

フラクチャーネットワークを用いたグラウチング数値解析手法に関する基礎的研究 STUDY ON NUMERICAL SIMULATION METHOD OF GROUTING BASED ON FRACTURE NETWORK ANALYSIS

堀 宗朗¹・市川 和臣²・小山 高寛³

Muneo HORI, Kazuomi ICHIKAWA and Takahiro KOYAMA

This paper presents a new analysis method for grouting which uses fracture network. The method is aimed at the prediction of improvement in rock permeability for a given specification of grouting. The major features of the proposed method are as follows: 1) fewer number of input parameters which can be identified through geological data and test results; 2) consideration of joint deformation as a source which induces non-linearity in permeable flow; and 3) simple models for a consolidation process of grout which account for stacking and de-hydration. Developing a prototype, this paper tries to reproduce data measured at a dam site. Numerical results appear in agreement with the observed data; in particular, it can somehow evaluate the stage number at which the clear improvement in watertightness is observed.

1. はじめに

ダム建設に関するグラウチングの重要性は論ずるまでもない。現在、注入孔の間隔やステージ長、また、注入圧やグラウトの濃度等のグラウチングの施工仕様は、経験に基づいて決定されることが多い。これは、岩盤内の水みちの分布の推定が難しく、グラウト材の浸透や硬化の過程が不明確であり、設定された施工仕様による改良効果の事前予測が難しいためと考えられる^{*1}。合理的かつ経済的なグラウチングを行うためには、このような問題点を解決した数値解析手法を開発し、施工仕様を事前に評価することが一つの方針と考えられる。なお、現場での実測データも大きくばらつくことを考慮すると、このような解析手法は、精緻な解析によって、期待される改良効果を一つの数値で表すことだけでは不十分と思われる。岩盤の透水性に関するデータの質と量に応じた、ある程度の幅をもった予測を行い、ばらつきの度合いも予測することも必要となる。

グラウチングの数値解析手法を開発する第一歩として、本研究は、解析手法のプロトタイプを構築する。ついで、現場データの再現を試みることで、プロトタイプの妥当性やグラウチング解析の可能性を検討する。グラウチングの対象となる岩盤のサイズが比較的小さいため、多孔質媒体を用いる連続体解析よりも、岩盤内のジョイントを円盤状のクラックによってモデル化したフ

¹ 正会員 Ph.D. 東京大学助教授 工学部 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

² 学生会員 東京大学大学院修士課程 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

³ 学生会員 東京大学大学院修士課程 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

ラクチャーネットワーク解析が適当と考えられる。したがって、グラウチングの解析は、設定された仕様でグラウチングのモンテカルロシミュレーションを行い、注入孔周辺のルジオン値の低下を算定し、改良効果を予測することになる*2。なお、上記の課題に対処するため、プロトタイプでは、1) 地質情報と水押しのデータを利用した、クラックの幾何形状や分布の推定法、2) ジョイントの弾性変形を考慮し、透水現象の非線形性のモデル化、3) グラウト材の浸透・硬化・改良効果に関するモデルの構築、を提案する。

2. 構築されたグラウチング解析

本研究で提案するフラクチャーネットワークは、ジョイントを円盤状クラック、グラウト孔周辺の岩盤を円筒状の領域としてモデル化し、クラックを円筒状領域に発生させる。このモデルについては、図 1 に示す。クラックのかみ合わせの形状(図 2 参照)が求まると、各クラック内の浸透流解析から噛み合わせの圧力と流量の関係が導かれる。簡単のため、定常・飽和状態を仮定すると、クラック内の水圧はラプラス方程式に支配されることになり、噛み合わせの圧力-流量関係は比較的簡単に決定できる。この圧力-流量関係がクラックの見かけ上の透水係数を与えることになる。したがって、グラウチングの解析は、この透水係数に浸透の非線形性やグラウト材の硬化の影響を組み込み、グラウト材の浸透・硬化解析を準定常で行う。ついで各クラックでのグラウト材の硬化の状況を元に、円筒領域の改良効果を判定することになる。以下に解析手法のポイントを整理する。構築されたモデルに関しては図 3 参照。

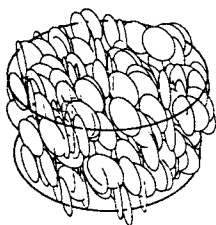


図 1: 発生させたクラック

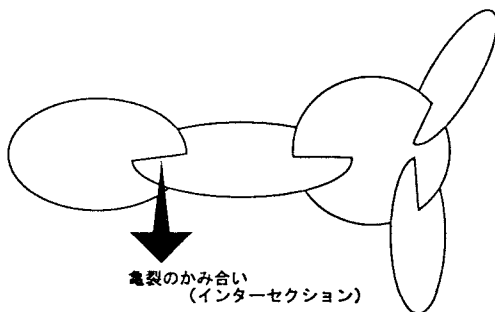


図 2: 亀裂のかみ合わせ

2.1 フラクチャーの幾何パラメータの推定法

フラクチャーの幾何パラメータは、法線方向 (φ, θ) 、開口幅 h 、径 a 、密度 ρ [本/cm³]、の 4 つである(表 1 参照)。ボアホールカメラ等の観察により開口幅、シュミットネットを元に卓越したジョイントの走向・傾斜から法線、が決定できる。径と密度は、水押し時に測定されるルジオン値や圧力-流量関係を再現するよう、パラメトリックスタディによって決定される。なお、径を決めると、

$$d = \rho \pi a^2 \cos \varphi \quad (1)$$

測定された亀裂間隔 d から密度が求まるため、パラメトリックスタディは径のみを扱う。

表 1: ジョイントのパラメータ

幾何形状	決定方法
法線 (φ, θ)	走向・傾斜
開口幅 (h)	亀裂開口幅
径 (a)	亀裂間隔と水押しの
密度 (ρ)	シミュレーション

2.2 弾性変形を考慮した非線形浸透のモデル (図 3-a)

岩盤浸透流の非線形性には、乱流や水圧破碎等さまざまな原因があることが指摘されている。ルジオン試験・グラウチングの際には、地圧に比べて相当高い圧力で、岩盤の弱部であるジョイントに流体を注入する。従って、昇圧時に圧力の増加に比べて流量が大きく増加する場合、ジョイントの変形によって透水性が高くなることが予想される。このような場合、降圧時には昇圧時と同じ圧力でも流量は増加し、透水性が高くなっていることから、ジョイントの非可逆的な変形や破壊が起こることも予想される。

上記の予想に基づき、ジョイントの弾性変形と破壊による非線形性浸透のモデルを提案する。円盤のクラックに一樣な圧力が働く場合の弾性解を元に、平均の浸透圧と地圧の差 $p - p_o$ と開口幅の変化 Δh^e に次の線形関係を仮定する。

$$\Delta h^e = \frac{2}{3} a \frac{8(1-\nu^2)}{\pi E} (p - p_o) \quad (2)$$

E は岩盤の弾性係数である。ついで、ジョイントの破壊のモデルとして、亀裂幅の増加分 Δh は圧力が低下しても 0 とならないことを仮定する。残留する開口幅を $\alpha \Delta h$ とし、未知パラメータ α を導入する。($\alpha = 0$ の場合は弾性変形に対応)。

2.3 グラウト材の浸透・硬化 (図 3-b)

グラウト材がジョイント内を浸透する際、目詰まりや脱水が起こることが知られている。このような現象の起こり易さは、グラウト材の粘性や流速も影響するが、最も支配的な要因はジョイントの開口幅と考えられる。すなわち、ジョイントの開口が小さいところ程発生しやすくなる。しかし、各ジョイントの開口の分布を測定し、目詰まりの起こしやすい箇所を調べることはほぼ不可能である。

浸透する距離に比例して開口の小さい箇所に達する確率が増加することが予想される。そこで、浸透にともなう目詰まりや脱水に対応して、グラウト材の粘性係数 μ が時間に比例して増加することを仮定した。また、ジョイントが厚い程、この確率は小さくなるため、グラウト材の粘性に関して次のモデルを設定する。

$$\mu(t) = \mu(0) \left(1 + \beta A \frac{t}{t_c} \frac{h_0}{h(t)} \right) \quad (3)$$

ここで、 μ_0 は初期粘性、 h_0 は初期開口幅、 t は注入時間、 $\mu(t) \cdot h(t)$ はそれぞれ t での粘性と開口幅である。また、開口幅の影響に対応する未知パラメータとして β を導入した。なお、比例係数 A は t_c 経った時の μ の増加する割合である。この値は、日鐵株式会社で行われた室内実験にお

いて、攪拌されたグラウト材の粘性の時間変化から決定した。

2.4 改良効果 (図 3-c)

グラウチングによる岩盤改良効果の判定は、次数に伴うルジオン値の低減で行われる³⁾。グラウチングの再現を試みるうえで重要なのが、前孔の影響をどのように考え、追加孔に設定していくかということである。本研究のフラクチャーネットワーク解析では、各ジョイントにおいて、セメントが、どの程度充填しているかということがはっきりと求められる。その情報を用いることにより、ボーリング孔からの距離とセメント充填率の関係が求めることができる。

以上のことから、グラウチングによる岩盤改良効果は、グラウト材がジョイントを充填することで発揮される。充填の度合いはジョイント内でも場所毎に異なるが、本研究では、各クラックが一様に充填され、開口幅 h が減少することを仮定した。各クラック内で硬化したグラウト材のセメント量 s が計算されるため、クラックの単位面積毎のセメント量 $s/\pi a^2$ と開口幅の減少 Δh^f の間に次のモデルを設定した。

$$\Delta h^f = \gamma \frac{s}{\pi a^2} \tag{4}$$

比例定数として未知パラメータ γ を導入した。

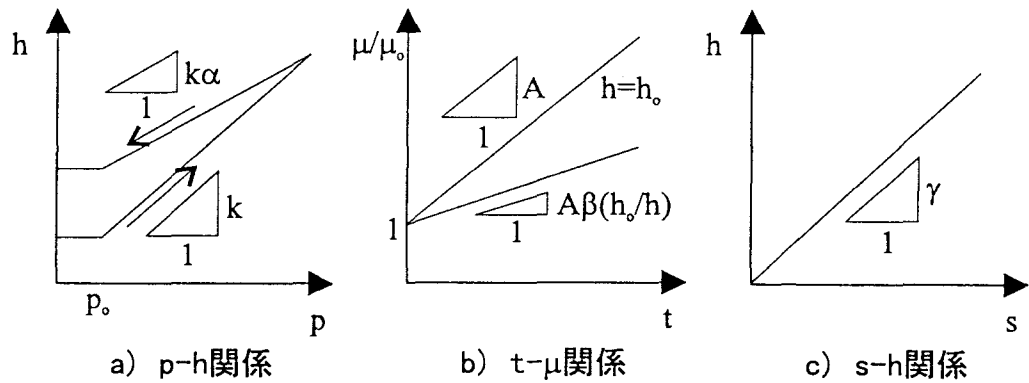


図 3: 設定された 3 つのモデル

3. 計算結果と検討

グラウチングの解析手法のプロトタイプの妥当性を検討するため、実測データの再現を試みる。用いた地質データを表 2 に整理する。また、グラウチング時の孔間隔、ステージ長は、実測データの観測されたものと同様にして行った。この時、パイロット孔の間隔は 24[m]、ステージ長は 5[m]であった。

前章で説明されたように、この解析には、クラックの径 a の他に 3 つのパラメータ $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ を決定しなければならない。適当なデータに対してパラメトリックスタディによってこれらを決定した後、そのパラメータを用いて他のデータの再現を試みる。なお、パラメトリックスタディには、20 回のシミュレーションから得られた平均値を用いた。

表 2: 解析のパラメータ

E, ν	10000[kgf/cm ²], 0.3
φ	$0.26\pi \sim 0.47\pi$
θ	$0.20\pi \sim 0.50\pi$
領域の径	5[m]

3.1 パラメトリックスタディ

水押し時の時間-圧力-流量関係から、 a と α を決定する。ルジオン試験時の t-P-Q 曲線は、浅いステージと深いステージでは異なっている。特に 1 ステージにおいては流れやすくなっている。これは、表層部が掘削によって損傷を被り、透水性が増すことに起因すると予想される。従って、岩盤の亀裂パラメータを決定する為には、表面の掘削の影響を受けていないと考えられる 4 ステージのデータを用いることにする。 $a = 75, 100, 125, 150$ とした場合の時間-流量関係を図 4 に示す。この時、 $\alpha = 0.5$ を用いた。 $a = 125$ を用いて $\alpha = 0.25, 0.5, 0.75$ とした場合の時間-流量関係を図 5 に示す。この結果、 $a = 125[\text{cm}]$ と $\alpha = 0.5$ を設定した。両者とも 20 回ほどのシミュレーションで t-P-Q 関係は収束する。

収束した結果とグラウト材の時間-圧力-流量関係から、 β を決定する。ついで、実際に設定された注入孔の間隔を用いて、1～5 次孔のグラウチングのシミュレーションを行い、ルジオン値やセメント注入量の次数低減が再現されるように、 γ を設定する。この結果、 $\beta = 1$ と $\gamma = 0.5$ を設定した。この β を用いた典型的な例を図 6 に示す。

掘削による損傷の影響を考慮し、4 ステージの解析と条件を変えて 1 ステージの水押しの解析を行った。掘削による緩みを表すために、岩盤の弾性係数を低下させたり、クラックの開口幅を増加させた。この結果、弾性係数を 70 % 低下させた場合に、他のパラメータを変えずに 4 ステージの水押しを再現できることが分かった。得られた圧力-流量関係を図 7 に示す。

3.2 実測データの再現

設定されたパラメータを用いて、パイロット孔から 5 次孔の 1～5 ステージのグラウチングのシミュレーションを行った。1 回毎のシミュレーションのばらつきは大きいものの、20 回程のシミュレーションではほぼ同一の圧力-流量関係等の平均的な挙動が得られた。各ステージの圧力-流量関係は、比較的良く実測値に対応する。

グラウチングの解析の目的である、改良効果を調べるために、1 と 4 ステージのセメント注入量とルジオン値の次数低減の様子を図 8～11 に示す。値自体は必ずしも良好に一致しないが、改良効果が現れたステージを予測することには成功している。改良効果は、深部ではルジオン値が 2 以下、浅部では 5 以下になったことをもって、現れたとする。

本研究で構築されたグラウチングの解析は、グラウト材の浸透・硬化過程や改良効果の判定に大胆なモデル化を行い、また、準定常解析という簡略化した解析を行っている。したがって、実用に向けての改良の課題は少なからず残されている。しかし、このような比較的粗い解析でありながら、改良効果の判定基準となる次数低減の再現にはある程度の成功を見ており、解析手法の基本的な考え方は妥当であることが示唆されると思われる。したがって、実用に供しうるグラウチングの数値解析の構築は十分可能と期待される。

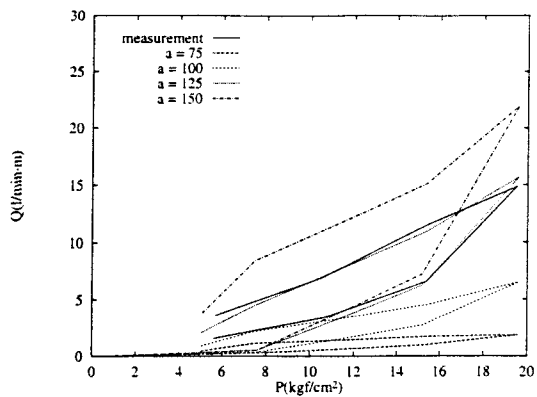


図 4: パラメトリックスタディ (1): a

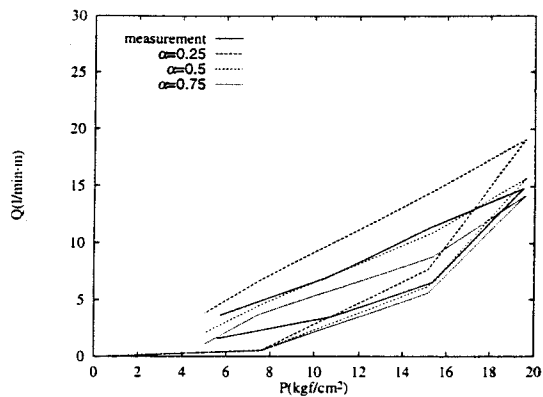


図 5: パラメトリックスタディ (2): α

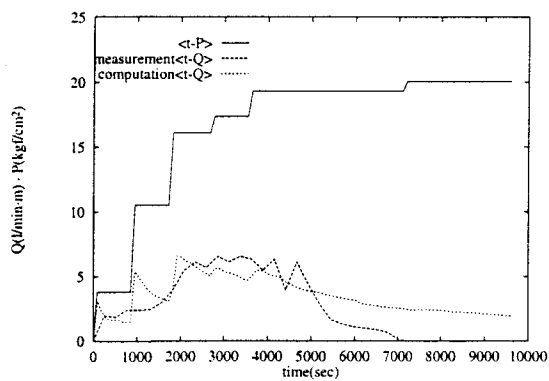


図 6: グラウト材の時間一流量関係 ($\beta = 1$)

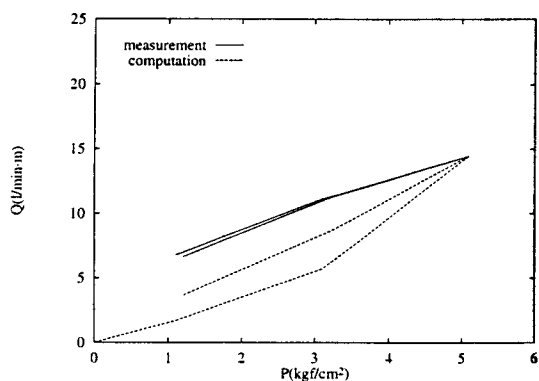


図 7: 1 ステージの圧力一流量関係

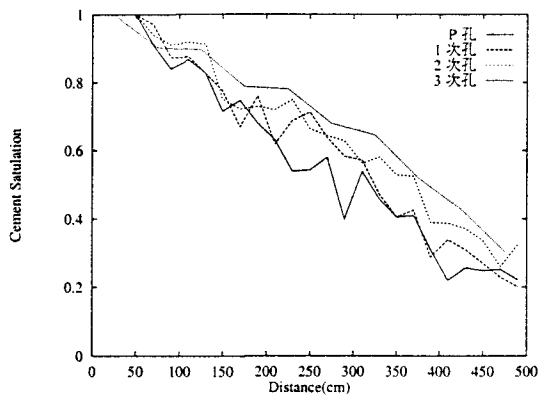


図 8: 4 ステージの次数低減の再現：
セメント注入量

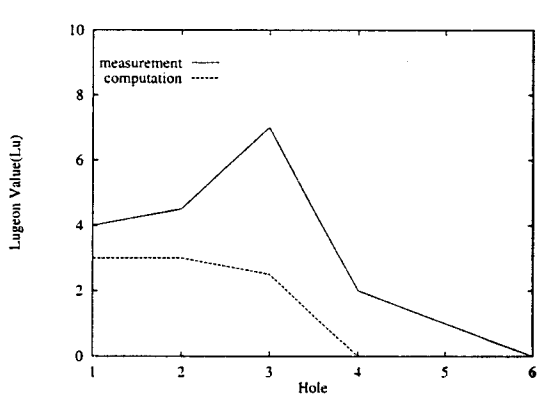


図 9: 4 ステージの次数低減の再現：
ルジオン値

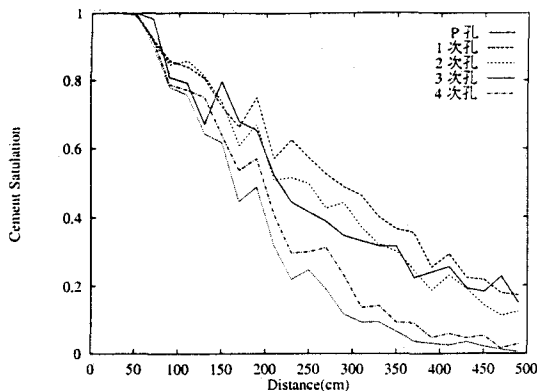


図 10: 1 ステージの次数低減の再現：
セメント注入量

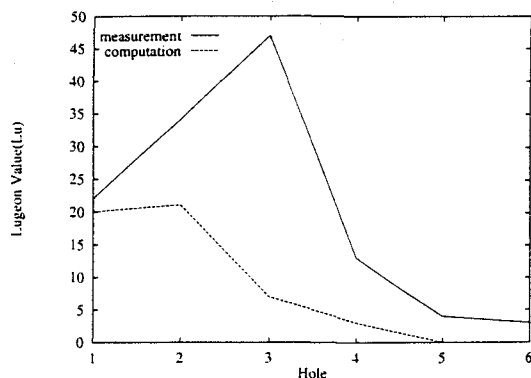


図 11: 1 ステージの次数低減の再現：
ルジオン値

4. おわりに

フラクチャーネットワークを用いたグラウチングの数値解析手法のプロトタイプを構築した。この手法は、地質データや水押しのデータから決定される少数のインプットから、設定された注入仕様による改良効果を予測するものである。大胆なモデル化と比較的簡単な解析を行っているにも関わらず、ステージ毎の次数に伴うルジオン値の低減がある程度再現され、構築された解析手法の基本的な考え方の妥当性が示唆された。

前述したように、岩盤内は様々ではないためばらつきが大きい。本研究のフラクチャーネットワーク解析では、モンテカルロシミュレーションによる高速数値計算を行い、平均が収束するまで繰り返し計算を行っているため、やはりばらつきが大きい。この両者のばらつきをどう評価するかということは、今後の重要な課題である。

本研究で用いた実測データは東京電力株式会社のご好意による。ここに記して感謝の意を表す。

5. 参考文献:

- 1) 山口, 松本:「ダム基礎の透水性とルジオン値」, 土木学会論文集 No.412 pp.51-60,1992.
- 2) 天野, 永久他:「フラクチャーネットワークモデルにおける単孔式透水試験結果の利用と評価」, 第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp.201-205,1996.
- 3) 菊池, 水戸他:「浦部ダムにおけるグラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関する検討」, 第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp.281-285,1996.
- 4) 小山 高寛:「フラクチャーネットワーク解析を用いたグラウチング仕様決定法の構築」, 東京大学工学部土木工学科卒業論文, 1996.