

(4) 粘土微粒子懸濁液による 割れ目の広域止水に関する基礎的研究

東京大学工学部 正会員 小島 圭二
同 正会員 登坂 博行
応用地質(株) 正会員○伊藤 一誠

Fundamental Study about Grouting into the Fracture
by Fine Particle Suspension of Clay in the Extensive Area

Keiji KOJIMA, University of Tokyo
Hiroyuki TOSAKA, University of Tokyo
Kazumasa ITOH, OYO Corporation

ABSTRACT

In this study, as one method of groundwater control in fractured rock mass, the authors took the following steps about grouting of fine particle suspension of clay in the extensive area.

- a) Development of numerical method simulating injection of suspension and clogging of particles, that takes account of clogging of particles in terms of pseudo relative permeability.
- b) Examination of the method proposed for its validity considering the relations between the results of numerical simulation and laboratory experiment.

The followings are results of this study.

- 1) From the comparison of suspended pattern of particles between experiment and simulation, the authors propose the numerical simulator of clogging in low concentration.
- 2) In order to design the suspending materials for grouting by the fine clay particles, we should obtain the most suitable condition for the particle radius and the concentration due to the numerical simulation proposed and laboratory experiments.

1. はじめに

近年、地下深部の大規模地下空間の利用の計画が盛んになるに従い、地下深部の割れ目系岩盤における地下水流れの制御が、特に放射性廃棄物の地層処分などにおいて必要な技術課題となっている。地下水制御の一例として、注入工法による止水を考えた場合、特に割れ目系岩盤において注入材料に必要な特性としては広域への浸透性である(小島他1988⁽¹⁾、伊藤・小島1987)。その点において最近注目されている方法は、粘土などの微粒子懸濁液による長時間をかけた広域の目詰めである。本論文では粒子が割れ目内に目詰まりしていく過程を数値的に再現する解析方法を開発し、室内実験との比較によって、その妥当性を検討した。

2. 割れ目面のモデル化

本研究においては、単一割れ目面内をモデル化するために、第一に割れ目面の粗度を計測し、面内の局部

的開口巾分布モデルの作成を行った。図-1に粗度計測システムの模式図を示す。計測は自然割れ目を含む花崗岩コア（ $l=96\text{mm}$, $d=49\text{mm}$ ）に対し、割れ目の両面に、長軸方向に直交する 1mm 間隔の測線を設定し、その測線によって位置、起伏を同時に測定するという方法を採用した。測線間隔に合わせ、各測線上を 1mm 間隔に分割し、コア両壁の境界面を基準面としたときの各点の変位量をその周囲を代表する値とし、2次元粗度モデルを作成した。次に両面の同位置での起伏データの和をとった。その中で最大値を示す部分を接点（開口巾0）と判断した。次に各点の起伏値の和と接触部分の起伏値の和の差を各点の開口巾と考え、局部的開口巾分布を作成した。

3. 目詰まり数値解析の方法

本研究では、単一割れ目内に微粒子懸濁液が浸入し、懸濁液の固体成分が面内に目詰まりして行く原理として、（1）粒径と開口巾の大小関係に起因するふるい効果によるもの、および（2）粒子の濃度による架橋効果によるものの2種類を考慮した。以上の2つの目詰まり効果を数式上に組み込む方法として、一般的に多成分系の浸透流解析で用いられる擬似相対浸透率（Pseudo Relative Permeability）の概念を導入した。基本方程式としては、流れは1相とし、その中で水・固体両成分の物質収支式をたてると以下になる。

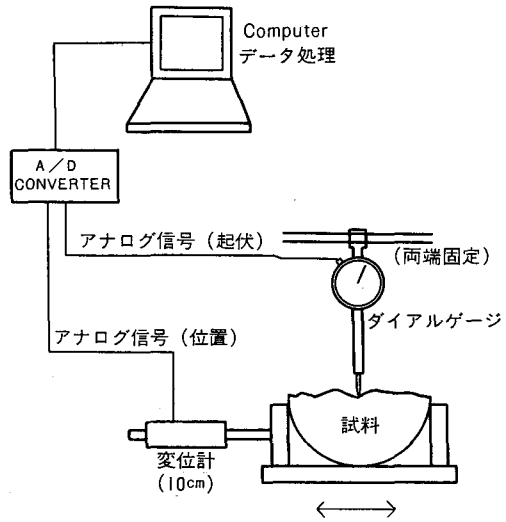


図-1 割れ目面粗度計測システム模式図

$$\nabla (K \cdot Krw / \mu_m B_m) \nabla (P - \rho_m Z) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi / B_m) \quad \dots\dots(1)$$

$$\nabla (K \cdot Krs \cdot Rs / \mu_m B_m) \nabla (P - \rho_m Z) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi \cdot Rs / B_m) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 K : 浸透率 [L^2]

μ_m : 懸濁液の粘性係数 [$ML^{-1}T^{-1}$]

ρ_m : 懸濁液の密度（液柱を含む） [$ML^{-2}T^{-2}$]

B_m : 懸濁液の容積係数 [-]

ϕ : 間隙率 [-]

Rs : 水に対する固体成分の割合 [-]

Krw , Krs : 水、固体の擬似相対浸透率 [-]

P : 懸濁液の圧力 [$ML^{-1}T^{-2}$]

ここで示した懸濁液の容積係数 B_m 、および水に対する固体成分の割合 Rs は、以下の式で表わされる量と定義した。

$$B_m = (V_{wr} + V_{sr}) / V_{ws} \quad \dots\dots(3)$$

$$Rs = V_{ss} / V_{ws} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 V_{wr} : 圧力下での懸濁液中の水の体積

V_{sr} : 圧力下での懸濁液中の固体の体積

V_{ws} : 基準状態（任意）での懸濁液中の水の体積

今回の解析においては水は微圧縮性、固体成分は非圧縮性と仮定しているため、式(1)~(4)を懸濁液の圧力 P と懸濁液中の水飽和率（体積） S_w で表わされる式に変形すると以下になる。

$$\nabla (K \cdot Krw \cdot S_w / \mu_m B_w) \nabla (P - \rho_m Z) = \frac{\partial}{\partial t} (S_w / B_w) \quad \dots\dots(5)$$

$$\nabla (K \cdot K_{rs} \cdot (1 - S_w) / \mu_m) \nabla (P - \rho_m Z) = \frac{\partial}{\partial t} (1 - S_w) \quad \dots\dots(6)$$

以上の式(5), (6)を陰的有限差分法を用い離散化して解析を行った。解析上は2. で示した方法で作成し、室内透水試験結果で補正を行った局所的な開口巾を各差分グリッドに与えて計算を行っている。前述した2種類の目詰まり効果による水、固体両成分の擬似相対浸透率の算出方法を図-2に示した。ここで、各成分の擬似相対浸透率は、計算対象としているグリッドと隣接しているグリッドの開口巾比をR (図-2 (a)参照)として、

- ① 注入に用いる粒子の径と、計算対象グリッドに隣接するグリッドの開口巾の大小関係 (図-2 (b)参照)
 - ② 計算対象のグリッド内の固体成分の飽和率 $(1 - S_w)$ とRの関係 (図-2 (c)参照)
- の2種類の関係によって決定されることとした。

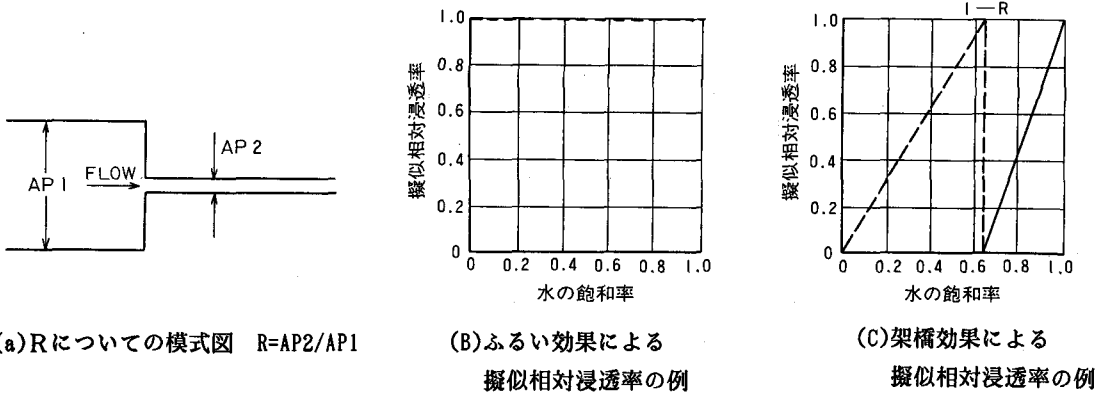


図-2 擬似相対浸透率による目詰まり効果の表現例
(実線：固体成分、破線：水)

図-2 (b)はふるい効果による擬似相対浸透率曲線であり、ここではふるい効果によって目詰まりを起こす場合を示している。また図-2 (c)は架橋効果によるものを出し、固体成分の濃度が増すほど両成分の相対浸透率が低下していくという状態を示している。実際には図-2 (b)に示したふるい効果による擬似相対浸透率と図-2 (c)に示した架橋効果による擬似相対浸透率の積が、各成分の相対浸透率となっている。以上の方法で求められた両成分の相対浸透率を式(5)および(6)に組み込んで、計算上の各時間ステップにおける未知数Pおよび S_w をを算出し、微粒子懸濁液注入における透水量の低下と割れ目面内の目詰まりパターンを解析した。

4. 数値解析結果と室内実験との比較

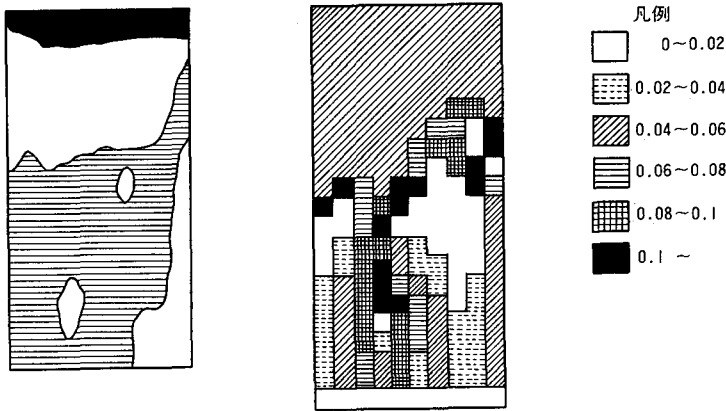
数値解析に先立って同一の供試体に対してアルミナおよびカオリナイトの微粒子懸濁液の注入試験を行い、透水量の低下と割れ目面内への粒子の残留パターンを観測し、数値解析との比較を行った。

比較を行ったケースは以下の2ケースである。

- ① カオリナイト (50%粒径 $5.0 \mu m$) 懸濁液濃度5.0%
- ② 同 懸濁液濃度1.0%

今回用いたカオリナイトは広い粒度分布を持っているが、解析は単一粒度としてしか行えないため、粒度分布の範囲内で、粒度を $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ の3種類について解析を行った。

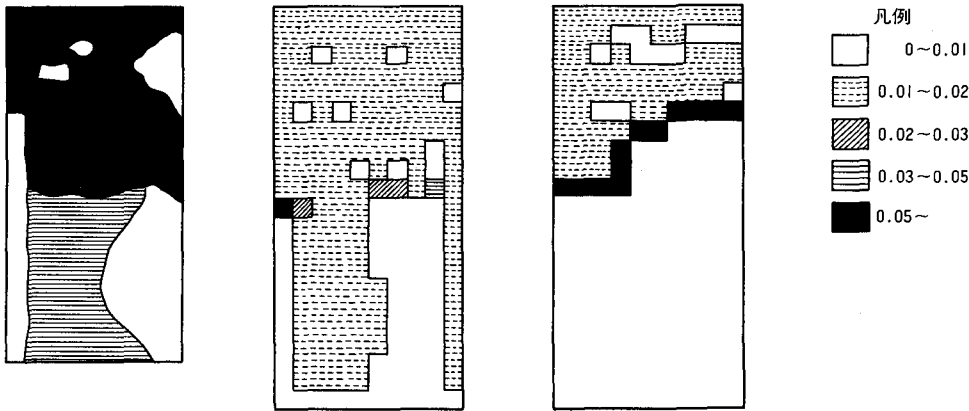
①のケースにおける、割れ目面内への粘土の残留パターンを、実験後の観察結果、粒径 $15\mu\text{m}$ とした計算結果について示したものが図-3である。



実験による粘土の残留パターン 粒径 $15\mu\text{m}$ での計算による
 ■---特に濃集している部分 粘土の残留パターン
 ▨---薄く残留している部分

図-3 粘土残留パターンによる実験と数値解析の比較(ケース①)

図-3からも見受けられるように、このケースにおいては粘土の残留パターンは実験と数値解析でかなり異なった結果が得られる。この原因としては、実験結果の方では懸濁液の注入口周辺で特に濃集部分がみられることから、ケース①の場合は粘土の濃度が高いため団粒化現象が起こってしまい、実質的な粒度が大きくなったためと考えられる。広域へのグラウトを目的とした場合、注入箇所周辺のみを目詰めするこの様な現象は望ましくない。そのため、濃度をより低くするか、分散剤の使用をする事が望ましいと考えられる。



実験による粘土の残留パターン (a)粒径 $5\mu\text{m}$ での計算による (b)粒径 $15\mu\text{m}$ での計算による
 ■---特に濃集している部分 粘土の残留パターン 粘土の残留パターン
 ▨---薄く残留している部分

図-4 粘土残留パターンによる実験と数値解析の比較(ケース②)

②のケースにおける粘土の実験から観測された粘土の面内への残留パターン、および粒径を $5\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ と設定して計算を行ったときの粘土の残留パターンを図-4に示す。これから割れ目面全体の残留パターンとしては $5\mu\text{m}$ と設定したときの結果が、ほぼ実験結果を再現していると考えられる。また、実験でも見られる

濃集部分は粒径を15 μm と設定した場合の計算によって再現されていると考えられる。また、このケースにおける透水量の時間変化を実験、数値解析について比較したものを図-5に示す。実験結果は粒径5 μm の計算結果と粒径15 μm の計算結果の間となっている。この結果からも、今回の数値解析方法によって、懸濁液の濃度が低い場合には、割れ目面内への粒子の目詰まり現象を再現することが可能であると考えられる。

また、大規模地下空間利用における広域へのグラウトという目的を考えた場合、ケース②の粒径15 μm の設定における数値解析結果のように、局部的に極端な目詰まりをおこし、図-5で示されているように透水量が短時間で著しく低下するような結果は望ましくない。粒径5 μm の時の解析結果のように割れ目面のほぼ全域に粒子が滞留して、透水量が図-5の5 μm のケースに示しているように徐々に低下していく結果が望ましい。これから、本例では粒径5 μm 程度、少なくとも15 μm 未満の粒子を長時間かけて注入すべきであるという判断が下せる。

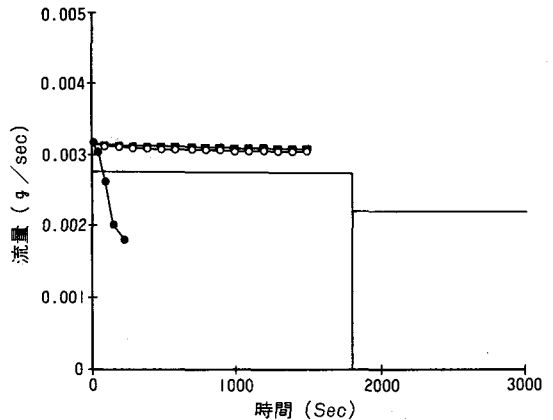


図-5 透水量の時間変化 (ケース②)

棒グラフ：実験値

- : 粒径5 μm での計算値
- : 粒径10 μm での計算値
- : 粒径15 μm での計算値

5. まとめ

以上により、今回開発した数値解析方法によって、懸濁液濃度が低い場合には、現実の目詰まり現象の再現が可能であることが示された。また、注入に用いる懸濁液の最適濃度、粒径の存在が示され、室内実験と今回の数値解析の併用による最適条件決定システムの基礎というべきものが得られた。今回の解析は、単一割れ目に対する懸濁液注入を対象としており、実際の割れ目系岩盤への適用という面は今後の課題と言えるが、従来よりも簡便な新しい解析方法の開発という点で一応の成果が得られたので、ここに報告することとする。

参考文献

- (1) 小島, 登坂, 伊藤, 米山, 1988, "地下空間利用に関する割れ目の広域グラウトの基礎実験 - 微粒子による目詰め-", 日本応用地質学会昭和63年度研究発表会講演論文集
- (2) 伊藤一誠, 小島圭二, 1987, "地層処分における地下水制御に関する数値解析" 日本原子力学会昭和62年秋の大会講演要旨集
- (3) Aziz.K., Settari.A., 1979, "Petroleum Reservoir Simulation", Elsevier Publishing Company