

低透水性岩盤に対する動的注入工法の 最適注入条件の決定方法について

青木 謙治¹・水戸 義忠²・中村 百合子³・井上 祐輔⁴

¹正会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail:aoki@kumst.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³石油天然ガス金属鉱物資源機構 (〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310)

⁴京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

低透水性岩盤に対するシーリング技術として、定常圧に振動圧を付加してグラウトを岩盤亀裂内に注入・シーリングする動的注入工法を提案し、これまでにその有用性を検証すると共に、理論的検討ならびに実験的検討によって動的注入工法におけるグラウトの注入メカニズムを解明してきた。

本研究ではこの結果をベースとして、グラウトの注入量・注入時間・注入範囲を予測するための数値解析手法を構築し、これを適用することで不均質な岩盤に対する最適注入仕様（グラウトの水セメント配合比、及び注入圧力の振幅・周波数といった注入パラメータ）の決定規範を提案する。

Key Words : dynamic injection, grouting, specifications, fracture sealing, low permeable rock

1. はじめに

近年、液化石油ガスや高レベル放射性廃棄物処分施設などの岩盤地下貯蔵施設では、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いるため、低透水性岩盤にサイトを選定する必要がある¹⁾。しかしながら、これらの遮蔽性・長期安定性を十分に確保するために必要な透水性を、既存の岩盤にのぞむことは難しく、人工的にさらなる透水性の改良が要求される。

このような背景のもと、低透水性岩盤に対するシーリング技術として、定常圧に振動圧を付加し、セメントに水を混入したグラウトと呼ばれる注入材を岩盤亀裂に注入、シーリングする動的注入工法が提案されている。この工法においては、振動圧を与えることにより、グラウトの流動性の向上、及び目詰まりの抑制が期待され、現在までに原位置試験や室内実験より、その有効性が確認されている²⁾。

これまでに理論的検討ならびに実験的検討によって動的注入工法におけるグラウトの注入メカニズムを解明してきたが、本研究ではこの結果をベースとして、グラウトの注入量・注入時間・注入範囲を予測するための数値解析手法を構築し、これを適用することで不均質な岩盤に対する最適注入仕様を決定する方法を提案する。

2 グラウト充填過程のモデル化

グラウト材を注入する際、セメント粒子が沈降し、堆積することにより開口幅が減少し、最終的に目詰まりが生じると考えられる。そこで今回、平行平板状の亀裂を想定し、セメント粒子の充填過程をモデル化する。

グラウト材は、図-1のようにボーリング坑から亀裂面に対し、放射状の流れを形成すると考えられる。

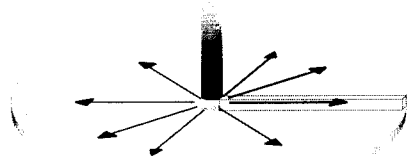


図-1 グラウト材の流れ

ここでは、まず単一亀裂におけるグラウトの充填過程を1次元流れでモデル化した後に、そのモデルを拡張して放射状流れでモデル化する。さらに、ボーリング孔と交差する亀裂の数及びその平均幅を用いて、このモデルを実際の岩盤へ適用する方法を示す。

(1) 1次元流れ

時刻 t における流れ方向の微小長さ Δd あたりの単位時間あたりの沈降量 $s(t)$ は、亀裂内の抗力 $F(t)$ が粒子を拘束すると考えると、エネルギー保存則から次式のように表すことができる。

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

ここで m : セメント粒子の質量である。また、抗力 $F(t)$ は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。

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

ここで F : 固有亀裂内抗力である。また、単位時間あたりの堆積幅 $s(t)$ は沈降量 $s(t)$ に比例すると仮定すると、比例定数 $\alpha (0 < \alpha < 1)$ を用いて次式を得る。

$$s(t)\Delta d = cs'(t)\Delta t\Delta d \quad (3)$$

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

$$q(t) = \frac{gb(t)^3}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4)$$

$$u(t) = \frac{q(t)}{b(t)} \quad (5)$$

ここで、 $b(t)$: 時刻 t における亀裂の開口幅、 ν : 動粘性係数 $\partial P / \partial x$: 圧力勾配である。また、動粘性係数は、振動圧によるグラウトの見かけ粘性の低減効果を考慮した値とした。式(1)(2)(3)より、最終的に次式を得る。

$$s(t) = \frac{q(0)u(0)^2}{\sum_{\tau=0}^t q(\tau)u(\tau)^2} s(0) \quad (6)$$

ここで、 $s(0)$: 固有堆積速度である。式(6)を

$$b(t+1) = b(t) - s(t)\Delta t \quad (7)$$

に代入したものをさらに式(4)(5)(6)に代入すると、 $q(t+1)$ 、 $u(t+1)$ 、 $s(t+1)$ 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単位時間あたりの流量が順に算出され、流量の経時変化を得ることが可能となる。

(2) 放射状流れ

(1) で構築した1次元流れの式を、放射状流れに拡張する。まず図2のように、円筒座標系 X - R - θ 軸を設定する。

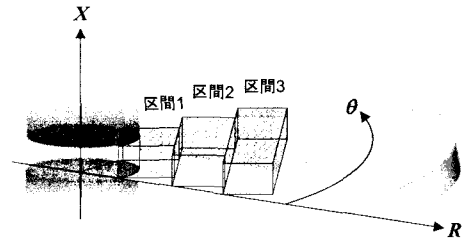


図-2 放射状流れのモデル

放射状流れを考える上で、はじめに図-2のように、 $\Delta\theta$ の範囲において、浸透距離に応じて亀裂奥行きを変化させるモデルを考え、それを360度積分することで放射状流れをモデル化する。(1)で構築したモデルは、 R 方向の単一微小区間を考えたものである。この微小区間モデルを、単位時間の浸透距離毎に設定し、各区間のグラウト充填過程を把握し、それぞれを θ 方向に360度積分することで、グラウトの空間的な充填挙動を得る。各区間を、区間 $\xi (\xi=1,2,3, \dots)$ とする。

a) 単位時間 $\Delta t=1$ における挙動

以後、 $()$ 内の値を時刻とし、添え字で区間を表す。図-3は図-2を上から見た図である。図中にある、区間1における θ 方向の奥行き L_1 は、

$$L_1 = \sqrt{2R^2(1 - \cos \Delta\theta)} \quad (8)$$

として求まる。ここで、 R : ポーリング孔半径である。単位時刻 $t=1$ における流量 $q_1(1)$ 、流速 $u_1(1)$ 、セメント粒子の堆積速度 $s_1(1)$ は、式(4)(5)(6)より、各々

$$q_1(1) = \frac{gb_0^3}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_1} L_1 \quad (9)$$

$$u_1(1) = \frac{q_1(1)}{b_0 L_1} \quad (10)$$

$$s_1(1) = \frac{q_1(1)u_1(1)^2}{\sum_{\tau=1}^1 q_1(\tau)u_1(\tau)^2} s' \quad (11)$$

となる。ここで、 b_0 : 亀裂幅である。

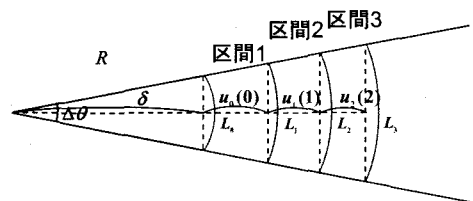


図-3 放射状流れモデル（流れの垂直方向からの視点）

b) 単位時間 $t=2$ における挙動

時刻 $t=2$ における浸透距離 z は,

$$x_2 = x_1 + u_1(1) \quad (12)$$

として得られる。時刻 $t=2$ における区間 1 の開口幅は、式(7)より

$$b_1(2) = b_0 - s_1(1)\Delta t \quad (13)$$

と得られることから、式(4) (13)より、単位時刻 $t=2$ における流量 $q_1(2)$ は、

$$q_1(2) = \frac{gb_1(2)^3}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_2} L_1 \quad (14)$$

流速 $u_1(2)$ 、セメント粒子の堆積速度 $s_1(2)$ は、各々

$$u_1(2) = \frac{q_1(2)}{b_1(2)L_1} \quad (15)$$

$$s_1(2) = \frac{q_1(1)u_1(1)^2}{\sum_{\tau=1}^2 q_1(\tau)u_1(\tau)^2} s' \quad (16)$$

と決定される。次に、区間 2 における奥行き L_2 については図-3 より

$$L_2 = \frac{L_1(\delta + u_1(1))}{\delta} \quad (17)$$

ここで、単位時刻 $t=2$ において、区間 1 の流量は、区間 2 の流量と一致することから、

$$q_2(2) = q_1(2) \quad (18)$$

式(5)より時刻 $t=2$ における区間 2 の流量 $q_2(2)$ と流速 $u_2(2)$ の関係より、

$$u_2(\xi) = \frac{q_2(2)}{b_0 L_2} \quad (19)$$

を得て、式(17)(18)(19)より、時刻 $t=2$ における区間 2 の流速 $u_2(2)$ を決定する。また、式(6) (18) (19)より、時刻 $t=2$ における区間 2 のセメント堆積速度 $s_2(2)$ を求める。

$$s_2(2) = \frac{q_2(2)u_2(2)^2}{\sum_{\tau=2}^2 q_2(\tau)u_2(\tau)^2} s' \quad (20)$$

c) 単位時間 $t=t$ における挙動

以上、同様の計算を繰り返すことにより、単位時刻 $t=t$ における区間 1 の流量 $q_1(t)$ 、流速 $u_1(t)$ 、セメント堆積速度 $s_1(t)$ 、開口幅 $b_1(t)$ は、

$$q_1(t) = \frac{gb_1(t)^3}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_1} L_1 \quad (21)$$

$$u_1(t) = \frac{q_1(t)}{b_1(t)L_1} \quad (22)$$

$$s_1(t) = \frac{q_1(1)u_1(1)^2}{\sum_{\tau=1}^t q_1(\tau)u_1(\tau)^2} s' \quad (23)$$

$$b_1(t) = b_1(t-1) - s_1(t-1)\Delta t \quad (24)$$

区間 ξ ($\xi \geq 2$)の奥行き、単位時刻 $t=\xi$ における流量 $q_\xi(\xi)$ 、流速 $u_\xi(\xi)$ 、セメント堆積速度 $s_\xi(\xi)$ は、各々

$$L_\xi = \frac{L_1(\delta + \sum_{k=1}^{\xi} u_k(k))}{\delta} \quad (25)$$

$$q_\xi(\xi) = q_1(\xi) \quad (26)$$

$$u_\xi(\xi) = \frac{q_\xi(\xi)}{b_0 L_\xi} \quad (27)$$

$$s_\xi(\xi) = \frac{q_\xi(\xi)u_\xi(\xi)^2}{\sum_{\tau=\xi}^{\xi} q_\xi(\tau)u_\xi(\tau)^2} s' \quad (28)$$

単位時刻 $t=\xi+1$ における流量 $q_\xi(t)$ 、流速 $u_\xi(t)$ 、セメント堆積速度 $s_\xi(t)$ は、

$$q_\xi(t) = \frac{gb_\xi(t)^3}{12\nu} \frac{\partial P}{\partial x_t} L_\xi \quad (29)$$

$$u_\xi(t) = \frac{q_\xi(t)}{b_\xi(t)L_\xi} \quad (30)$$

$$s_\xi(t) = \frac{q_\xi(\xi)u_\xi(\xi)^2}{\sum_{\tau=\xi}^t q_\xi(\tau)u_\xi(\tau)^2} s' \quad (31)$$

$$b_\xi(t) = b_\xi(t-1) - s_\xi(t-1)\Delta t \quad (32)$$

として決定される。

式(21) (29)を θ 方向に 360 度積分することにより、各区間 ξ における放射状流れの流量 $Q_\xi(\theta)$ を求める。 $(\xi=1,2,3,)$

$$Q_{\xi}(t) = \sum_{\theta=0}^{360} q_{\xi} \quad (33)$$

また、式(24) (32)より、 $b_i(t=0)$ をとる単位時刻 t における各区間の亀裂の開口幅 $b_{\xi}(t)$ を用いて、最終的な透水性改良範囲分布を得ることが可能である。

(3) 岩盤への適用

岩盤内においては、亀裂が複数存在するため、現場実験において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。

$$Q_{RM}(t) = N \sum (f_b(b) Q_i(t | b_0 = b)) \quad (34)$$

ここで、 N : 注入孔と交差する亀裂数、 $f_b(b)$: 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 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、平均亀裂幅 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。

$$Q_{RM}(t) = N \sum (f_b(b) Q_i(t | b_0 = b_M)) \quad (35)$$

式(35)を用いるにあたり、亀裂本数 N と平均亀裂幅 b_M が必要となる。以下に亀裂本数・平均亀裂幅を現場試験によって得られるルジオン値から算出する手順について提案する。

今回対象とするサイト¹⁾では、過去に数多くの透水試験が行われている。報告によれば、岩盤の透水係数は亀裂の本数に支配的に影響されるものと考えられ、透水係数 K と亀裂本数 N の関係が次のように求められている³⁾。

$$N = 35.0 + 4.33 \log(K) \quad (36)$$

また、ルジオン試験においてダルシーの法則が成立すると仮定すると、ルジオン値 Lu と透水係数 K の関係は、式(37)の関係で求めることが可能である。

$$K = \frac{Lu}{120000\pi HL} \ln \frac{L}{r} \quad (37)$$

以上、式(36) (37)より、ルジオン値から亀裂本数を決定する。

一方、亀裂幅については、一般に亀裂の透水係数と関係があり、また平行平板を仮定した亀裂の透水係数は3乗則に従うことが知られている。そこで、式(3d)から得た透水係数を式(36) (37)から決定した亀裂本数で除することにより、単一亀裂の平均透水係数を算出し、さらに流量の3乗則から逆算して平均的な亀裂幅を求める。

図-4 はルジオン値と平均的な亀裂幅の関係を表したものである。式(35) (36) (37)より、注入量 $Q_{RM}(t)$ を求め、この各単位時刻の値を用いて、現場の状況を評価する上で重要な注入量の経時変化を表した理論曲線を得る。

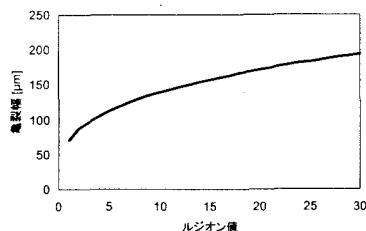


図-4 ルジオン値と亀裂幅の関係

3. 現場実験

2で提案した数値解析手法の妥当性を検討するために、原位置で実施した試験結果¹⁾に対して、本解析モデルの適用を行った。原位置試験では、中生代白亜紀の新鮮な花崗岩より構成されている岩盤を対象として静的注入および動的注入を実施した。試験における注入仕様を表-1に示す。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 $w/c=4.8$ で注入を行った。

図-5、図-6 は、それぞれ $w/c=4.8$ において、静的および動的注入したケースの原位置試験と数値解析結果を比較したものである。図より、数値解析結果は実測値と非常によく対応しており、本モデルの適応性が示されたものと考えられる。

表-1 現場実験条件

水セメント配合比		実施回数	注入圧力 [MPa]	振動圧周波数 [Hz]
4	動的注入	2	0.5 ± 0.3	5
	静的注入	4	0.5	0
8	動的注入	6	0.5 ± 0.3	5
	静的注入	7	0.5	0

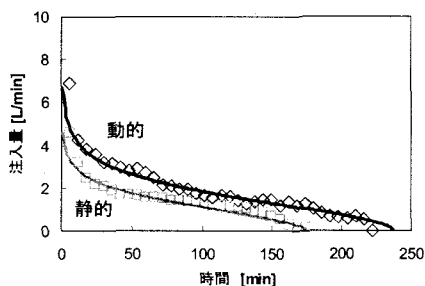


図-5 現場実験結果(点)と解析結果(曲線)の比較 $w/c=4$

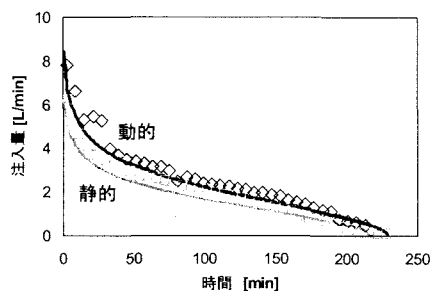


図-6 現場実験結果（点）と解析結果（曲線）の比較 $w/c=8$

4. 数値シミュレーションによる最適注入仕様の決定

現場実験を通じた検討により、本研究で提案したグラウトの充填過程モデルの妥当性を検証することができた。ここでは、このモデルを用いて、対象岩盤に応じた最適注入仕様を決定する方法を示す。手順は以下の通りである。

- 1) 対象岩盤のルジオン値より、亀裂本数・平均亀裂幅を推定する。
- 2) 注入パラメータより、グラウト充填挙動を支配するパラメータである見かけ粘性及び固有堆積速度を決定する。
- 3) 得られたパラメータを提案したグラウト充填過程モデルに代入してシミュレーションを行うことで、流量及び開口幅の経時変化を得る。これより注入仕様の性能の評価指標として次の3つの値を求める。

【セメント総注入量】

亀裂に注入されたセメントの総量

【注入効率】

単位時間あたりの平均セメント注入量

【透水性改良範囲】

亀裂幅が規定値まで改良された範囲

今回、シミュレーションの一例として、注入圧を固定した上で、最適な水セメント配合比を検討したケースを示す。表-2に、設定した注入圧のパラメータを示す。セメント配合比をパラメータとして各亀裂幅の総セメント注入量を求めたものを図-7に、注入効率を求めたものを図-8、透水性改良範囲を求めたものを図-9に示す。これらの図には、参考までに静的注入の場合の予測値も示してある。これらの図より、今回のシミュレーションケースにおいては、水セメント配合比 $w/c=2, 4$ が最適であるという結果を得ることができる。

表-2 シミュレーションにおいて設定した注入圧

亀裂幅 [μm]	注入方法	注入圧力 [MPa]	振動圧周波数 [Hz]
80	動的注入	0.5 ± 0.3	5
	静的注入	0.5	0

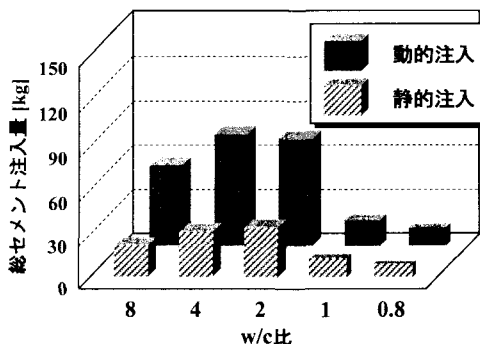


図-7 w/c と総セメント注入量の関係

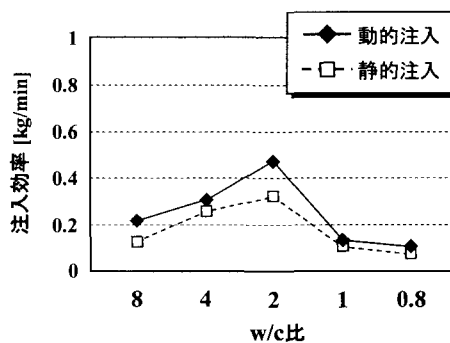


図-8 w/c と注入効率の関係

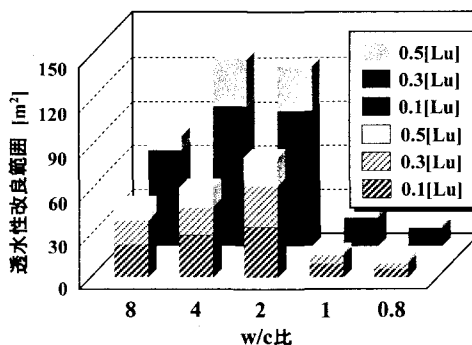


図-9 w/c と透水性改良範囲の関係

5. まとめ

本研究においては、低透水性岩盤の微小亀裂を対象とするフラクチャーシーリングに有効と考えられる、動的注入工法に対して、グラウト充填過程をモデル化することによって、合理的な注入仕様を決定する方法の提案を行った。

まず、亀裂内においてセメント粒子が堆積することによって亀裂の開口幅が変化し、亀裂を通過するグラウト材の流量・流速・堆積速度が逐次変化するといった現象のモデル化を行い、グラウト充填過程を数値的に解析する手法を構築し、低透水性の花崗岩を対象とした現場グラウト注入実験結果よりその有効性を確認した。

次に、グラウトの注入量・注入時間・注入範囲を予測することによって注入仕様を合理的に決定する手順を示した。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ, JNC TN1400 99-022, 1999
- 2) 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, 2002, 8
- 3) Lennart Börjesson : Rheological properties of cement and bentonite grouts with special reference to the use of dynamic injection Grouting in Rock and Concrete Widmann 1993 P3-11
- 4) 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12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集,2002.1

APPLICATION OF DYNAMIC INJECTION TECHNIQUE FOR LOW-PERMEABLE ROCK MASSES

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Yuriko NAKAMURA, Yusuke INOUE

Dynamic injection technique is a method to efficiently inject grouting material into micro-fractures in low permeable rock masses. In this study, numerical model that represents the mechanism of grout filling is constructed for the determination of the specifications such as type of grout material, w/c ratio of suspension, amplitude and frequency of oscillating pressure. As the result, the applicability of the proposed model is verified from the results of several cases of field tests, and the methodology to determine the best specifications for dynamic injection is shown.