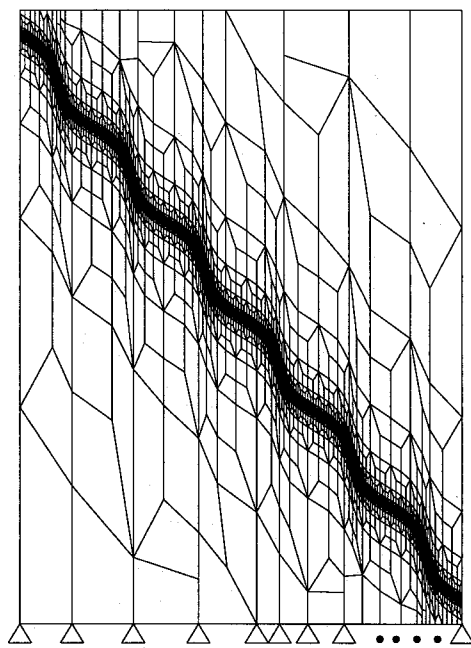


図-7 解析メッシュ

の節点と相対する亀裂面上の節点の距離) の関係を用いて開口変位を算出する。この操作によって、概念として、図-6の中央図のような開口分布が得られる。

5. 浸透解析用のメッシュ(図-6の右図)を作成し、それを用いて浸透流解析を行い、圧力分布を求める。
6. 求めた圧力分布より導水勾配を算出し、それを用いて流速場を求める。

### 3.3 変形解析

まず、亀裂を有しない供試体に関する試験と解析の比較を通して、式(8)における係数  $A$ ,  $n$ , および  $q$  を決定する。本来は、これら3つの係数を決定するには、拘束圧なども変化させて複数の試験を行うべきであるが、並行して実施した試験では、亀裂を有する供試体と同時期に供試体を作製する都合上、複数の供試体の作製ができなかったため、亀裂を有しない供試体については、1例のみの試験となっている。しかしながら、これら係数の感度については、吉田ら<sup>20)</sup>が議論しており、どの係数がどのような感度を有しているかを事前に把握していたことから、それぞれのケースについて3ケースずつ感度解析を行い、それらの比較検討より試験をほぼ再現できるパラメータを決定した。本解析では材料基質部を弾性体としているが、事前の静的試験より、弾性係数はほぼ 520 MPa と定まっていたことから、解析でもこの値を用いた。ポアソン比については、0.25 と仮定し、その他の境界条件などは、全て試験と同様に設定した。なお、解析メッシュを図-7に示すが、これは亀裂を有する解析メッシュをベースと

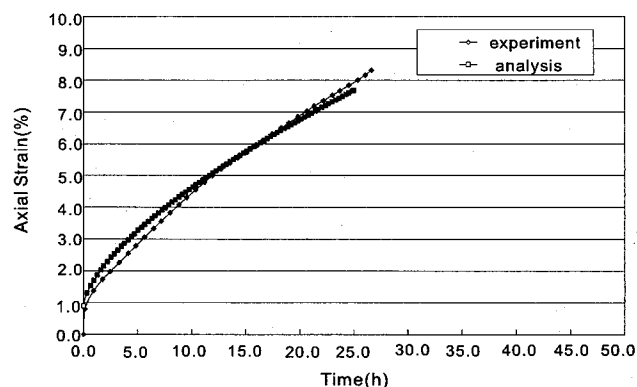


図-8 鉛直ひずみ(亀裂なし)

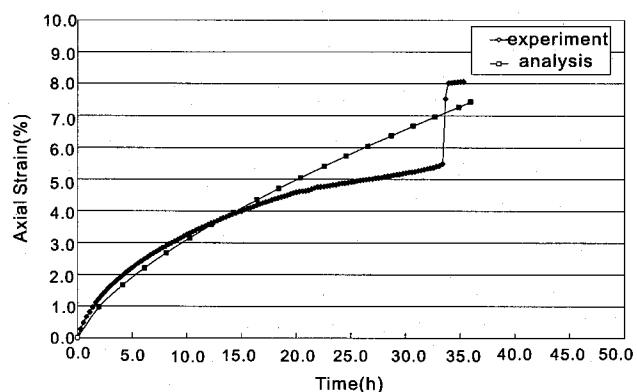


図-9 クリープひずみ(鉛直方向、亀裂あり)

しており、亀裂を有しない解析では、このメッシュより摩擦すべり要素を除去している。つまり、亀裂を有する解析では、図-4に示したような亀裂部分に摩擦すべり要素を導入するが、亀裂を有しない解析では、この要素を用いていない。

本論文は、材料基質部のクリープ挙動に関する検討が主たる目的ではないことから、ここでは、試験をほぼ再現できるパラメータ ( $A = 3.00 \times 10^{-5}$ ,  $n = 0.20$ , および  $q = 0.67$ ) を用いた解析結果と試験結果を図-8に示す。図は両結果の鉛直ひずみをプロットしたものであるが、両者は良好な一致を示している。したがって、亀裂を有する供試体のクリープ解析においても、材料基質部に関してはこれらの値を採用する。

次に、亀裂を有する解析供試体についても、試験と解析の比較を行う。亀裂を有する供試体に対する試験は、前々節にて説明したような条件にて行っている。解析では、上述した材料基質部に関するクリープモデルにおける係数のほかに、式(11)に示す摩擦係数に関するパラメータ  $\mu_i$ ,  $\mu_r$ ,  $D$  および  $\sigma_y^J$  を定める必要がある。これらに関しても、基質部のクリープ解析と同様、それぞれに関して3つずつパラメータを上下に振り感度解析を実施したが、本論文では、紙面の都合により、試

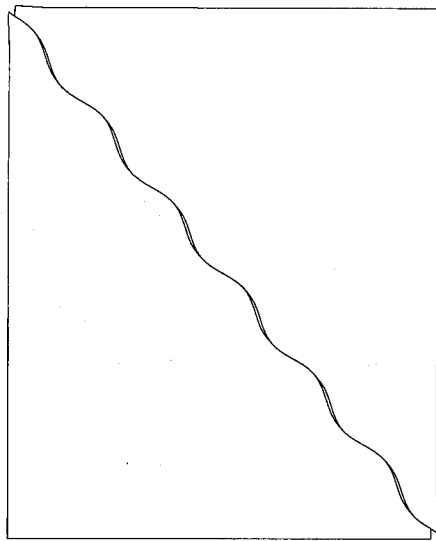


図-10 変形状況 (6 時間 15 分後)

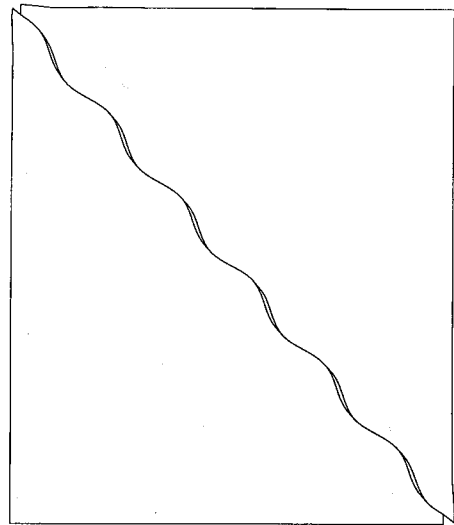


図-12 変形状況 (18 時間 45 分後)

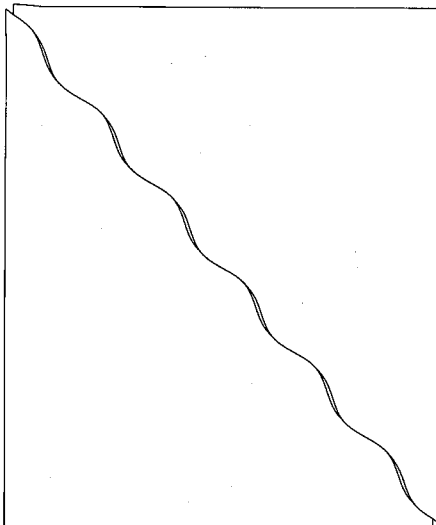


図-11 変形状況 (12 時間 30 分後)

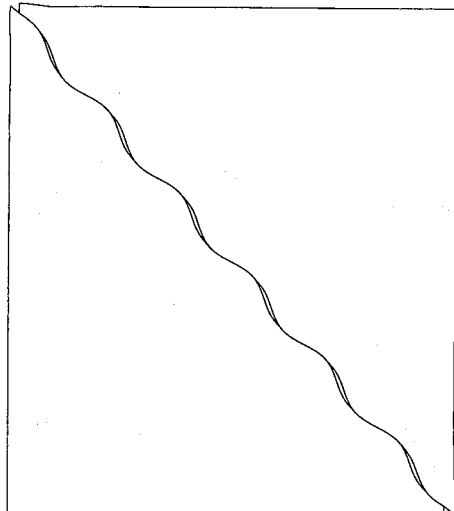


図-13 変形状況 (25 時間後)

験をほぼ再現できるパラメータ (粘着力  $c=0.0$  MPa,  $\mu_i=0.30$ ,  $\mu_r = 0.10$ ,  $D = 5.00$  および  $\sigma_y^J = 1.00$  MPa) を用いた解析結果と試験結果を図-9 に示す.  $\sigma_y^J$  については, 試験結果において残留応力が 1.0 MPa ~ 2.0 MPa の範囲であったことと, 亀裂面は供試体作製時にブリージングの影響を受けやすいことから, その下限値である 1.0 MPa を採用している. その他のパラメータについては, あくまでも試験結果と合致するように定めたもので, 客観的な決定方法について今後の課題である. なお, その他のパラメータや境界条件などは, 亀裂を有しない供試体の解析と同様である.

図より, 経過時間で 15 時間あたりまでは試験結果と解析結果は比較的良好な一致を示しているが, その後は,

解析結果の方が試験結果を上回っている. これは, 蓄積されるひずみエネルギーはクリープ変形だけではなく, 亀裂面の摩耗や削り取りなどにも費やされるので, 数値解析と試験では, どうしても乖離が生じる. 本解析では供試体は連続体であって, 終始, 試験のように物理的に亀裂面が摩耗したり削り取られることはない. 一方, 試験直後に供試体を観察すると, 亀裂面は摩擦などによってゼリー状になっている箇所も多数みられ, 明らかに損傷している様子が確認できている. また, クリープ応力はピーク応力の 80% ではあるが, この程度の応力においても新規の亀裂は生じる可能性はあり, 試験では, 最終的に (約 32 時間後) それらが局所化して破壊に, すなわち第 3 期クリープに移行したものと

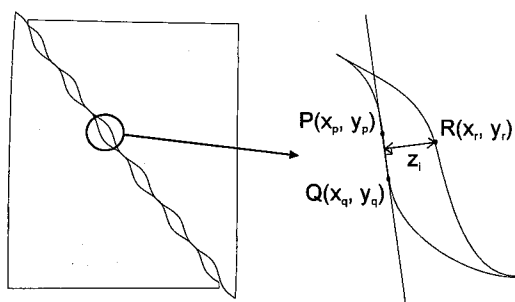


図-14 亀裂の開口幅の算出

思われる。解析では供試体基質部を粘弾性体としているため、こうした新規亀裂の発生に対応できないこと、また、本研究で用いているクリープモデルでは、第3期クリープは再現ができない。こうしたことに起因して、経過時間15時間より後では、試験結果と解析結果に乖離が見られるものとする。放射性廃棄物の処分坑道の力学的健全性のみを議論する場合、クリープ破壊の議論は重要であるが、本研究は亀裂の変形にともなう透水性能の変化を研究対象としていることから、本研究では第3期クリープに該当する部分はモデル化しないこととした。

図-10～図-13には、任意の計算ステップ（試験における経過時間である6時間15分、12時間30分、18時間45分および25時間）における解析供試体の変形状況を示す。時間の経過にともない、供試体基質部がクリープ変形（収縮）すると同時に、亀裂部においては、水平方向に近い亀裂面は密着したままであるが、鉛直方向に近い亀裂面は開口している様子が伺える。その開口量も時間とともに徐々に増大している。実験においては、メンブレンで覆ってしまうため、こうした亀裂の変形を時々刻々追跡はできないが、試験後に取り出すと、ほぼ、図-13に近い形態を示していた。こうした亀裂の開口は、流量の増大、すなわち巨視的な透水係数の増大に及ぶものと思われ、次節では亀裂の変形と浸透挙動について、数値解析的観点から考察を加える。

### 3.4 浸透解析

浸透解析における各種条件についても、変形解析と同様、試験と全て同じになるように設定した。奥行方向（前面から後面の方向）については開口幅が変化しないことから、本来であれば2次元解析で十分であるが、試験が3次元的事実であること、また、定式化を3次元的に実施したことから、ここでは3次元有限要素解析を行う。流動解析においては、変形にともなう亀裂間の間隔、つまり開口変位量が必要となるが、試験よりそれは得られないことから、前節の解析（亀裂を有する供試体に対するクリープ解析）より得られる変位分布

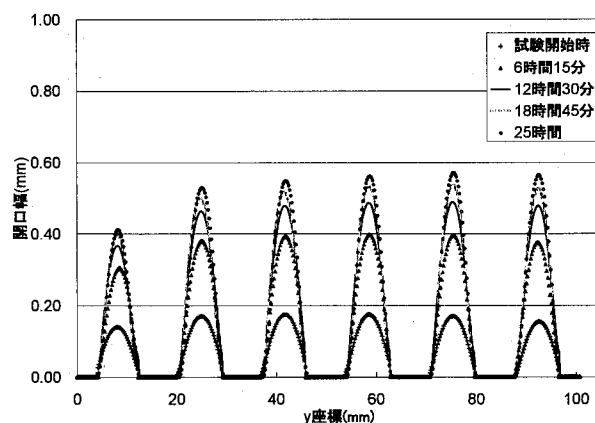


図-15 開口変位分布

を用いて変位を算出した。具体的には、亀裂下面における2点（図-14に示す2点  $P(x_p, y_p)$ ,  $Q(x_q, y_q)$ ）を通る直線  $\left(\frac{y_q - y_p}{x_q - x_p}\right)x + (-1)y + \left(\frac{y_q - y_p}{x_q}\right) = 0$  と亀裂上面の点  $R(x_r, y_r)$  について、以下の式(12)を用いて、点と直線の距離  $z_i$  を算出する。

$$z_i = \frac{\left| \left( \frac{y_q - y_p}{x_q - x_p} \right) x_r + (-1)y_r + \left( \frac{y_q - y_p}{x_q} \right) \right|}{\sqrt{\left( \frac{y_q - y_p}{x_q - x_p} \right)^2 + (-1)^2}} \quad (12)$$

このような距離の算出を有限要素メッシュにおける亀裂面上の全節点について行う。本研究では、こうして算出される距離を開口変位と定義した。任意の計算ステップ（前節の変形解析における変形状況を示した時刻）において算出した開口変位分布を図-15に示す。

解析領域は、80.0 mm ( $x$  方向)  $\times$  100.7 mm ( $y$  方向) の矩形平面に、高さとして、上述の通り算出した開口変位分布が与えられたものとなる。矩形平面部分を  $x$  方向に40分割、 $y$  方向に486分割し、総要素数19440個の解析メッシュを作成した。図-16に示すように、解析領域の左端に300 kPa、右端に100 kPaの圧力水頭を与え（つまり圧力差が200 kPa）、水の密度  $\rho$  および動粘性係数  $\nu$  には、水として一般的な  $9.982 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$  および  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  を用いた。なお、図-16に記載されたA点とB点は、と図-6に記載された2つの点に対応する点であり、浸透解析における座標の原点はB点となっている。つまり、原点（B点）に近い亀裂において最も開口変位が小さく、その他の6箇所では、ほぼ同じ値を示している。

試験においては、透水させる水に蛍光染料ウラニコンク（フルオレセインナトリウム）を混ぜている。試験後、供試体にブラックライトを当てるとウラニコンクが発光するという原理を応用し、供試体中における水の流路の確認を行っている。写真-1（亀裂面）、写真-2（流入面）、および写真-3（流出面）に流動状況

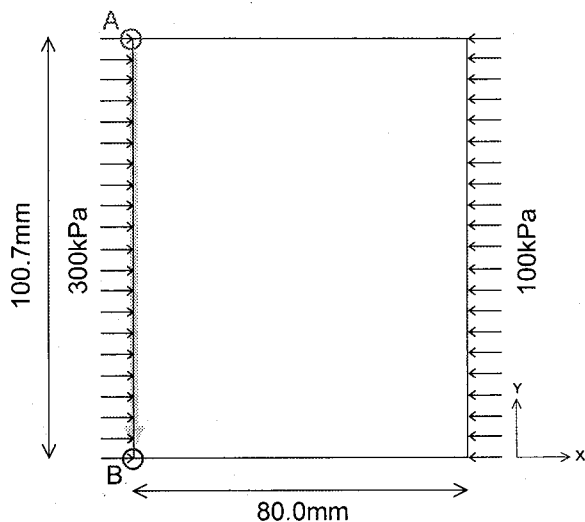


図-16 浸透解析の概念図

を示す。写真中、白くなっている箇所が発光した箇所である。写真より、流入面より入り供試体の前面に設置した濾紙を通過した水は、载荷にともなう変形した亀裂に流れこむ様子を呈しており、亀裂に入った水も、亀裂内を均等に流れるのではなく、正弦波状となっている亀裂間においてもっとも流れ易い箇所を通過していることがわかる。亀裂形状が正弦波となっていることに起因して、亀裂の変形は開口する部分と摩擦すべりを生ずる部分が交互に出現するという形になっている。その結果、開口した部分を中心に流動が確認されているが、摩擦すべりのみを生じて密着している部分については、ほとんど流動が見られない。また、一旦亀裂に変形が生ずると、流入口から出た水のほとんどが亀裂の開口部を経路として選択し、亀裂の上部に相当する供試体部分にはほとんど水が行き渡っていないことが伺える。さらに、開口した亀裂に均等に水が流れておらず、両端に近い亀裂面よりも中央に位置する亀裂面での流動が顕著である。なお、掲載した写真においては明瞭ではないが、亀裂の正弦波状の山が欠けている箇所も存在する。前節にて、15時間を経過した後に試験におけるクリープひずみと解析のそれに乖離が見られたと言及したが、こうした亀裂の欠損が乖離の原因の1つであると考えられる。なお、透水させた水は供試体の上下面あるいは左右両側面を通過しておらず、すべて亀裂内、ないしは材料基質部を浸透していることは確認済である。ただし、材料基質部については、試験後、供試体を破壊してもウランコンクの存在は確認できなかったことから、透水させた水は、そのほとんどが変形した亀裂内を流動したと思われる。

図-17に、解析より求まる圧力分布を示す。解析では、図-16における $y$ 方向（亀裂の方向）に開口変位は変化するが、 $x$ 方向（供試体の前面から後面に向

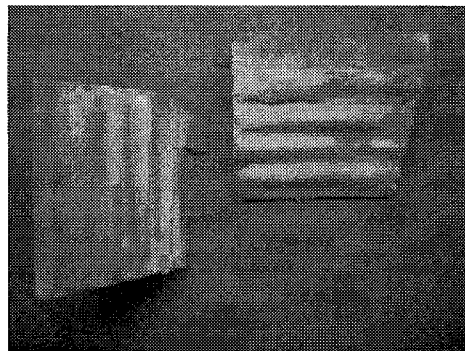


写真-1 流動状況（亀裂面）

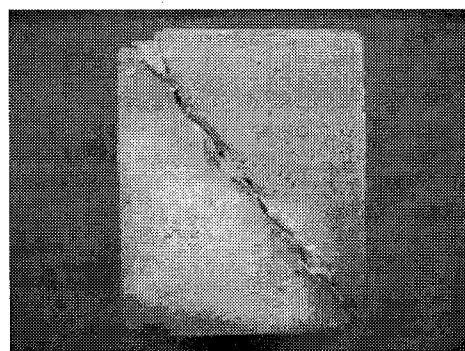


写真-2 流動状況（流入面）

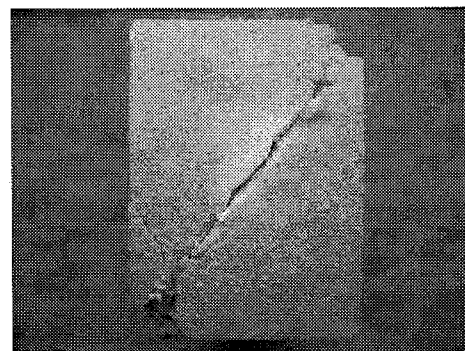


写真-3 流動状況（流出面）

かう方向)には変化しないため、圧力分布は前面（図-16の左端側で300kPa）から後面（図-16の右端側で100kPa）にかけて距離に比例した分布となる。有限要素メッシュの各節点間の圧力差を求め、さらに当該節点間の距離で除すことで動水勾配（ $i = -\frac{\partial p}{\partial x}$ ）が求まる。求まった動水勾配に平行平板流れにおける透水係数（ $k = \frac{gb^2}{12\nu\rho}$ 、 $g$ は重力加速度、 $b$ は開口幅、 $\nu$ は動粘性係数、 $\rho$ は水の密度）を乗ずることで、当該節点間の平均流速（ $\bar{u} = \frac{gb^2}{12\nu\rho} \left( -\frac{\partial p}{\partial x} \right)$ ）を算出すること

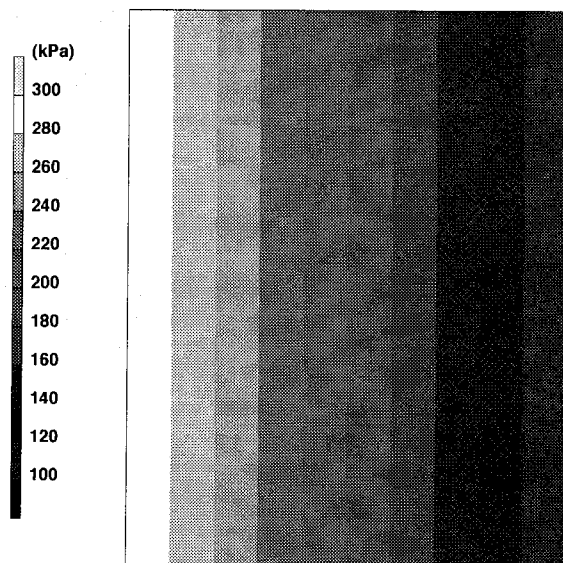


図-17 圧力分布

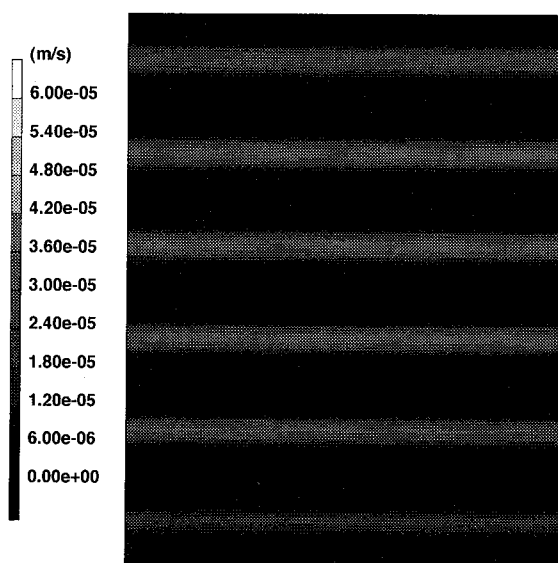


図-19 流速分布 (6 時間 15 分後)

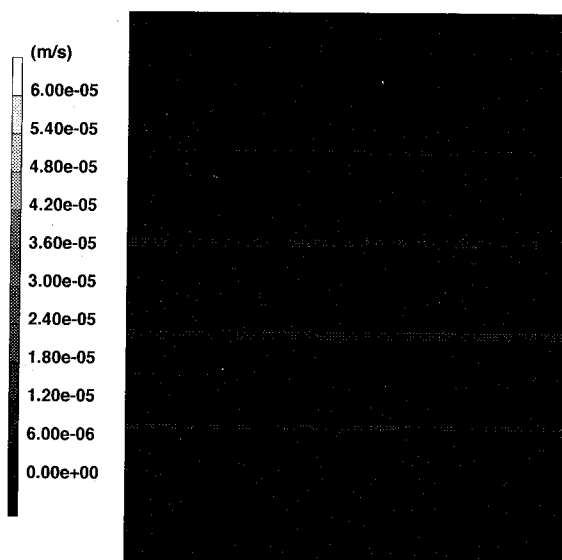


図-18 流速分布 (クリープ試験開始時)

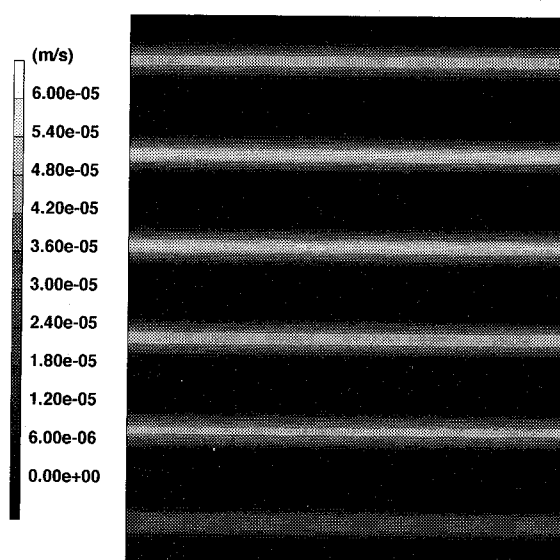


図-20 流速分布 (12 時間 30 分後)

ができる。このようにして求まる各計算ステップ毎の平均流速分布を、図-18 から図-22 に示す。なお、図-19 から図-22 は、変形状況の図-10 から図-13 に対応している。

クリープ開始時 (図-18) には流速場は、まだ均一場に近いが、時間の経過とともに開口部分 (図-15 を参照) において流速が増していることが分かる。解析メッシュにおける  $x$  軸 (図-16 における下部) 側の亀裂の開口量が小さいことに対応して、流速も小さくなっている。これは、上述した通り、流速は亀裂の開口量の 2 乗に比例するためであり、このことより、図は開口量の分布と読み替えることも可能である。実際の試験

においても、写真-1 の流動状況からも分かるように、開口部に流動が集中するものの、供試体上部あるいは下部の亀裂よりも中央に位置する亀裂における流動が顕著という結果を得ている。したがって、解析はこうした現象を定性的に捉えているものと判断する。

さらに、亀裂を有する供試体に対する平面ひずみクリープ試験同時透水試験によって得られた透水係数の経時変化を図-23 に、解析より得られる透水係数を図-24 に示す。ただし、試験については結果が離散的であったことから、白丸だけのプロットに留め、敢えて線分にて示すことはしていない。なお、解析では、材料全体の巨視的な透水係数  $k$  を、材料基質部の透水係

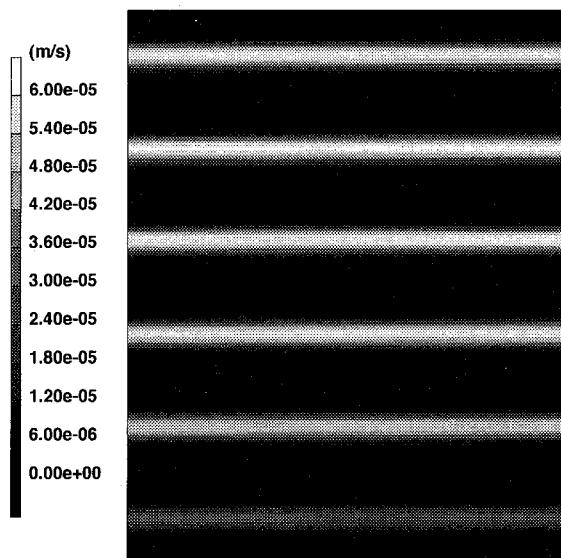


図-21 流速分布 (18 時間 45 分後)

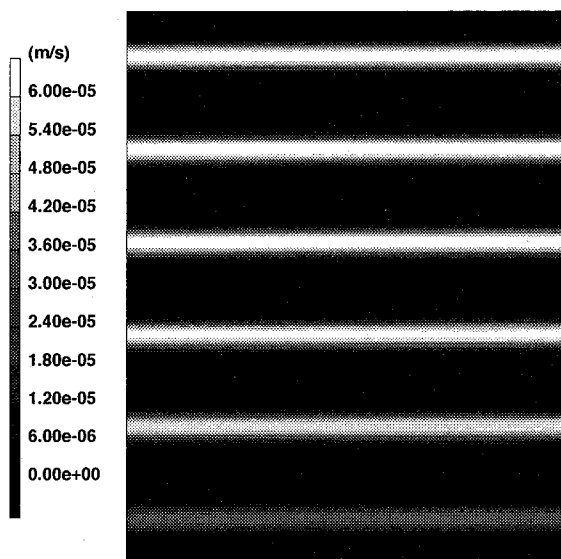


図-22 流速分布 (25 時間後)

数  $k_1$  (試験結果より,  $k_1 = 4.77 \times 10^{-7}$  cm/s) と, 亀裂開口部の透水係数  $k_2$  を用いて評価する. 亀裂開口部の透水係数  $k_2$  の算出には, 有限要素メッシュにおける各節点  $i$  にて透水係数  $k_i = \frac{gb_i^2}{12\nu\rho}$  を求め ( $b_i$  は当該節点における開口変位量), これに, 隣接する 2 点の座標より求まる距離  $\ell_i = (\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} + \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2})/2$  を乗じ, これを全節点について計算し和を取る. その和を, 図-16 の 2 点, A, B 間の距離で除すことで, 亀裂開口部の透水係数

$k_2$  を定義する. つまり,  $k_2$  は次式にて表される.

$$k_2 = \frac{\sum_i k_i \ell_i}{\sum_i \ell_i} \quad (13)$$

こうして求まる  $k_2$  と材料基質部の透水係数  $k_1$  より, 次式を用いて供試体の巨視的な透水係数  $\bar{k}$  を算出する.

$$\bar{k} = \frac{A_1 k_1}{A} + \frac{A_2 k_2}{A} \quad (14)$$

ここで,  $A_1$ : 開口前の全体の面積 ( $80.0 \text{ mm} \times 60.0 \text{ mm} = 4,800 \text{ mm}^2$ ),  $A_2$ : 開口面積,  $A = A_1 + A_2$  である. 亀裂開口部の面積  $A_2$  は, 図-15 に対して, 区分求積法などを用いて積分することで求まる.

図-23 および図-24 より, 試験および解析のいずれにおいても, それほど大きく透水係数は変化していない. この理由として, 写真-1, 写真-2 および写真-3 より, 流入面では, 比較的広範囲にわたって水が拡散し, 亀裂へ流れているが, 流出面で確認される水の流れは, 中央付近における開口亀裂だけとなっている. つまり, 開口した亀裂間に水は入るものの, 全てが流出口へ浸出しているわけではなく, かなり限られた部分からしか流出していないことに対応して, 流量がそれほど増大しない, つまり, 巨視的な透水係数がそれほど増加しなかったものと思われる. 亀裂の表面はブリージングの影響などを受け, 材料基質部よりも変形能が大きく, かつ, 破壊 (圧壊) しやすいため, クリープ応力によって亀裂面が潰れるような状況を呈している. こうした現象も, クリープ初期の段階では顕著ではないが, 浸透してきた水の影響もあって, 載荷中期以降では亀裂面が破壊され, 供試体前面から後面にかけて十分に水が流れなくなったものと思われる. 実験では, 亀裂面の破壊によって摩擦係数が低下するものの, それにともなう応力の再配分などがあり, 結果として, それほど大きな亀裂のすべりは認められていないが, 解析においても, こうした現象を概ね表現できていることから, 両結果は定量的にも定性的にも類似傾向を示したものと考える. ただし, 試験体の数が限られていたことから, 今後, 試験体の数を増やすと同時に, 条件 (クリープ応力, 拘束応力, 亀裂の形状) を変化させて多数の実験を行い, 解析との比較・検討を行う必要がある. また, 解析モデルは亀裂の変形にともなう透水性能の変化を概ね捉えることが可能であると思われるが, 今後, 多くの試験との比較と通してモデルを見直しをすることで, さらに的確に, 亀裂の変形にともなう透水性能の変化を評価することが可能であると考えられる.

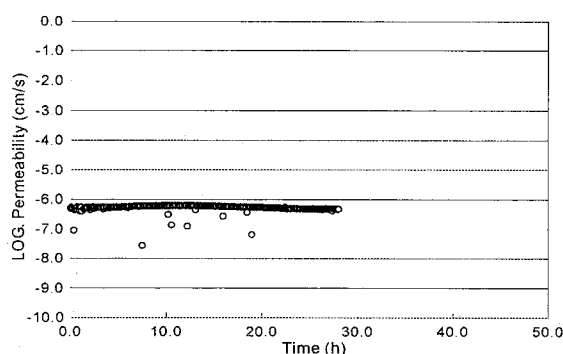


図-23 透水係数の経時変化 (試験)

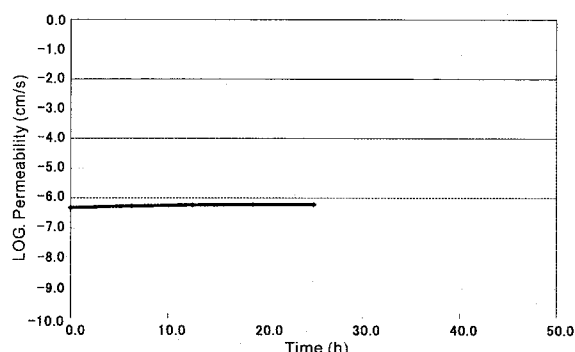


図-24 透水係数の経時変化 (解析)

#### 4. まとめ

本研究では、亀裂性岩盤の変形にともなう透水性能の変化を評価することを目的に、透水-変形の連成モデルを構築し、実証試験との比較を通して、その妥当性を議論すると同時に、実際の連成挙動のメカニズムの類推を行った。モデルは亀裂の変形にともなう透水性能の変化を捉えることができ、また、解析については試験結果との類似性も確認された。さらに、新たに開発した装置を用いた実験より得られた知見は、従来試験機による試験では得られないものであることから、学際的にも有用であると考えられる。しかしながら、試験体数が決して多くないことから、今後、多くの条件（クリープ応力、拘束圧、配合比、そして亀裂の形状）の下で試験を実施し、解析結果と試験結果の比較を通して、モデルの見直しなどを継続的に検討していくことが必要であると思われる。

付記： 本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号17560427、代表者：吉田秀典）の助成を得て行なった。

#### 参考文献

- 1) 例えば、核燃料リサイクル開発機構 編：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 ―地層処分研究開発第2次取りまとめ― 総論レポート、核燃料リサイクル開発機構、1999。
- 2) 例えば、核燃料リサイクル開発機構および電気事業連合

- 会 編：TRU 廃棄物処分概念検討書、燃料リサイクル開発機構および電気事業連合、2000。
- 3) 杉村淑人、森田 豊、三枝博光、鈴木 希、渡辺邦夫：ダム基礎の水みちネットワークモデル構築の試み、第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.161-165, 1996。
- 4) 平田洋一、河西 基、宮川公雄：岩盤割れ目における水みち推定と地下水流向・流速測定について、第34回地盤工学研究発表会講演論文集、pp.1285-1286, 1999。
- 5) Selroos, J., Walker, D. D., Strom, A., Gylling, B. and Follin, S.: Comparison of alternative modeling approaches for groundwater flow in fractured rock, *Journal of Hydrology*, Vol.257, pp.174-188, 2002。
- 6) 大野博之、小島圭二：割れ目の統計的相似性に基づく Site Characterization の試み、第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.416-420, 1987。
- 7) 大野博之、小島圭二：フラクタル性を考慮した岩盤割れ目の寸法評価と透水性、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.157-162, 1989。
- 8) 田中達也、渡辺邦夫、前川恵輔、中村直昭：地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発（その1）―解析の考え方―、応用地質、第35巻第3号、pp.22-33, 1994。
- 9) 渡辺邦夫、小島圭二：断層・割れ目系岩盤中の地下水流れと関与する地質量の計測と評価、日本応用地質シンポジウム予稿、pp.2-16, 1980。
- 10) 多田浩幸、木下直人、若林成樹：岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.139-144, 1994。
- 11) Sundaram, P.N., Watkins, D.J. and Ralph, W.E.: Laboratory investigations of coupled stress-deformation-hydraulic flow in a natural rock fracture, *Proc. the 28th U.S Symposium on Rock Mechanics*, pp.585-592, 1987。
- 12) 金子岳夫、小山俊博、鈴木康正、加藤和之、久米田正邦、高橋一憲：堆積軟岩のひずみレベルと透水性能に関する考察、第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.89-96, 2005。
- 13) 高治一彦、奥津一夫、三浦一彦、田部井和人、納多勝、杉江茂彦、高橋真一：ニアフィールドの長期力学安定性評価、サイクル機構技報、Vol.5, pp.27-36, 1999。
- 14) 電気事業連合会および核燃料リサイクル開発機構 編：TRU 廃棄物処分技術検討書 ―第2次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ―、電気事業連合会および核燃料リサイクル開発機構、pp.3-50 - 4-70, 2005。
- 15) Carter, N. L. and Hansen, F.D.: Creep of Rocksalt, *Tectonophysics*, Vol.92, pp.275-333, 1983。
- 16) 矢川元基、宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析、サイエンス社、pp.59-65, 1991。
- 17) 吉田秀典、山崎卓哉、井上純哉、金谷賢生、蒲池孝夫、平川芳明、森聡：不連続面の変形に着目した不連続性岩盤のクリープモデルの提案、構造工学論文集、Vol.52A, pp.1-8, 2006。
- 18) 吉田秀典、山崎卓哉、井上純哉、平川芳明、森聡：不連続面の特性が岩盤の巨視的挙動に及ぼす影響に関する研究、構造工学論文集、Vol.51A, pp.51-58, 2005。
- 19) 吉田秀典、白賀 孟、井上純哉、秀島喬博、金谷賢生、蒲池孝夫、平川芳明、森聡：不連続面を有する材料のクリープ実験と数値解析、応用力学論文集、Vol.9, pp.561-569, 2006。
- 20) 吉田秀典、奥村幸弘、加藤和之：トンネルの長期変形に影響を及ぼす因子に関する数値解析的研究、岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、Vol.32, pp.49-56, 2003。

(2007 年 4 月 12 日 受付)