

クリープ変形にともなう透水性能の変化に関する実験と数値解析

THE EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ANALYSIS ON PERMEABILITY CHANGE
CAUSED BY CREEP BEHAVIOR吉田 秀典¹⁾, 井上 純哉²⁾, 山田 哲平³⁾, 秀島 喬博⁴⁾

Hidenori YOSHIDA, Junya INOUE, Teppei YAMADA and Takahiro HIDESHIMA

- 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) 東京大学 大学院工学系研究科 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1, E-mail: inoue@material.t.u-tokyo.ac.jp)
 3) 香川大学 大学院工学研究科 (〒761-0396 高松市林町 2217-10, E-mail: s06g419@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp)
 4) (株)大林組 人事部 (〒108-8502 港区港南 2-15-2)

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 are 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 creep test is reproduced is carried on, and the numerical result has modestly good accordance with the measured data to a relatively limited extent of the experiment.

Key Words: Rock Mass, Discontinuity, Creep, Permeability

1. 緒言

2002年に原子力発電環境整備機構(NUMO)が原子力発電所の使用済み核燃料から分離される「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」の公募を開始した。また、2006年になって、九州電力の玄海原子力発電所ではプルサーマルの導入に関して地元同意が得られた他、四国電力の伊方発電所においても経済産業省よりプルサーマル計画の実施許可が下りた。さらには、青森県六ヶ所村の核燃料再処理工場ではアクティブ試験が開始された。こうしたエネルギー施設の稼働にともなう、いよいよわが国においても、低レベル放射性廃棄物から高レベル放射性廃棄物に至るまで、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⁽¹⁾⁽²⁾。濃度の高い放射性廃棄物では、長期にわたって地下の処分施設全体の安定性を確保する必要があり、処分坑道(地下空洞)についても例外ではない。

放射性廃棄物の処分事業では、核種が地下水により生態圏

に運搬される時間と量によって、その安全性が評価されるため、地盤内を流れる地下水の経路長と流速を評価する必要がある。処分場の深度が、余裕深度処分では50~100m、地層処分では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。特に、高レベル放射性廃棄物の処分においては処分深度が深くなることから、対象となる岩盤が不連続性岩盤となる可能性も否定できない。処分地点の周辺が不連続性岩盤というようなケースも視野に入れば、岩盤の長期挙動を考えるにあたっては、母岩部のみならず、不連続面の変形も十分に考慮する必要があることは言うまでもない。特に、不連続面の変形は透水係数の増大に繋がることから注意が必要である。

しかしながら、不連続性岩盤のクリープ現象あるいは透水性能に関する研究は、それぞれ個別には多数存在するが、クリープにともなう透水性能の変化、つまり、連成現象に関する研究はほとんど実施されていない。そこで本研究では、不連続面の変形にともなう変化する透水性能の変化を把握するために平面ひずみ圧縮同時透水試験を実施し、さらに、そのメカニズムなどについて数値解析に基づく考察を加えるこ

ととした。

2. クリープ同時透水試験

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⁽³⁾、それなりに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⁽⁴⁾⁽⁵⁾。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不連続面が変形する、あるいは新規不連続面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⁽⁵⁾。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によって、不連続面の変形は増大する。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。こうした不連続面が、短期および長期に亘って変形した場合、上述した通り、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、比較的硬質な不連続性岩盤を対象とし、こうした不連続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考察することとした。

2.1. 実験概要

本研究では、不連続性岩盤におけるクリープ変形と透水性能の変化を把握するということが目的であるため、通常とは異なり、供試体に不連続面（以降、単に亀裂と称する）が存在していなくてはならない。また、天然亀裂を有する岩盤／岩石を実験供試体として用いるのが好ましいが、通常、天然亀裂は複雑な形状をしており、その表面における起伏や摩擦の状態も一様ではない。こうした要因は、実験結果の解釈を困難とする可能性があることから、本研究では、天然の岩盤／岩石ではなく人工材料を用いた。

人工材料の材質であるが、人工的に作成する亀裂が、型枠からの脱着、あるいは実験装置への装着などの過程において崩壊しないという要求項目より、豊浦標準砂・石膏・水をベースに、やや硬質な供試体を作成している。また、実験機器の制約（試験機の容量が約100 kN）より、一軸強度で5 MPa程度であることが課せられる。そこで本研究では、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た。その結果、石膏：砂：水：混和剤の比が、1:1:0.7:0.02となるように配合することとした。なお、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、水と石膏の分離にともなうブリージングを抑制した。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する事で、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を確認した。本実験では十分なマージンを考慮し、室温で1日水封養生する事とした。

前述の通り、不連続性岩盤の透水性能は内在する亀裂などの影響を強く受ける。本研究では、平面ひずみタイプの試験

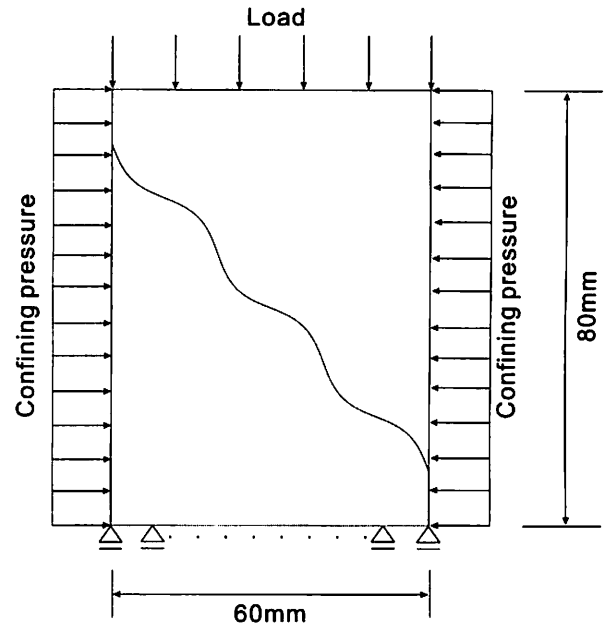


Fig. 1 Outline figure of specimen

機を用いて、上部から載荷すると同時に亀裂面と平行となる方向の流量を計測した。供試体の設置などは、通常の平面ひずみ圧縮試験とほぼ同様である。供試体の寸法は、高さ80 mm、幅60 mm、奥行80 mmである（Fig.1参照）。別途実施した亀裂を含まない供試体に対する静的試験より、材料固有の内部摩擦角および粘着力はそれぞれ16.7°、3.8 MPaであった。また、亀裂を含む供試体に対する静的試験より、ピーク応力は4.3 MPa（ただし、拘束圧は1.2 MPa）であった。そこで、クリープ試験については、クリープ応力を4.0 MPa（拘束圧は1.2 MPa）とし、クリープ応力に達するまでは変位制御・単調載荷（ひずみ速度は0.002 %/s）を行い、クリープ応力に達した後は、応力制御（4.0 MPaを保持）により載荷を行った。なお、本実験における供試体の巨視的な透水係数 k (m/s) は次式により求まる。

$$k = \frac{Q\ell}{\frac{\Delta p}{\rho g} A} \quad (1)$$

ここで、 Q は流量 (m^3/s)、 ℓ は供試体の奥行幅 (m)、 Δp は圧力差 (Pa)、 g は重力加速度 (m/s^2)、そして A は透水面積 (m^2) である。本研究では、前面から背面に水を流すが、圧力差として200 kPaを与えて実験を行い、その際の流量を計測して、式(1)より透水係数を求める。

人工的に亀裂を表現するために、全く同一形状のものを2つ用意し（Fig.1における下半分と上半分）、それら2つを合わせることで単一亀裂を有する供試体を作製した。本研究では、実際の岩盤中に包含される亀裂が少なからず雁行していること、また、雁行亀裂が変形した場合は透水性能が大きく変化することから、Fig.1に示すような正弦波の亀裂を想定し、この形状になるように亀裂供試体の片面の3Dデジタルデータを作る。その3Dデジタルデータを用いてウレタンを3Dプロッターで切削する。そのウレタンをシリコン樹脂で型取りすることで亀裂有の供試体における片面の型枠が

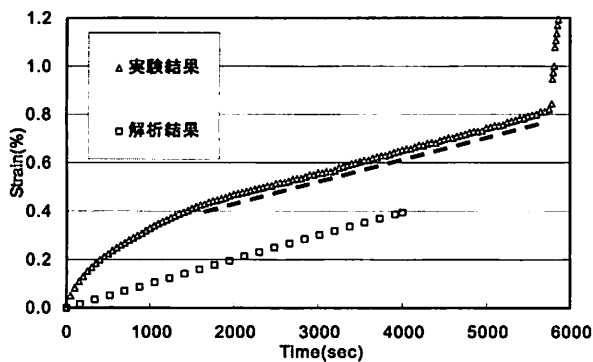


Fig. 2 Creep strain v.s. time

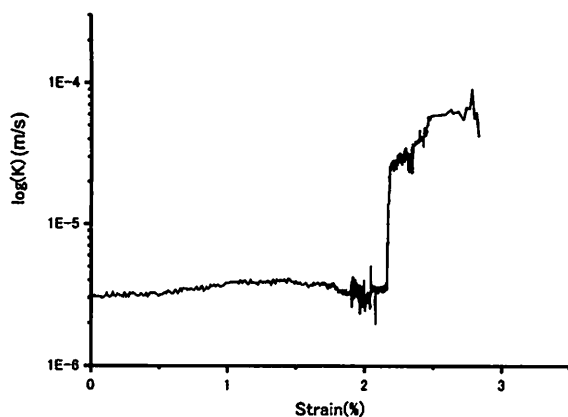


Fig. 3 Permeability v.s. total strain

できる。その型枠に前述した配合の材料を流し込み、供試体を作成する。このようにして作成された片面の亀裂供試体を二つ合わせて、単一亀裂面を有する亀裂有の供試体が出来上がる。

2.2. 実験結果

Fig2には、クリープ開始時間から供試体が破壊に至るまでのクリープひずみ（鉛直方向）を、また、Fig3には、全体ひずみと透水係数の関係をプロットしている。なお、Fig2には、紙面の関係上、後述する数値解析結果（凡例の□。それを平行移動したものが破線）も併記している。

Fig3において、クリープを開始したのは（クリープ応力に到達した時点）全体ひずみ（クリープ移行前の鉛直ひずみとクリープ移行後の鉛直ひずみの和）で1.4%の付近で、それから0.8%ほどひずみが増大すると（全体ひずみで2.2%）第三次クリープ（ひずみの加速度が時間とともに増加する段階）に移行し、供試体は破壊した。クリープ初期においては、クリープひずみではほぼ0.4%（全体ひずみで1.4～1.8%）までは第一次クリープ（ひずみの加速度が時間とともに減少する段階）となっており、この間、透水係数は横ばいか、やや減少気味である。本研究では、上述した通り、亀裂を表現するために、2つの部材を組み合わせて直方体の供試体を作成している。したがって、2つの部材が完全に密着しているとは言い難く、亀裂面上に隙間などが存在していた可能性がある。また、型枠に入れて供試体を作成する際、亀裂の面と

なる箇所は少なからず材料分離やブリージングの影響を受けるため、他の部分と比べて変形能が大きい、そして強度的に劣るという可能性がある。つまり、初期の段階では亀裂面近傍の隙間や供試体内の隙間が減少し、かつ、亀裂面同士の密着性が良くなっている可能性がある。こうしたことに起因して、クリープひずみで0.4%（全体ひずみで1.8%）程度までは経過時間に対して変形が大きく、いわゆる第一次クリープ的な挙動を呈したものと思われる。それ以降が第二次クリープ（ひずみの加速度が0の段階）に相当するものと思われるが、本実験では、全体ひずみでおおよそ2.2%（クリープひずみで0.8%）において、亀裂面に沿って面が削り取られる現象が確認されている。今回設定したクリープ応力の4.0 MPaは、静的試験のピーク応力4.3 MPaと比較して大きすぎたことは否めず、こうした大きなクリープ応力によって、安定的なクリープ現象に移行する途中で亀裂における正弦波の山の部分が削り取られるような新たな亀裂が生じた。これによって、透水係数は一気に上昇しているが、この上昇は、純粋なクリープ変形によるものではない。第二次クリープに移行して間もなく供試体の破壊が生じていることから（全体ひずみで2.2%程度）、第二次クリープと考えられるのは、全体ひずみで1.8%～2.2%（クリープひずみで0.4%～0.8%）の区間にしか過ぎない。この区間だけに焦点を当てると、透水性能はほとんど変化していないことが分かる。実験においては、亀裂面の一部破壊ということでクリープ変形とその際の透水性の変化については多くの情報が得られなかったが、マクロ的には、破壊に至る前の段階では、ほとんど透水係数が変化しないことが判明した。

3. 数値解析

3.1. 解析モデル

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「ヘルシヨーの流れ」が用いられることが多い。しかしながら、変形をとま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、「ヘルシヨーの流れ」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。

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

ここで、 p は圧力、 u 、 ρ および μ 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(2)を y に関して2回積分すると次式が得られる。

$$u(y) = \frac{1}{2\nu} \frac{\partial p}{\partial x} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (3)$$

ここで、 ν は流体の動粘性係数、 C_1 および C_2 は積分定数

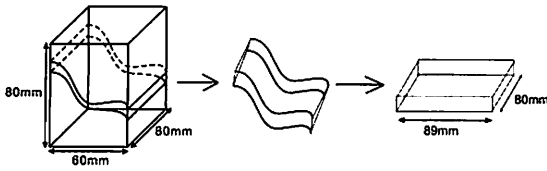


Fig. 4 Mesh creation for flow analysis

である。問題を簡単とするために、速度は下に位置する亀裂 ($y=0$) と上に位置する亀裂 ($y=h$) 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 (3) に代入すると、積分定数は、

$$C_1 = \frac{U_0}{h} - \frac{1}{2\nu} \frac{\partial p}{\partial y} h, \quad C_2 = 0 \quad (4)$$

となる。また、平均流速 \bar{u} は以下のように定まる。

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u(y) dy = \frac{U_0}{2} - \frac{h^2}{12\nu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5)$$

2次元平面内で考えていることから、ある微小時間 dt の間に、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 $\rho (\bar{u} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} dx) dt (h + \frac{\partial h}{\partial x} dx)$ 、そして、高さ h が微小時間 dt 間に変化することともなう質量変化は $\rho \frac{\partial h}{\partial t} dt dx$ 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 (5) を用いることで次式が導かれる。

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

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 (6) 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 (6) を三次元問題に拡張すると、

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \cdot (\rho U_0 h) - \nabla \cdot \left(\frac{\rho h^3}{12\nu} \nabla p \right) = 0 \quad (7)$$

となる。これを離散化し、有限要素解析を行なう。

3.2. 解析概要

解析における各種条件は、前章で述べた実験と全て同じになるように設定した。奥行方向 (前面から背面の方向) 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、実験が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なう。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、実験からはそれは得られていないことから、文献⁽⁶⁾で提案されているクリープ変形のモデルを用いてクリープ解析を実施し、開口変位量の算出を行った。解析では、連続体部に4節点の四角形要素 (総要素数 3354, 総節点数 3382) を、亀裂部にクーロ

Table 1 Macroscopic permeability

time (sec)	400	1200	2000	2800	3600
A_2 (mm ²)	2.48	6.35	10.11	13.71	52.94
$\bar{k} \times 10^{-6}$ (m/s)	3.159	3.159	3.159	3.159	3.168

ン摩擦則に基づくジョイント要素に類似した要素 (852 要素) を用いた。解析パラメータは、実験結果 (クリープひずみ) に近くなるような値を設定した。詳細については、文献⁽⁶⁾を参照頂きたい。

実験結果を示した Fig2 に、解析より得られた時間とひずみの関係を併記した。実験では、おおよそ 1500 秒までが第一次クリープ、その後、おおよそ 1500 ~ 5800 秒までが第二次クリープ、そしてそれ以降が第三次クリープに相当するものと思われる。2章で述べた通り、クリープ開始直後の第一次クリープの範囲では、初期において完全には噛み合っていないかと思われる供試体の亀裂が徐々に噛み合わさる、あるいはブリージングの影響などで品質的にも劣っていると思われる亀裂面上の一部が摩砕するなどの現象が生じられるが、採用したクリープモデルではこのようなことは表現できない。つまり、採用したクリープモデルは第二次クリープに対応するものであると解釈できる。そこで、解析の曲線を実験における定常クリープの部分に移動すると (図では破線)、実験におけるクリープ曲線の定常クリープ部とほぼ合致していることが分かる。

クリープ解析から得られた変位分布より、亀裂面上における変位の相対変位を計算し、亀裂面に対して直となる方向の成分を開口変位とする。亀裂面は、Fig1 に示す通り曲線であることから、流動解析用に新たにメッシュ (幅 89 mm × 奥行 80 mm, 総要素数 17000) を作成する。その概念図を Fig4 に示す。なお、水の動粘性係数 ν は標準的である 8.93×10^{-5} m²/s を用いた。クリープ解析より得られた開口変位を作成したメッシュの高さとし、境界条件として前面と背面に圧力差 200 kPa を与えて流動解析を行なう。そして、解析より得られた圧力分布などから流速分布および透水係数を算出する。

まず、クリープ解析より得られた結果より、開口部の透水係数 k_2 と供試体のマクロ的な透水係数 k を算出する。開口部の透水係数 k_2 の算出には、文献⁽⁷⁾を参照に次式を用いて評価した。

$$k_2 = \frac{gh^2}{12\mu} \quad (8)$$

ここで、 g は重力加速度、 h は開口幅である。さらに、次式を用いて供試体のマクロ的な透水係数 \bar{k} を算出する。

$$\bar{k} = \frac{A_1 k_1}{A} + \frac{A_2 k_2}{A} \quad (9)$$

ここで、 A_1 : 開口前の全体の面積 (4800 mm²)、 A_2 : 開口面積、 $A = A_1 + A_2$ 、 k_1 : 開口前の透水係数 (材料の透水係数 $= 3.158 \times 10^{-6}$ m/s。これは、Fig3 に示す計測値) である。クリープ解析より得られた開口部の面積 A_2 と供試体のマクロ的な透水係数 k を Table1 に示す。クリープ変形にとも

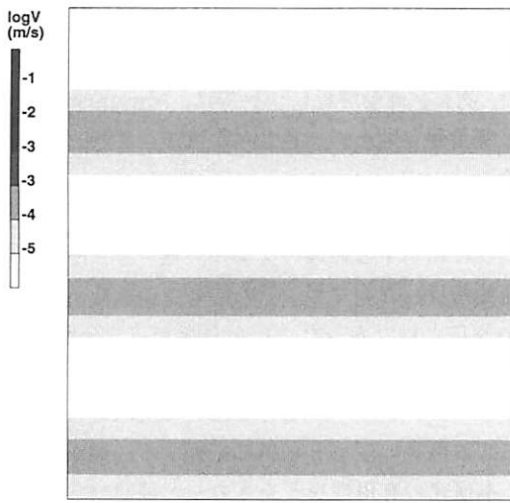


Fig. 5 Distribution of velocity (400 sec)

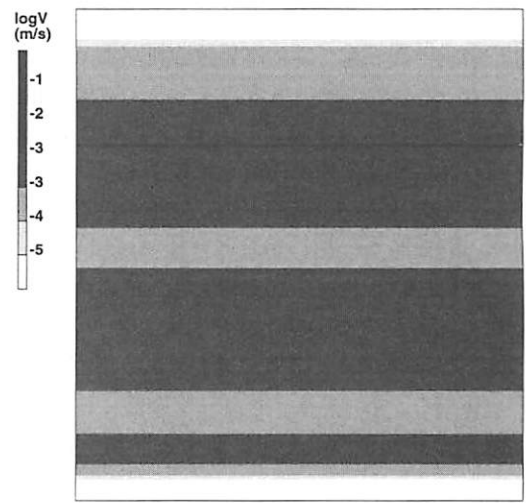


Fig. 8 Distribution of velocity (2800 sec)

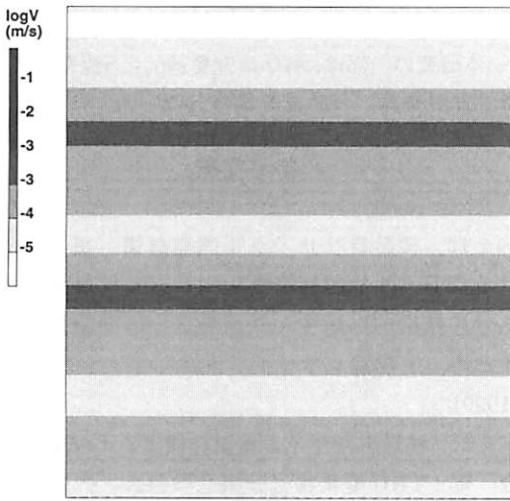


Fig. 6 Distribution of velocity (1200 sec)

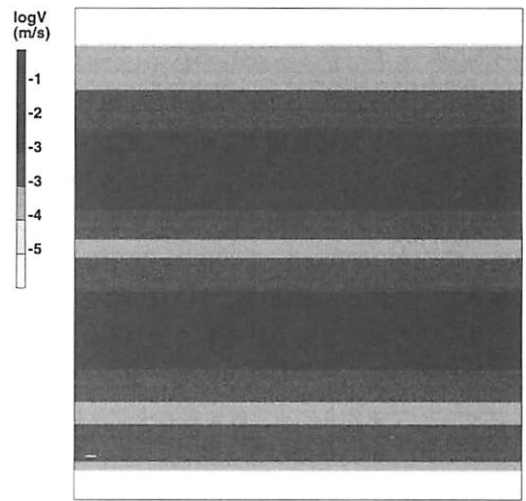


Fig. 9 Distribution of velocity (3600 sec)

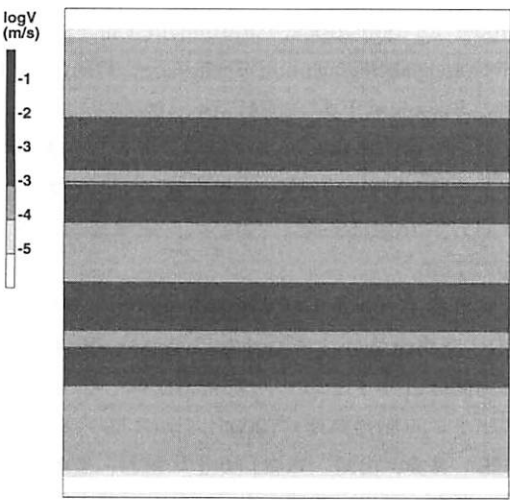


Fig. 7 Distribution of velocity (2000 sec)

なって亀裂の開口量が増大するため、時間の経過にもなって開口部の面積と透水係数の両者が大きくなる。開口部の面

積 A_2 は、Table1 より分かるように、時間経過にもなって急激に増大する。 A_2 は開口変位の 1 乗のオーダーであるが、透水係数 k_2 は開口変位の 2 乗のオーダーであるので、式 (9) の右辺第二項の分子は開口変位の 3 乗のオーダーで増大する。Table1 より、 A_2 は時間経過とともに急激に増大するので、式 (9) の右辺第二項の分子はさらに増大するが、分母である $A = A_1 + A_2$ は A_1 が遥かに大きいことから供試体のマクロ的な透水係数 k はそれほど変化しない。また、本実験で用いた材料の透水係数も実際の岩盤の母岩部分のそれ ($10^{-8} \sim 10^{-10}$ m/s のオーダー) よりも大きい、つまり、式 (9) の右辺第一項の k_1 が大きいことから、マクロ的な透水係数は Table1 に示すように材料の透水係数 (3.158×10^{-6} m/s) と大差がない結果となっている。材料の透水係数が小さい、あるいは亀裂部分をカバーするような手法 (A_1 を小さくするという意味) で計測ができれば、亀裂の変形にもなる供試体のマクロ的な透水係数の変化を捉えられると考えている。

前章にて述べた通り、第二次クリープと考えられるのは、全体ひずみで 1.8% ~ 2.2% の区間で、この区間において

は透水係数はほとんど変化していない。ただし、この区間では、その前の区間に比べて透水係数の値が上下に振れる結果となっており、この挙動は亀裂のすべり／破壊と相関があるのではないかと考える。また、全体ひずみで 1.8 % および 2.2 % の時点における透水係数を比較すると、若干ではあるが 2.2 % の方が大きい。実験および解析の両者において、亀裂のすべりにともなう開口が認められており、こうした開口によって巨視的にも透水係数が増大し、その結果、巨視的には僅かではあるものの流量が変化している。いずれにせよ、今回の実験ではクリープ応力が過大であったことから、材料の一部が破壊し、その結果、クリープ挙動にともなう供試体のマクロ的な透水係数の変化に関する詳細を把握するには至っていない。今後、より低いクリープ応力を用いて実験する予定である。

最後に、流動解析によって得られた流速分布図を、Table1 にて示した各経過時間に対応させて Fig5 ~ Fig9 に示す。図は流速を常用対数で表しており、また、水平方向が供試体の奥行方向に、そして鉛直方向の下から上に向かう方向が亀裂に沿って右下から左上に向かう方向に相当している。流速は亀裂の開口量の 2 乗に比例するので (式 (8) より透水係数も開口量の 2 乗に比例し、一般に、流速は透水係数に比例となる)、図は、ある意味で開口量の分布とも読み替えることができる。流速が 10^{-5} m/s より小さい箇所は上下の亀裂がほぼ接触してほとんど開口していないことを示す。Fig5 より、クリープの初期段階では亀裂の変形も小さく、開口する領域およびその量も小さいことから、流速が 10^{-5} m/s より小さい領域が大半を占める。載荷とともに、Fig1 に示す雁行亀裂において、その曲線が最も鉛直に近くなる部分 (Fig. 1 では 2 箇所) において亀裂が開口し、その部分で流速が早くなる。さらにクリープ変形が進むと、開口する領域とその量が增大するが、最も鉛直に近くなる部分においてそれらが顕著となる。亀裂間という局所的な箇所に焦点を当てると、最終的には、大きく開口した部分の流速は密着部分の流速の 10000 倍に及ぶ。上述した通り、巨視的には透水係数は変化することはないものの、局所的には非常に速い流速の箇所が出現していることから、高レベル放射性廃棄物の処分問題で話題となる「コロイドの亀裂壁面への付着問題」などには影響を及ぼす可能性もあろう。

しかしながら、今回の実験および解析では、最終的に材料が破壊するモードになるような大きな力が加わっていたことから、純粋なクリープを議論できるものではない。したがって、今後、多数の実験を実施し、再現性も含めて議論する必要がある。

4. まとめ

本研究では岩盤内に存在する亀裂がクリープ変形することによって逐次変化する亀裂内の透水性能を評価するために、それを模擬した実験 (平面ひずみ下におけるクリープ同時透水試験) を実施すると同時に亀裂内の流動解析を実施した。数値解析においては、まず、亀裂の開口状況を評価する必要

があることから、文献 (6) で提案されているクリープ変形のモデルを用いてクリープ解析を行い、開口変位量の算出を行った。次に、流動解析については、Navier-Stokes の運動方程式と質量保存則をベースとした流体ベアリングモデルを採用した。

亀裂のクリープ変形については、限定的ではあるが第二期クリープに相当する領域の変形が評価でき、それを基に実施した流動解析においても、その結果は実験結果と大きく異なるということにはなかった。しかしながら、今回の実験では、クリープ応力が大きすぎたということもあり、今後、いくつかのパターンのクリープ応力を用いて実験を行い、クリープ挙動による亀裂の変形を正確に把握する必要がある。現段階では、本研究の有用性などをきちんと議論できないため、追加実験を行う予定である。また、今回の実験では人工材料を用いており、天然の岩盤を用いた実験で変形および透水性能を適切に評価する必要があるものと思われる。

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会, (2000)
- (3) Wada, M., Yoshida, H., Kato, K., Koyama, T., Suzuki, Y. and Kaneko, T.: Micromechanics-Based Creep Model for Soft Rock, Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University, Special Ed. (2004), pp. 195-202.
- (4) 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, 5 (1999), pp. 27-36.
- (5) 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, (2005), pp.3-50 - 4-70.
- (6) 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, 52A(2006), pp. 1-10.
- (7) 日本材料学会 編: 岩の力学, 丸善, (1993), pp. 423-432.