

グラウト注入に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON GROUT INJECTION

古賀誠*・笹岡孝司**・島田英樹***・松井紀久男****

Makoto KOGA, Takashi SASAOKA, Hideki SHIMADA, Kikuo MATSUI

Grouting is commonly used method and a very important method in order to reduce the water flow through soil or fractured rock mass. In dam construction grouting is the method used abundantly to ensure water-tightness and tightness. Generally, grouting means pressurized injection of the grouting material into soil voids or cracks around borehole. However, grouting is based on empirical relationships and on the experience of the grouting personal.

From this point of view, a grout injection experiment and a theory analysis considering the filtration theory was done to explain a transportation process and a clogging process into voids of cement particles.

Key Words: grout, voids clogging, injection analysis, filtration theory

1. はじめに

グラウチングは、グラウト材の加圧注入により土木構造物、例えばダム基礎となる土質地盤あるいは岩盤中の空隙を充填し、岩盤を固密化・一体化・均質化することにより、基礎岩盤中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¹⁾。特に近年のダム建設においては、良好なダムサイトの不足から多量のグラウチングが行われているが、その現場施工の最適性については、現場技術者の経験に大きく依存しているのが現状である²⁾。これは、岩盤中のき裂や水みちの推定が困難であるとともに、グラウト材の浸透、硬化の過程が不明確であることに起因している。また、セメントをベースにしたグラウト材の土質地盤あるいは岩盤中への注入を考えると、セメント粒子の輸送過程、土質粒子の周囲あるいは岩盤き裂中でのセメント粒子の付着、すなわちセメント粒子の空隙への充填過程および充填されたグラウト材の硬化過程の3過程から成立していると考えられる。

そこで本研究では、セメント粒子の輸送過程および空隙への充填過程を明らかにするために、マサ土試料を用いた低圧力下でのグラウト材注入実験およびろ過理論を導入した理論解析を行った。

2. グラウト材の注入実験

2. 1 注入実験³⁾

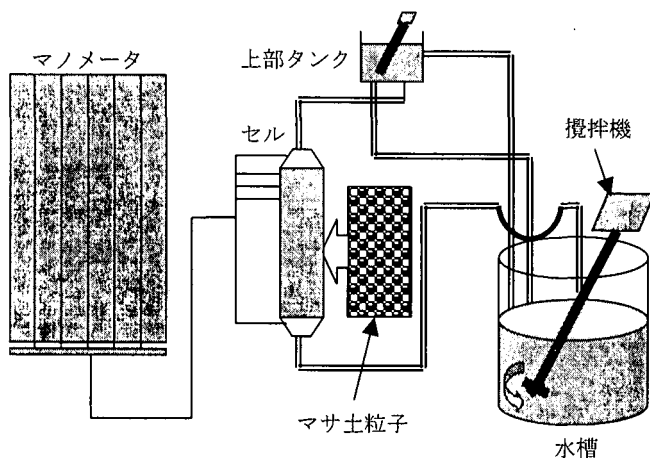
グラウト材の注入実験は、ステンレス製円筒型セル(内径 5.2cm, 長さ 69cm)に詰め込んだマサ土粒子中の一次元流れ場におけるグラウト材の注入を行うものである。今回使用した実験装置の概略図を図-1に示す。実験は、まず所定の水セメント比(水とセメントの重量比)のグラウト材を水槽内で作製し、その後、作製したグラウト材はポンプによって一定高さにある上部タンクに送られる。グラウト材は放置しておくとし、ブリーディングをおこなう。

* 正会員 (株)ニチポー 九州大学大学院博士過程 地球資源システム工学専攻

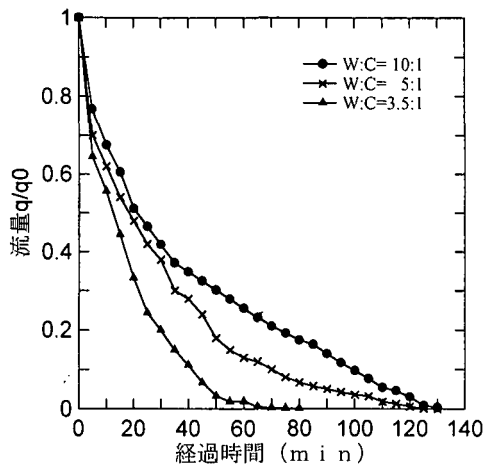
** 非会員 九州大学大学院博士過程 地球資源システム工学専攻

*** 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



図－１ 注入実験装置の概略図

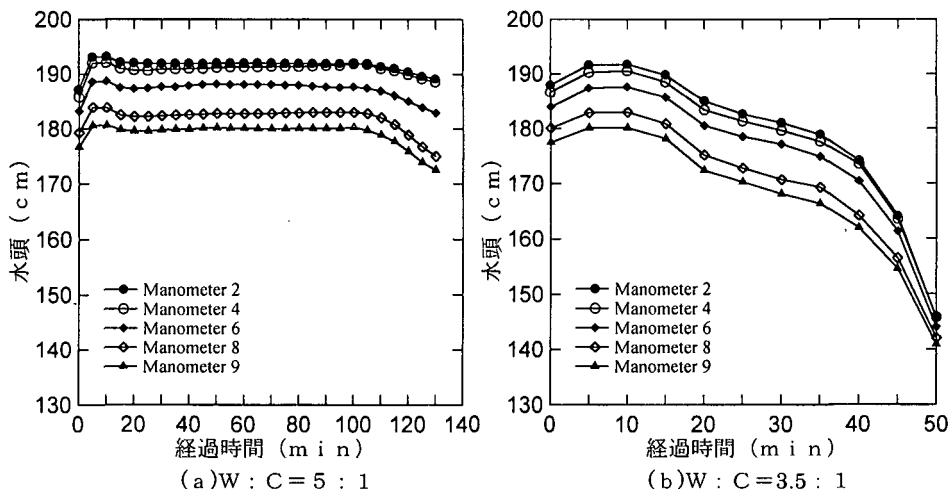


図－２ 経過時間と流量変化の関係

め、水槽内および上部タンク内で常に攪拌し、水セメント比が均一になるようにしている。上部タンクに送られたグラウト材は、その高さからセル内に流入し、セル内を通過してセル下部より水槽に戻されることになる。グラウト材がセル内を通過する際、セル内の間隙を充填することによって流量が減少していくと考えられるため、セルからの流出量をメスシリンダーにより測定する。また、グラウト材の注入状況を把握するために、セルにはマノメータを設置し、グラウト注入中のセル内の水頭変化も測定している。さらに実験終了後、セルを実験装置から取り外して、軸方向に半割することによってグラウト材の充填状況を目視観察した。なお、今回使用したマサ土粒径は 1.65～4.75mm と共通にし、水セメント比を $W:C=10:1$ 、 $5:1$ 、 $3.5:1$ の 3 種類に対して、実験を行った。また、マノメータの設置位置は注入口から 5.0, 5.5, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 11.0, 13.0, 15.0cm とし、それぞれを Manometer 2～10 と番号付けしている。

2. 2 注入実験結果

グラウト材の注入開始後の経過時間と流量変化の関係を図－２に示す。図の縦軸は各時刻における流量 q をグラウト材注入前に行った透水試験での定常時の流量 q_0 で正規化した流量 q/q_0 を示している。図より流量は水セメント比によらず、時間の経過とともに減少しているが、グラウト濃度が濃くなるにしたがって流量の低下傾向が激しくなっている。つまり、グラウト濃度が濃い場合には、短時間で流量が 0 になることを示している。次に、水セメント比 $W:C=5:1$ 、 $3.5:1$ におけるセル内水頭の経時変化図を図－３(a)，(b)に示す。図の経過時



図－３ 経過時間と水頭変化の関係

間0minにおける水頭は透水試験における定常状態での水頭を示している。図より水セメント比 $W:C=5:1$ (図-3(a))の場合には、グラウト注入中長い時間(注入開始から100minまで)、水頭は一定に保たれているが、その後水頭の低下傾向が見られる。また $W:C=3.5:1$ (図-3(b))の場合には、水頭は注入開始から10minまでは一定に保たれているが、その後急激に低下していることがわかる。これはセル入口での表層堆積によるところが大きいと考えられる。つまり、 $W:C=5:1$ の場合にはセメント粒子数が少ないため、流量がある程度大きい間はセメント粒子が表層に堆積する前に間隙の中へ浸入することができる。しかし、間隙の閉塞とともに流量が減少してくると、間隙の中へ浸入するセメント粒子数が減少するため、表層に堆積しやすくなる。その結果、水頭が低下する。また、 $W:C=3.5:1$ の場合には、 $W:C=5:1$ と比較して、セメント粒子数が多くなるため、流量が大きい間においても浸入するセメント粒子数より供給されるセメント粒子数が多いため、表層に堆積層が形成されやすくなる。このため注入開始10min後から水頭の急激な低下が起こることになる。また実験終了後、セル内の目視観察を行った結果においても表層での堆積層が確認されている。さらにマサ土試料内においても同様に目視観察を行ったところ、セメント粒子はマサ土粒子間の間隙を埋めるように存在しているということ、また注入開始直後からセル出口においてセメント粒子が流出しているということなどから考えると、今回の実験条件でのグラウト材の挙動は次のように考えることができる。つまり、グラウト材はセル内を短時間で通過し、その途中において間隙を均等に埋めていくものと考えられる。すなわち、マサ土粒子を充填したセルをフィルター材であると仮定すると、グラウト材はセルを通過することによってろ過されたと考えることができる。そこで、次節においては、定圧ろ過モデルを用いて、これらの実験結果を考察することにする。

2. 3 ろ過モデル

Hernans・Bredee⁴⁾は定圧ろ過に対して次のような一般式を提案している。

$$\frac{d^2t}{dV^2}=k\left(\frac{dt}{dV}\right)^n$$

(1)

ここで、 t ：ろ過時間、 V ：全ろ過液量である。 n はろ過様式によって異なる値であり、 k は特定のろ過様式について、ろ過条件などによって異なるろ過係数である。また、ろ過様式、つまりろ材の閉塞機構としては、表-1のように分類している。今回の実験において、セメント粒子はマサ土粒子間の間隙に比較して十分小さいと仮定すると、グラウト材がマサ土粒子間を通過することによる間隙閉塞は、標準閉塞によるものと考えることができる。そこで、今回の実験結果について表-1中の標準閉塞を表わす $t-V$ 関係を図-4に示す。図中の実線が各実験結果を標準閉塞モデルの一般式でフィッティングさせた結果である。各実験とも標準閉塞モデルで良くフィッティングされていることがわかるが、注入後半部分において一般式からのずれが生じてきている。特にグラウト濃度が濃い $W:C=3.5:1$ の場合においては、早くからずれが生じているが、これは先述したように表層堆積の形成が原因であると考えられる。なお、今回の実験におけるフィッティング結果から推定された初期ろ過量 Q_0 とろ過係数 K_s の結果を表-2に示す。

3. ろ過理論を用いたグラウト材の注入解析

3. 1 グラウト材の注入解析⁵⁾

セメント粒子がマサ土試料中の間隙に浸入し、間隙を徐々に閉塞していく過程を清澄化理論をもとに解析した。

表-1 ろ材の閉塞モデル

閉塞機構	ろ 過 様 式	n	$V=f(t)$
完全閉塞	1個の固形分粒子が1つの流路の入口で捕捉され、流路を完全に塞ぐもの	$n=2$	$V=Q_0(1-\exp(-K_b*t))$
標準閉塞	固形分が流路に浸入し、内壁に定着捕捉され、徐々に流路を塞ぐもの	$n=3/2$	$t/V=K_s/2*t+1/Q_0$
ケークろ過	ろ材表面に固形分の堆積層ができるもの	$n=0$	$t/V=K_C/2*V+1/Q_0$
中間閉塞	上記3つのどのモデルにも従わないもの	$n=1$	$K_iV=\ln(1+K_iQ_0*t)$

表-2 Q_0 と K_s の推定結果

	Q_0	K_s
$W:C=10:1$	42.205	0.00001315
$W:C=5:1$	55.078	0.00001646
$W:C=3.5:1$	56.593	0.00002982

清澄化理論とは粒状ろ層による懸濁物除去過程を表す理論であり、一次元で表すと(2)式の清澄化方程式、(3)式の連続方程式およびろ過係数を表す式から構成される。

$$\frac{\partial C}{\partial z} = -\lambda C \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} + \frac{1}{v_s} \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ここでC：セメントグラウトの体積濃度、 λ ：ろ過係数、 q ：単位体積中に拘留されたセメント粒子量、 v_s ：ろ過速度(ダルシー流速)である。また質量保存則から得られるセメント粒子の物質輸送方程式と(2)、(3)式を合わせると次式のような間隙閉塞を表す理論式が導き出される。

$$v_s \lambda C + \frac{\partial(nC)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_h \frac{\partial(nC)}{\partial z} \right) - \frac{\partial(v_s C)}{\partial z} \quad (4)$$

ここで n ：間隙率、 D_h ：分散係数である。また、間隙率の変化は、(2)、(3)式より初期間隙率 n_0 を用いて次式となる。

$$n = n_0 - \int \lambda v_s C dt \quad (5)$$

次に、セメントをベースにした懸濁型のグラウト材の浸透を考えた場合、その流動特性は、ビンガム流動を示すことが一般的に知られている⁶⁾。そこで、グラウト材の浸透を(6)式のような円筒内でのビンガム塑性方程式をもとに導出した。

$$\tau - \tau_0 = -\mu \frac{dv}{dr} \quad (6)$$

ここで τ ：せん断応力、 τ_0 ：降伏応力、 μ ：塑性粘度、 dv/dr ：速度勾配(r ：円筒中心からの距離)である。つまり、ビンガム流体では、せん断応力 τ が降伏応力 τ_0 以下になると相互に動かない部分、すなわち栓流と呼ばれる部分ができる。また(6)式と円筒の長さ Δx 間における定常流れでの力学的釣り合い式より、栓流の考えのもと円筒内での平均流速を求めると次式のようになる。

$$v_{av} = \frac{\gamma}{72\mu} e^2 \cdot d_s^2 \cdot i \left\{ 1 - \frac{4}{3} \frac{6\tau_0}{\gamma \cdot e \cdot d_s \cdot i} + \frac{1}{3} \left(\frac{6\tau_0}{\gamma \cdot e \cdot d_s \cdot i} \right)^4 \right\} \quad (7)$$

ここで i ：動水勾配、 e ：間隙比、 γ ：単位体積重量、 d_s ：マサ土粒子を球と仮定したときの粒子の直径である。また、(7)式中の右辺第3項は動水勾配が大きい場合には0に近づくので無視し、ダルシー則と同様に見かけ速度を示すと次式になる。

$$v = \frac{\gamma}{72\mu} \frac{e^3}{1+e} d_s^2 \cdot i - \frac{\tau_0}{9\mu} \frac{e^2}{1+e} d_s \quad (8)$$

従って、グラウト材による地盤間隙内への注入解析は、(4)、(5)、(8)式を組み合わせで解いていくことになる。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。なお、(4)式中の分散係数は $D_h = 0$ として解析した。

3. 2 ろ過係数、塑性粘度および降伏応力モデル

本解析における初期の間隙率およびろ過係数は、グラウト注入前、全解析領域において等しい値であると仮定する。グラウト注入に伴ってセメント粒子の拘留状態が変化してくると、ろ過係数も同様に変化してくると思

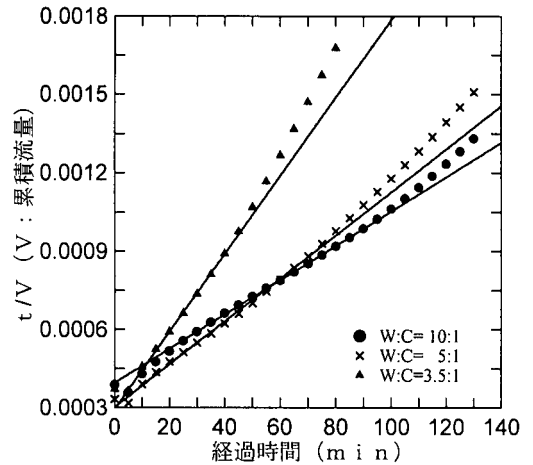


図-4 $t - t/V$ 関係

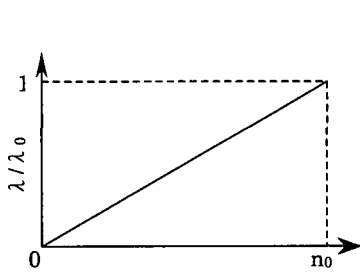
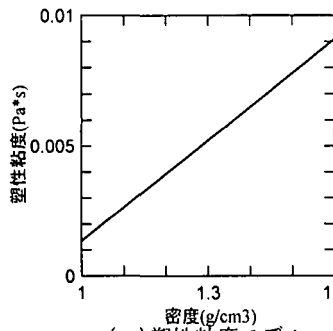
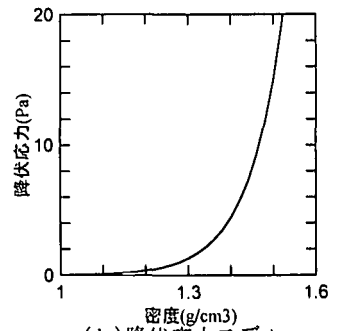


図-5 ろ過係数モデル

(λ_0 : 初期ろ過係数)



(a) 塑性粘度モデル



(b) 降伏応力モデル

図-6 塑性粘度および降伏応力モデル

られる。そこで本解析においては、図-5のような簡単なモデルを用いた。また、塑性粘度と降伏応力は柴田⁷⁾が細管内を流れるグラウト材の流動特性から求めた値を整理して、図-6(a)、(b)のような関係を用いた。

3. 3 注入解析結果

本解析手法の適用性について検討するために2章で行った注入実験を解析する。解析は各実験と条件を同じにして行った。なお、初期間隙率は試料の重量から推定し、透水性はグラウト注入を行う前に透水試験を行って把握した。また初期ろ過係数は表-2の結果を利用した。グラウト材の注入開始後の経過時間と流量変化の関係を図-7に示す。図-2の実験結果と比較すると注入開始直後の流量が大きく低下し、その後の低下傾向が緩やかになり、実験結果とは異なっている。しかしながら、グラウト濃度が濃くなるにしたがって流量低下が激しくなる傾向は一致していると考えられる。

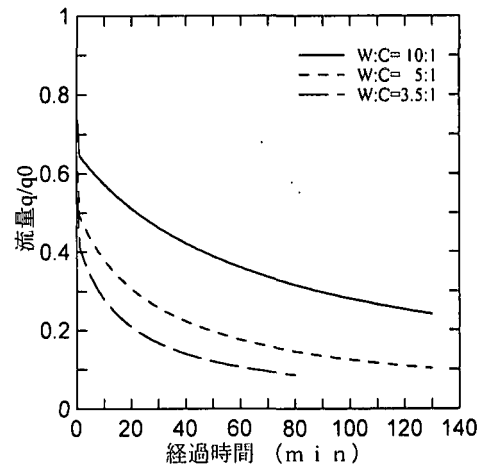


図-7 経過時間と流量変化の関係
(理論解析結果)

4. まとめ

本研究では、セメント粒子の輸送過程および空隙への充填過程を明らかにするために、マサ土試料を用いた低圧力下でのグラウト材注入実験およびろ過理論を導入した理論解析を行った。その結果を以下にまとめて示す。

- (1) セメント濃度が濃くなるにしたがって流量の低下傾向が激しくなる。
- (2) グラウト材の注入による間隙閉塞は、Hermans・Bredéeが提案する標準閉塞モデルに従が、注入が進むにつれて、このモデルからずれが生じる。この原因はセル入口における堆積層の発達であると考えられる。
- (3) 理論解析結果と実験結果とは注入開始直後に相違が見られるが、グラウト濃度による低下傾向は一致した。

参考文献

- 1) 水戸忠義, 吉川浩二, 菊地宏吉, 山田文孝: 土木学会第34回年次学術講演会概要集, pp261~265, 1996
- 2) 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
- 3) 古賀誠, 笹岡孝司, 島田英樹, 久保田士郎, 松井紀久男: 第21回西日本岩盤工学シンポジウム, pp161~166, 2000
- 4) 杉本泰治: 濾過のメカニズム, 地人書館, pp195~198, 1978
- 5) 坂口雄隆, 伊藤洋, 境信親: 熊谷組技術研究報告, 第54号, pp55~62, 1995
- 6) Hakansson, U.: Rheology of fresh cement-based grouts. Dr. Thesis, Dept. of soil and Rock Mechanics, Royal Institute of technology, Stockholm., 1993
- 7) 柴田功: 土木学会論文集, No. 453, pp107~116, 1992