

グラウト材の地盤中への浸透過程に関する数値解析的研究

NUMERICAL STUDY ON INFILTRATION PROCESS OF GROUTING MATERIAL INTO GROUND

古賀誠*・島田英樹**・松井紀久男***

Makoto KOGA, Hideki SHIMADA, Kikuo MATSUI

Grouting means pressurized injection of the grouting material into voids and it is done to improve permeability or mechanical characteristic. However, grouting is based on empirical relationships and on the experience of the grouting personal.

Therefore, to explain the infiltration process of grouting material and the clogging process of voids injection experiment and numerical analysis introduced the filtration theory was done. In this paper, the field data of the Lugeon test and grouting done in the dam site located on the Northwest part of Kyushu Island were analyzed and numerical analysis was done to this results.

Key Words: grouting, infiltration process, injection analysis, laminar flow, filtration coefficient

1. はじめに

グラウチングは、ダムなどの土木構造物の基礎となる土質地盤や岩盤に対してグラウト材の加圧注入により空隙を充填し、構造物基礎の透水性や力学的特性を改良することを目的として行われている。しかしながら、グラウチングの現場施工の最適性については、グラウト材の浸透・硬化過程などが不明確であるため、現場技術者の経験に大きく依存しているのが現況である¹⁾。また、放射性廃棄物の地下処分場においても放射性物質の処分場周辺への拡散防止のため、周辺岩盤へのグラウチングが必要に応じて計画されている²⁾。このような状況において合理的かつ経済的なグラウチングの必要性からグラウト材の浸透挙動を精度良く推定できる数値モデルの確立が望まれている³⁾。

そこで、筆者らは地盤間隙内へのグラウト材の浸透過程およびグラウト材の地盤浸透中における間隙の閉塞過程を明らかにするために、マサ土試料を使用した低圧力下の注入実験を実施している⁴⁾。さらに、この注入実験を理論的に検討するために、ろ過理論を導入した数値解析も実施し、その適用性についても明らかにしている⁵⁾。そこで本報告では、このろ過理論を導入した数値解析手法を現場データへ適用した結果について報告する。具体的には、九州北西部に位置するダムサイトで行われたルジオン試験およびグラウチング結果を分析し、そのグラウチング結果について数値解析を実施した。

2. グラウト材の注入解析⁶⁾

セメントをベースにしたグラウト材の浸透過程は、セメント粒子の輸送過程および地盤間隙内への充填過

* 正会員 九州大学大学院博士課程 地球資源システム工学専攻

** 正会員 博士(工学) 九州大学大学院助教授 工学研究院地球資源システム工学部門

*** 正会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院地球資源システム工学部門

程の2つに大きく分類される。そこで本解析では、グラウト材が地盤中を浸透する過程で、セメント粒子が地盤内の空隙に定着捕捉され、空隙が徐々に閉塞していくものと仮定し、清澄化ろ過理論⁷⁾を導入した。解析に用いた理論式は1次元で表示すると以下の式(1)～(3)であり、式(3)からも明かなように、この理論式はグラウト材が層流状態で地盤内を浸透すると仮定したものである。

$$v_s \lambda C + \frac{\partial(nC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_h \frac{\partial(nC)}{\partial z} \right) - \frac{\partial(v_s C)}{\partial z} \quad (1)$$

$$n = n_0 - \int_0^t \lambda v_s C dt \quad (2)$$

$$v_s = \frac{\gamma}{72\mu} \frac{e^3}{1+e} d_s^2 \cdot i - \frac{\tau_0}{9\mu} \frac{e^2}{1+e} d_s \quad (3)$$

ここで v_s : ろ過速度(ダルシー速度), λ : ろ過係数, C : セメントグラウトの体積濃度, n : 空隙率, D_h : 分散係数, n_0 : 初期空隙率, γ : 単位体積重量, μ : 塑性粘度, e : 空隙比, d_s : マサ土粒子を球と仮定したときの粒子の直径, i : 動水勾配, τ_0 : 降伏応力である。式(1)は、清澄化ろ過理論とセメント粒子の輸送方程式から導出した空隙閉塞を表す式であり、式(2)は清澄化ろ過理論より得られた空隙率変化を表す式である。また、式(3)はセメントをベースにしたグラウト材の流動特性がビンガム流動を示すと仮定して導いた層流状態での浸透を表す式である。これらの式を組み合わせて解くことにより、グラウト材の注入解析が行われることになる。なお、本解析においては、これらの式について差分法を用いた非定常解析を行った。

3. 現場データの数値解析

3. 1 地質状況

グラウティング施工のデータは九州北西部に位置するダムの左岸リム部で行われたカーテングラウト(パイロット孔)の結果である。現場の地質状況は図-1に示すように安山岩溶岩, 安山岩自破碎溶岩, 凝灰角礫岩, 火山礫凝灰岩より構成され、全体的に 30° 程度で左岸より右岸側へ傾斜している。安山岩溶岩の岩質は礫

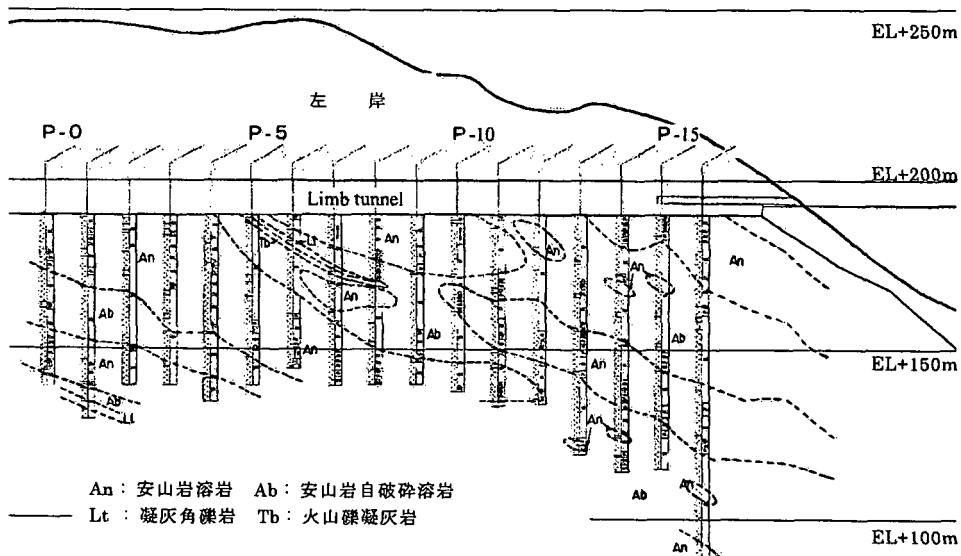


図-1 地質状況

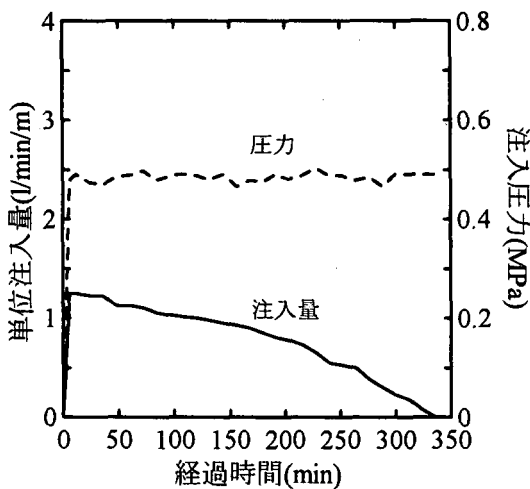


図-2 グラウト注入形態

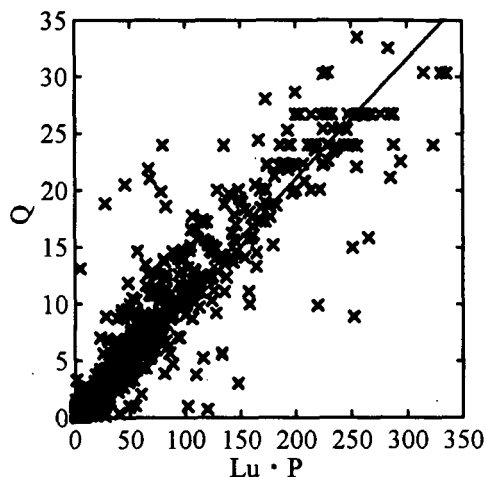


図-3 Q - $Lu \cdot P$ 関係図

密・堅硬で全般に亀裂が発達しており、自破碎溶岩に取り囲まれたように分布している。また、パイロット孔はダム堤体から奥に向かって P-16～P-0 の 17 本であり、グラウチングは各パイロット孔において、それぞれ 9～20 ステージの合計 198 のステージグラウチングが実施されている。また、本報告では全グラウチング結果の中から図-2 に示すようなグラウト注入形態⁸⁾のデータを抽出し、解析を行った。この注入形態は、一定圧力でグラウト材を注入した場合に注入流量が徐々に減少する傾向を示す理想的な注入形態であり、亀裂が多数存在する安山岩溶岩の部分で多く見られた。

3. 2 層流状態での注入

2. で示した式(1)～(3)を使用してグラウチングの施工データを解析するには、層流状態でグラウチングが実施されているデータを抽出する必要がある。そこで、層流状態でグラウチングが実施されているデータを抽出する条件を検討する。これには全ステージで実施されたルジオン試験結果、すなわち注入圧力、注入量およびルジオン値のデータを使用した。つまり、ルジオン試験時の注入水の流れが層流状態である場合には、その時の注入量は、注入圧力とルジオン値に比例すると考えられる。そこで、各ステージにおけるルジオン試験での注入圧力 P 、注入量 Q およびルジオン値 Lu の結果をもとに Q - $Lu \cdot P$ 関係図を作成した。その結果を図-3 に示す。図のように Q と $Lu \cdot P$ との間には比例関係があるとわかる。そこで全データから最小二乗法により、 Q と $Lu \cdot P$ との関係を求めた結果が図中の直線であり、次式である。

$$Q = 0.105 Lu \cdot P \quad (4)$$

つまり、式(4)のような関係があれば、注入水の注入状態は層流状態であり、この関係式から離れるにしたがって乱流状態などの異なった条件での注入状態であることが予想される。なお、注入水が層流状態となる条件は、式(4)の線上だけでなく、当然ルジオン試験を行っている場所の条件などにより、この直線は幅をもつことが予想される。

次に、グラウチング時にグラウト材が層流状態で地盤に注入されている条件もルジオン試験結果を使用して求めた式(4)と同様であると考えられる。しかし、グラウチング時において注入圧力および注入量は図-2 から明らかなように一定値を示していない。そこで、グラウチング時の注入圧力は各ステージにおいて設定された注入圧力とした。また、注入量は各ステージでの最大流量としたが、注入量はグラウト材の密度および粘度に影響されると考えられるため、これらの値を求めて注入量を補正して Q - $Lu \cdot P$ 関係図を作成した。つまり、 $Lu \cdot P$ を相対粘度 μ/μ_0 (μ : グラウト材の塑性粘度, μ_0 : 水の粘度) で除し、相対密度 ρ/ρ_0 (ρ :

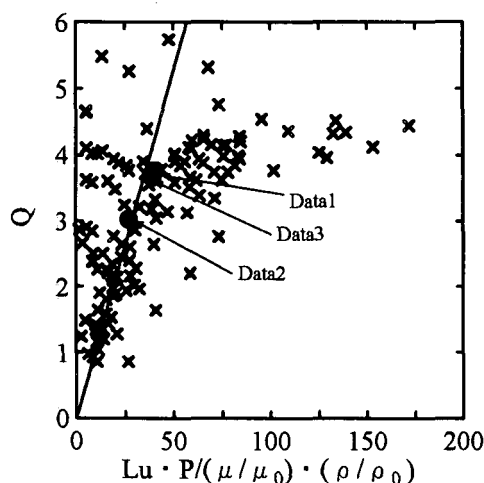


図-4 Q - $Lu \cdot P / (\mu / \mu_0) \cdot (\rho / \rho_0)$ 関係図

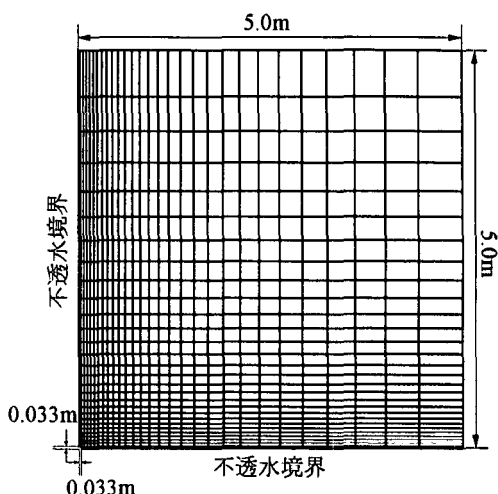


図-5 解析モデル

グラウト材の密度, ρ_0 : 水の密度)との積をとり, Q - $Lu \cdot P / (\mu / \mu_0) \cdot (\rho / \rho_0)$ 関係図を作成した。ただし, グラウト材の密度はセメント粒子の比重を 3.0 として計算し, 塑性粘度については以

前の筆者らの研究⁹⁾において, グラウト材の塑性粘度は森・乙竹(1955)が導出した次式¹⁰⁾に従うことを明らかにしているため, この式を用いて計算した。

表-1 現場の注入条件

	ルジオン値	RQD	注入区間(m)	有効注入圧力(MPa)
Data1	1.5	7.6	28.15~33.15	2.74
Data2	1.0	9.4	38.15~43.15	2.75
Data3	1.4	0.0	58.15~63.15	2.79

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \frac{3}{1/x_v - 1/0.52} \quad (5)$$

ここで, x_v はセメント粒子の容積濃度である。 Q - $Lu \cdot P / (\mu / \mu_0) \cdot (\rho / \rho_0)$ 関係図を図-4に示す。図中の直線が式(4)の結果である。図より, 式(4)の直線付近に位置するグラウト注入に関しては層流状態, もしくは層流状態に近い状態でグラウト材が注入されていると考えられるグラウチング結果である。そこで, 次節では, この直線付近に位置するステージのグラウト注入について, 2. で示した解析手法を適用し, 解析を行うことにする。

3. 3 現場の注入条件および解析モデル

解析は, 2. で示した式(1), (2)および式(3)を平面2次元に拡張して実施した。解析に使用したステージグラウチングのデータは, 図-4中のData1~Data3であり, 各データは表-1に示す条件でグラウチングが実施されている。これらのデータはルジオン値とRQD, 有効注入圧力が同程度で注入区間の深度が異なるものである。また, 注入されているグラウト材は, すべてのデータにおいて水セメント比(水WとセメントCの重量比) $W : C = 10 : 1$ である。なお, 本施工現場では, $\phi 66\text{mm}$ のボーリング孔からグラウト注入を行っていることから, 解析モデルは現場施工状況に即した図-5のようなモデルを用いた。このモデルは, 表-1からも明らかなようにRQDが小さいことから地盤を均質地盤と仮定し, その対称性からボーリング孔を中心とした周辺領域の1/4モデルである。解析条件は, 対称軸に沿って不透水境界とし, ボーリング孔に対応する節点には現場で作用させた有効注入圧力を与えた。なお, 地盤の透水係数はルジオン試験結果から $1.0Lu = 1.0 \times 10^{-7} \text{m/sec}$ として与え, 塑性粘度および降伏応力については, 塑性粘度に前節の式(5)を使用

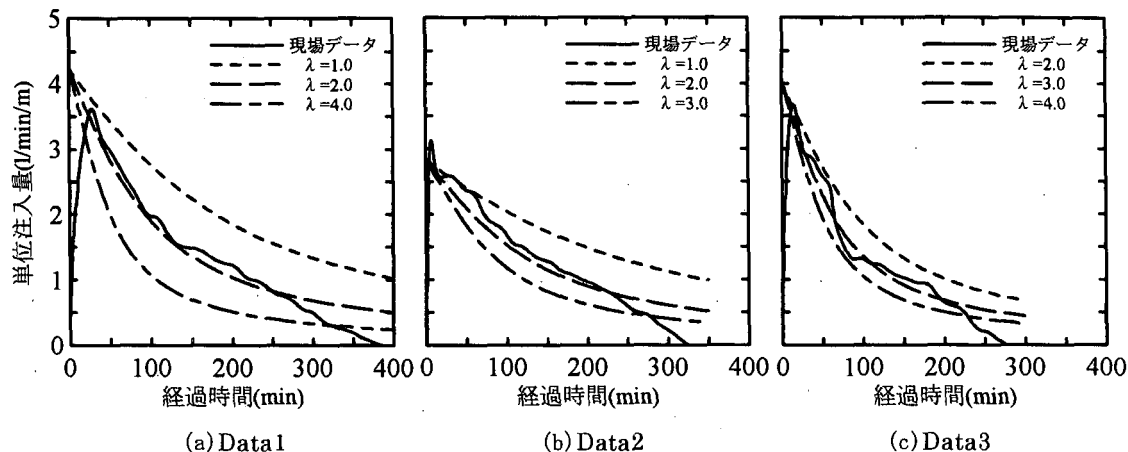


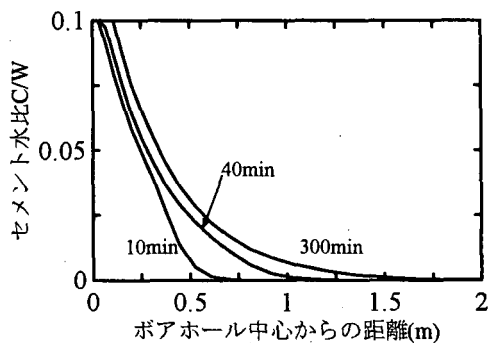
図-6 解析結果と現場実測データとの比較

し、降伏応力にB型粘度計により測定した結果⁹⁾を使用した。また、地盤の間隙率はTaylorが求めた次の関係式¹¹⁾から推定した。

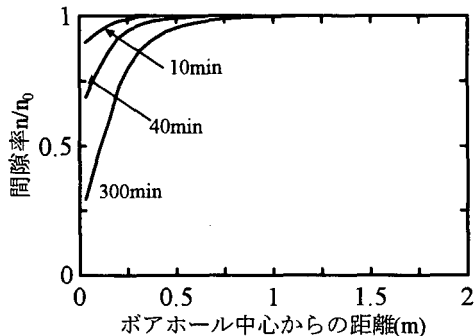
$$k = 1330 \frac{n^3}{(1-n)^2} \times 10^{-4} \quad (\text{cm/sec}) \quad (6)$$

3. 4 解析結果

解析は、ろ過係数をパラメータとして $\lambda = 1.0 \sim 4.0$ と変化させて行った。解析結果と実測結果の比較を図-6 (a) ~ (c)に示す。図の実線が現場における注入量の実測データ、その他の曲線がろ過係数をそれぞれ変化させたときの解析結果である。図に示すように、解析結果は実測データとよく一致している結果が得られていることがわかる。実測データともっとも一致している解析結果のろ過係数は、Data1, 2では $\lambda = 2.0$ 、Data3では $\lambda = 3.0$ であることがわかる。この結果は、筆者らの以前の注入実験結果⁴⁾において求めたろ過係数0.05~0.1に比較すると10倍以上大きく、深度の増加とともに大きくなる傾向にあると考えられる。



(a) グラウト材の浸透状況



(b) 間隙の閉塞状況

図-7 地盤中へのグラウト材の浸透状況図

次に、地盤中へのグラウト材の浸透状況の一例をData3について図-7に示す。図-7 (a), (b)はボーリング孔の中心からのグラウト材の浸透状況、間隙の閉塞状況を示した図であり、間隙率は初期の間隙率 n_0 で正規化した値 n/n_0 で示している。図の(a)より、グラウト材が地盤中を浸透していく速さは注入開始直後においては速く、時間の経過とともに遅くなっていることがわかる。特に、注入開始から40~300分の間において浸透速度が非常に遅くなっている。また、図の(b)より、間隙率はボーリング孔に近いところ、特にボーリング孔の中心から25cmまでのところにおいて急激に低下している。つまり、ボーリング孔周辺の近い領域における間隙がグラウト材により充填されることによって注入量の減少が認められる。

4. まとめ

本研究では、九州北西部に位置するダムサイトで行われたルジオン試験およびグラウチング結果を分析し、そのグラウチング結果について、ろ過理論を導入した数値解析を実施した。その結果を以下にまとめて示す。

- (1) ルジオン試験で得られた注入圧力、注入量およびルジオン値の結果から、ルジオン試験時の注入水の流れが層流状態となる条件は、式(4)の関係が成立するときである。
- (2) 式(4)の関係が成立しているグラウチング結果に対して数値解析を実施した結果、解析結果と実測結果とに良い一致が見られた。また、実測結果を最も良く表現している解析結果のろ過係数は注入深度の増加とともに大きくなる傾向がある。
- (3) グ라우チング時の流量を低下させる原因は、主にボーリング孔周辺の近い領域における間隙率低下である。

参考文献

- 1)永山功, 太田道男, 西村義, 谷口正基: 第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp353~357, 1996
- 2)Hässler, L., Stille, H. and Håkansson, U.: Proc. of 6th Int. Cong. on Rock Mechanics, Montreal, Vol.2, pp943~946, 1987
- 3) Widmann, R. : International society for rock mechanics commission on rock grouting, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.33, No.8, pp803~847, 1996
- 4)古賀誠, 島田英樹, 松井紀久男: 資源と素材, Vol118, No.1, pp29~35, 2002
- 5)古賀誠, 島田英樹, 笹岡孝司, 久保田士郎, 松井紀久男: 第 22 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp101~106, 2001
- 6)古賀誠, 島田英樹, 松井紀久男: 資源と素材, Vol117, No.3, pp209~214, 2001
- 7)杉本泰治: ろ過, 地人書館, pp109, 1992
- 8)古賀誠, 柴拓海, 笹岡孝司, 島田英樹, 松井紀久男: 土木学会第 53 回年次学術講演会第 3 部, pp672~673, 1998
- 9)古賀誠, 島田英樹, 松井紀久男: 資源と素材, Vol118, No.5,6, pp385~391, 2002
- 10)森芳郎, 乙竹直: 工業化学, Vol.20, No.9, pp488~494
- 11)Taylor, O.W. : Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley & Sons., pp114~115, 1948