

動的注入に関する室内・現場実験と グラウト充填過程モデルを用いた結果の解析

Laboratory and field experiments on dynamic grouting and its analysis based on the grout penetration model

脇田伸吾*・伊達健介*・山本拓治*・中村百合子**・水戸義忠***・青木謙治***

Shingo WAKITA, Kensuke DATE, Takuji YAMAMOTO, Yuriko NAKAMURA, Yoshitada MITO, Kenji AOKI

Dynamic grouting is a technique for grout injection by oscillating pressure added to a fixed underlying pressure. The main aim of this technique is to inject the grouts sufficiently into the fractures with small aperture. In this study, a theoretical model that explains the mechanism of grout penetration is constructed for the evaluation of the effect of dynamic grouting and the determination of the optimum specification for injection. The results of several cases of laboratory and field experiments, which show the advantage of dynamic grouting, are analyzed using the proposed model. As the result, the applicability of the proposed model is verified, and then the effect of dynamic injection is evaluated quantitatively.

Key Words: dynamic grouting, grout injection, fracture, penetration

1. はじめに

近年、石油・ガス等のエネルギー地下備蓄や高レベル放射性廃棄物処分施設などに代表されるように、岩盤地下貯蔵施設において貯蔵物質が多様化する傾向がある。そのため、遮蔽性・長期安定性といった貯蔵施設としての高度な機能が要求されており、機能向上のためには、これまでのダムやトンネルなどではグラウト注入の対象とされていなかった低透水性岩盤における微小亀裂についても、対象をひろげてシーリングを行うことが必要であると考えられる。

このような背景から筆者らは新しい注入工法として、一定の注入圧に動的な圧力を付加することにより、微細な亀裂にも高粘性・高濃度のグラウト材が注入可能である動的注入工法に着目して研究を行ってきた¹⁾。現在までに現場実験や室内実験を実施し、従来工法との比較からその有効性を確認してきている。

一方、グラウトの注入仕様やメカニズムについては十分には解明されていない部分が多く、実際の設計、施工に際しては多くの実績に基づき経験的に決定されているのが現状である。そのため、グラウト工事をより効率的かつ確実に行うために、理論に基づく体系化が強く望まれている。特に動的注入工法の注入特性については、現在のところ注入実績が少なく、対象岩盤に応じた最適な注入仕様については未確定な部分が多い。

そこで本論文では、まず岩盤亀裂内でのセメント粒子の堆積過程に着目したグラウト充填過程モデルを提案する。次に岩盤亀裂を模擬した亀裂モデルを用いて注入実験を実施し、動的注入効果について検証するとともに、実験結果に対して本解析モデルを適用する。さらに過去に実施した原位置グラウト試験結果²⁾について本モデルを適用し、実現場への適用性についても検証を行う。

* 正会員 鹿島技術研究所 地盤グループ

** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻

*** 正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻

2. 亀裂内におけるグラウト材の充填過程モデル

今回、充填メカニズムを検討するにあたり、開口幅 b の平行平板内を圧縮性流体が通過するモデルを考える³⁾。
まず、グラウト材の充填挙動を支配するパラメータの一つであると考えられるセメント粒子の沈降速度について考える。

セメント粒子の沈降力およびグラウト材の抵抗力は、それぞれ次式で与えられる。

$$F_s = \frac{\pi}{6} d_p^3 \left(\frac{\delta_p}{\delta} - 1 \right) \gamma \quad (1)$$

$$F_r = C_D \frac{\pi}{4} d_p^2 \frac{v^2}{2g} \gamma \quad (2)$$

ここで、 d_p ：セメント粒子の直径、 δ_p ：セメント粒子の比重、 δ ：水の比重、 γ ：グラウト材の単位体積重量、 C_D ：抗力係数、 v ：セメント粒子の沈降速度、 g ：重力加速度である。両者が釣り合うときの速度が沈降速度であるので次式が得られる。

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_D} g d_p \frac{\delta_p - \delta}{\delta}} \quad (3)$$

また、そのときの抗力係数（層流）は次式で与えられる。

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (4)$$

ただし、 Re はレイノルズ数であり、 μ をグラウト材の粘性係数とすると次式を得る。

$$v = 0.545 d_p^2 \frac{1}{\mu} (\delta_p - \delta) \quad (5)$$

この式は、単位時間あたりのセメント粒子の堆積量（沈降速度に比例する）はグラウト材の粘性と比重、すなわちグラウトの配合に依存することを示している。

いま、平行平板状の単一亀裂内におけるセメント粒子の堆積を考える。流れ方向の微小長さあたりの単位時間の沈降量は、亀裂内の抗力 F が粒子を拘束すると考えることによりエネルギー保存則から次式のように表せる。

$$F = \frac{1}{2} (s'(t) \Delta d \ m) u(t)^2 \quad (6)$$

ここで、 $s'(t)$ ：固有沈降速度、 Δd ：流れ方向の微小長さ、 m ：セメント粒子の質量、 $u(t)$ ：平板と平行な方向の粒子の速度（グラウト材の速度）である。

抗力 F は、時間によらず一定値をとることから

$$F = \frac{1}{2} (s'(0) \Delta d \ m) u(0)^2 \quad (7)$$

また、単位時間あたりの堆積量 $s(t) \Delta d$ は沈降量に比例し、その時刻までに通過したグラウト材の総流量に反比例すると仮定すると、比例定数 c を用いて次式を得る。

$$s(t) = c \frac{s'(0)}{\sum_{t=0}^t q(t)} \quad (8)$$

但し、 $s(t)$ は、単位時間あたりの堆積幅であり、固有堆積速度と呼ぶ。

時刻 t における亀裂内の流量 $q(t)$ と流速 $u(t)$ は 3 乗則からそれぞれ次式で与えられる。

$$q(t) = \frac{gb(t)^3}{12\nu} i \quad (9)$$

$$u(t) = \frac{q(t)}{b(t)} \quad (10)$$

ここで、 $b(t)$: 時刻 t における亀裂の開口幅、 g : 重力加速度、 ν : グラウト材の動粘性係数、 i : 動水勾配である。式(6) (7) (8)より、最終的に次式を得る。

$$s(t) = \frac{q(0)u(0)^2}{\sum_{\tau=0}^t q(\tau)u(\tau)^2} s(0) \quad (11)$$

式(11)を

$$b(t+1) = b(t) - s(t) \quad (12)$$

に代入したものをさらに式(9) (10) (11)を代入すると、 $q(t+1)$ 、 $u(t+1)$ 、 $s(t+1)$ が順々に求められる。この手順を $b(t) = 0$ となるまで繰り返すことで流量の経時変化を求めることが可能となる。

岩盤内に注入されるグラウト材の流量 $q_{RM}(t)$ は、次式のように各亀裂に注入される流量を合計することで求められる。

$$q_{RM}(t) = N \sum (f_B(b) q(b(0) = b)) \quad (13)$$

ここで、 N : 注入孔と交差する亀裂本数、 $f_B(b)$: 注入孔と交差する亀裂の開口幅分布の確率密度関数である。したがって、岩盤内における各亀裂の $b(0)$ を決定するためには、注入孔と交差する亀裂の開口幅分布が必要となる。概算のため、全ての亀裂幅が同一であると仮定すると、平均開口幅 b_M を用いた次式によって注入流量を算出することができる。

$$q_{RM}(t) = N q(t|b(0) = b_M) \quad (14)$$

3. 亀裂模型を用いた注入実験

3.1 実験装置

図-1 に注入試験システムを示す。図に示すように、注入圧力はコンプレッサーから供給される圧縮空気によって設定し、動的圧力はサーボシリンダからの振動成分が動的圧力伝達部を介して提供され、任意の周波数の動的圧力を最大 50Hz まで注入流体に加えることが可能である。またグラウト注入タンクには、実験中にブリージングが発生しセメント粒子が沈降するのを防止するため、攪拌器を設置している。

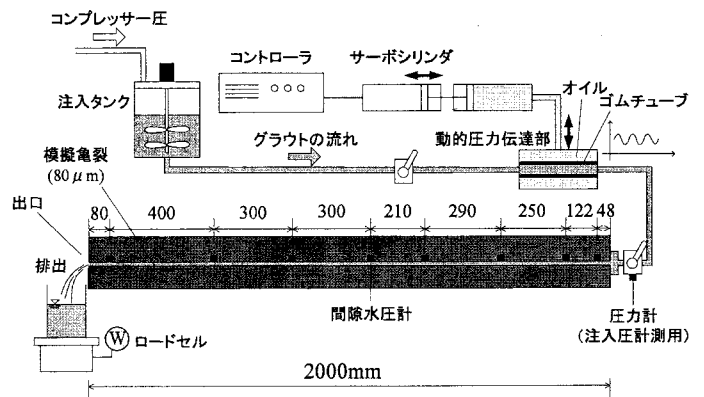


図-1 注入試験システム

亀裂模型は、2枚の鋼製ブロックの表面を鏡面仕上げしたステンレス面の間に所定の厚さの銅製スペーサーを挟み込み、任意の亀裂幅を与える仕組みとなっている。流路長は2m、幅20cmであり上部鋼製ブロックには図に示

した位置に間隙水圧計を設置した。また注入口付近にも圧力計を設置し、注入圧や動的注入時の振幅を管理し、排出口下には通過流量を測定する重量秤（ロードセル）を設置した。

3.2 実験条件

今回の実験では、水セメント比3種類（ $W/C=2, 1, 0.8$ ）の配合のグラウト材を用いて、それぞれ静的・動的注入の計6ケースを実施した。セメントについては、過去の現場実験と同様に超微粒子セメントを用いることとし、注入圧は静的注入で0.3MPa、動的注入では0.3MPaの定常圧に $\pm 0.03\text{MPa}$ 5Hzの動的圧力を付加した。今回、亀裂模型装置の亀裂幅を与えるスパーサー厚さは、 $80\mu\text{m}$ のものを使用した。

実験は所定の注入圧に設定後、計測を開始し、静的・動的注入ともグラウト材の亀裂からの排出量がなくなった時点で実験終了とした。なお、亀裂模型の亀裂幅は微細であり、模型の組み立て誤差などが実験結果に与える影響が大きい。そのため装置鋼製ブロックのネジの締め込みに関しては一定のトルク管理で行い、装置組み立て終了後には毎回透水試験を実施し、常に装置が一定の状態であることを確認している。

3.3 実験結果

6つの実験ケースの結果について、表-1に注入時間と総セメント注入量（通過量）についての結果を、図-2, 3, 4には3種類の配合での静的・動的注入における時間-注入量曲線の結果比較を示す。これらの図と表から、それぞれの配合において動的注入工法の方が、若干量ではあるが初期の単位時間注入量が増加し、また注入時間が延長されてより多くのセメント量を注入できていることがわかる。これは、動的注入効果によりグラウト材の流動性の向上と、目詰まり・閉塞の遅延効果によるのもであると考えられる。またそれぞれの配合での静的・動的注入のセメント注入量を比較すると、水セメント比が低いほど注入量の増加の割合が大きく、動的注入効果が高いことがわかる。過去に粘性流体を用いた模型実験から、動的注入効果により単位時間注入量の増加を確認²⁾してきたが、今回セメントグラウトを用いた注入実験からも、流動性の向上を確認することができた。

表-1 亀裂模型を用いた注入実験結果

	水セメント比 W/C	注入時間 [min]	総セメント 注入量 [g]
静的	2	66	314
動的		90	558
静的	1	54	240
動的		102	582
静的	0.8	51	186
動的		108	483

3.4 解析モデルの適用

今回提案するグラウト充填過程モデルを用いて、室内実験から得られた6ケースの実験結果について解析を行った。解析にあたっては、まず実験ケース毎に設定した注入条件をモデル式に代入し、次にグラウト材の物性である粘性係数ならびに固有堆積速度をパラメータとして、実験から得られた時間-注入量曲線にフィッティング

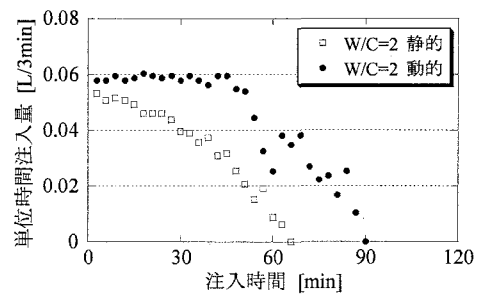


図-2 時間-注入量曲線の比較（ $W/C=2$ ）

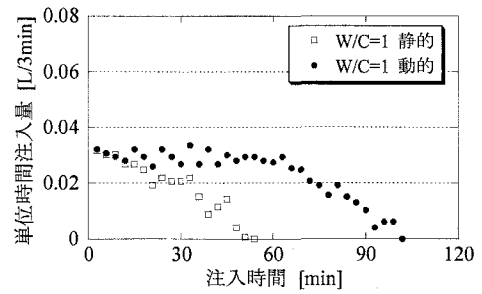


図-3 時間-注入量曲線の比較（ $W/C=1$ ）

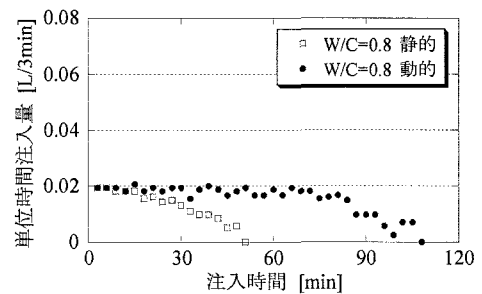


図-4 時間-注入量曲線の比較（ $W/C=0.8$ ）

させた。図-5, 6は、 $W/C=1$ の静的・動的注入のケースにおけるフィッティングの結果を示したものであり、グラウト充填過程モデルによって流量の経時変化を比較的良好に表現できていることがわかる。

また表-2は、フィッティングの結果として得られた粘性係数ならびに固有堆積速度を実験ケースごとに整理したものである。表より同一注入条件のもとでの静的注入と動的注入の値を比較すると、動的注入の方が粘性係数は低く、固有堆積速度も低いことがわかる。このことは、動的注入によってグラウト材の流動性が増加して流速が上昇するとともに拘留されにくくなる現象を定量的に表している。

表-2 室内実験6ケースにおける解析モデルの粘性係数・固有堆積速度の値

	$W/C=2$		$W/C=1$		$W/C=0.8$	
	粘性係数 μ [mPa・s]	固有堆積速度 $S(0)$ [$\mu\text{m}/\text{sec}$]	μ	$S(0)$	μ	$S(0)$
静的	1.6	1.31	3.3	1.35	4.8	1.34
動的	1.2	1.25	2.5	1.24	3.6	1.23
動的/静的	0.75	0.95	0.76	0.92	0.75	0.92

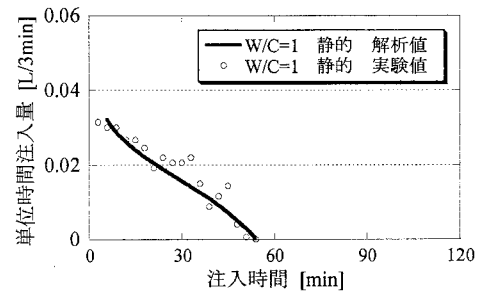


図-5 実験と解析の適合結果 ($W/C=1$ 静的)

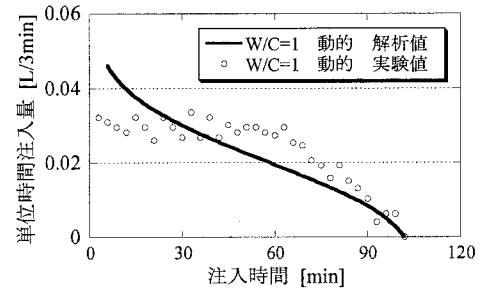


図-6 実験と解析の適合結果 ($W/C=1$ 動的)

4. 現場実験結果への解析モデルの適用

このグラウト充填過程モデルの妥当性を検証するために、過去に原位置で実施した実験結果^{2,3)}に対しても本解析モデルの適用を行った。現場実験は、中生代白亜紀の新鮮な花崗岩より構成されている岩盤に対して静的注入および動的注入を実施した。注入仕様については、注入圧力は静的・動的注入とも基準圧力を0.5MPaとし、動的注入においては振幅±0.3MPa 周波数5Hzの振動圧を付与した。またグラウト材については超微粒子セメントを使用し、水セメント比は $W/C=8,4$ の配合で実施した。

岩盤への注入流量が式(14)によって与えられるという仮定のもとで、今回提案したグラウト充填過程モデルを用いて現場実験結果のシミュレーションを行った。亀裂本数 N については、周辺岩盤のボアホールテレビ観察によって推定された亀裂密度(約3個/m)から決定した。また、平均開口幅 b_M については、水押し試験によって得られたルジオン値と亀裂密度を基に3乗則から逆算して求めた(約70 μm)。

図-7, 8, 9, 10は、それぞれ $W/C=8,4$ で静的・動的注入した計4ケースの現場実験結果に対して、解析モデルをフィッティングした結果である。図より、解析曲線は実験値に非常によく対応しており、現場実験データに対しても充填モデルの適用性が示されたものと考えられる。また、表-3にはそれぞれのケースでのフィッティング時の粘性係数ならびに固有堆積速度をまとめたものを示す。表より室内実験結果へ適用した場合と同様、

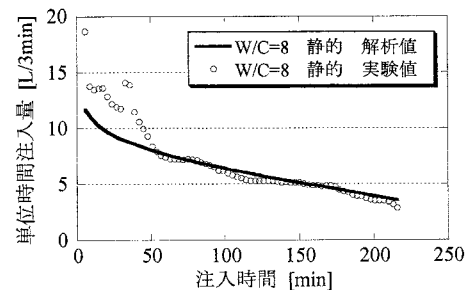


図-7 現場実験結果と解析の比較 ($W/C=8$ 静的)

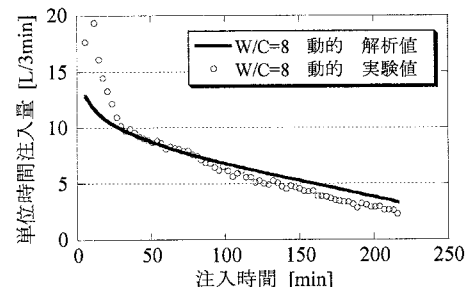


図-8 現場実験結果と解析の比較 ($W/C=8$ 動的)

動的注入効果を定量的に表せていることがわかる。また固有堆積速度の値については、注入条件が異なるため室内実験と現場実験で値が一致することはなかったが、同程度の数値となっていることがわかった。

以上より本解析モデルは現場実験結果に対しても適用が可能であり、また動的注入効果についても定量的に評価できることを確認できた。

表－3 現場実験4ケースにおける解析モデルの粘性係数・固有堆積速度の値

	W/C=8		W/C=4	
	粘性係数 μ [mPa・s]	固有堆積速度 $S(0)$ [μ m/sec]	μ	$S(0)$
静的	1.5	1.05	1.7	1.06
動的	1.2	1.02	1.4	1.04
動的/静的	0.80	0.97	0.82	0.98

5. まとめ

本研究において、まずグラウト工事における最適注入仕様の決定や注入メカニズムの理論的解明を目的に、岩盤亀裂中でのセメント粒子の堆積過程によるグラウト充填過程モデルを提案した。次に岩盤亀裂を模擬した亀裂模型を用いて注入実験を実施し、動的注入効果を確認するとともに、その実験結果に対して本解析モデルを適用した。その結果、室内実験結果における流量の経時変化を比較的良好に表現できることを確認し、また動的効果についても定量的に評価できることが確認された。さらに過去に実施した現場実験結果に対し、本解析モデルを適用した結果、現場実験結果についても非常に良好に表現できることがわかり、本モデルの有効性を確認することができた。また解析パラメータである固有堆積速度について、室内実験と現場実験における値は同程度となることが確認された。

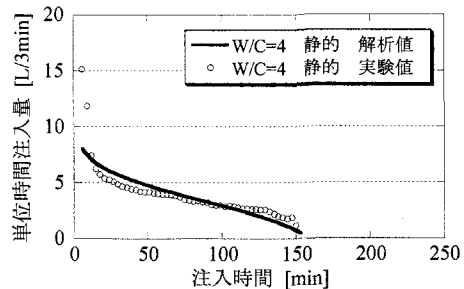
今後は、より詳細な動的注入メカニズムの解明を目的に実験および解析的な研究を進めていくとともに、最適な注入仕様の決定に向け、今回提案したグラウト充填過程モデルをベースとしてさらなる適用を図っていく所存である。

参考文献

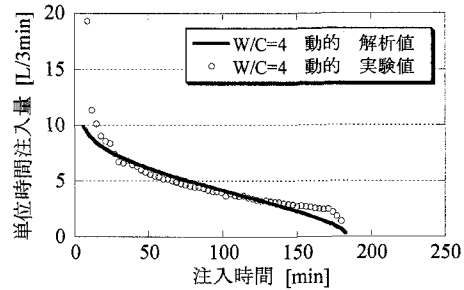
1) 山本,伊達,白井: 亀裂性岩盤を対象にした動的注入工法「ダイナプレス工法」の開発, 建設の機械化, No.630, pp.25-29, 2002

2) 脇田,伊達,山本,黒川,水戸,青木: 低透水性岩盤における動的注入工法の基礎的検討, 第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp197-202, 2003.

3) K.Aoki,Y.Mito,Y.Kurokawa,T.Yamamoto,K.Date,S.Wakita: Development of dynamic grouting technique for the improvement of low-permeable rock masses, The 1st Kyoto International Symposium on Underground Environment, pp345-352, 2003



図－9 現場実験結果と解析の比較 (W/C=4 静的)



図－10 現場実験結果と解析の比較 (W/C=4 動的)