

グラウト動的注入法の メカニズムに関する基礎的検討

村上 麻優子^{1*}・川端 淳一¹・藤澤 惣¹・山本 拓治¹

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 岩盤・地下水グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

*E-mail: someya@kajima.com

岩盤亀裂を対象としたより効率的な注入工法として動的注入法がある。動的注入法は、注入圧を正弦波状で与えて注入材に脈動を起し、一定圧で注入するよりも効率的に注入することができるというものがある。著者らもこれまで室内実験および現場実験にてその効果を確認し、実際の現場にも適用してきた。本研究では必ずしも明らかになっていない動的注入法のメカニズムを明らかにすることを目的として、実験的研究を行ったものである。実験では岩盤亀裂を最も簡単な一次元でモデル化し、さらにセメント系グラウト等を模擬した擬塑性流体を実注入と同等のレイノルズ数で注入した。本論文ではこれらの結果及び動的注入のメカニズムについて述べた。

Key Words : grouting, dynamic injection method, base rock crack, tube model, viscous fluid

1. はじめに

亀裂性岩盤へのグラウト注入は、定圧または定流量管理により行い、注入仕様は仕様規定や現場の経験則より決定されているのが現状である。動的注入工法は注入圧に正弦波を与える工法であり、著者らは既に、現場試験及び室内試験を実施している^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}他、現場でも適用している。しかしながら、動的注入のメカニズムについては種々の説明がなされてはいるものの、必ずしもそれらが立証されているわけではなく、今後動的注入工法をより合理的な手法として位置づけ適用していくためには、メカニズムの明確化とそれに基づく確かな注入仕様の決定方法を確認することが必要である。本研究では動的注入について、基礎的な実験を行うことによりそのメカニズムを明らかにし、本手法において効果的な仕様の決定に資することを目的としたものである。

2. 本研究の目的

(1) 既往の研究

岩盤亀裂を対象とした動的注入については、著者ら^{7), 8), 9), 10), 11), 12), 13)}の研究があり、これら研究では様々な実験から、動的注入仕様として、周波数5~10Hz程度の周波数で正弦波状に圧力を与えることが最適であるとの知見が報告されている。また、これらの研究において動的注入のメカニズムとして以下のような説明がなされている。

a) 流体の見掛け粘度の低下

グラウトのような高粘性流体では、ずり速度が大きくなると、見掛け粘度は低下（擬塑性流体）する場合があることが判っているが、動的注入工法により圧力脈動を与えることで、見掛け粘度がより低下し流動性が向上する現象が起こる。ただし、高い振動数の脈動を与えると、動的効果が低減する。

b) 粒子堆積の軽減

動的注入工法によりグラウトに振動を与えることで、グラウトの中に含まれる粒子による目詰まりが発生しにくくなる。実際に、模型試験で排出されたグラウト密度から、注入されたグラウトの平均的配合を算出すると、元配合がW/C=2の場合、静的注入でW/C=3~10、動的注入でW/C=2.3~2.5と、静的注入の方が、より多くのセメント粒子が亀裂内に堆積したという報告がある。

c) 目詰まりの解消

セメント粒子の目詰まりにより一旦閉塞した亀裂内部において、注入圧の脈動効果によりセメント粒子が再度移動し、流動性が向上する。実際に、注入前3.9Luのサイトに対して、静的注入で目詰まりするまで注入を行った後、動的注入を行った結果、再度注入が可能となるという結果が得られている（図-1参照）。

(2) 既往の研究より不明確な点

既往の研究結果を踏まえて、明確になっていない点および検討が必要と考えられる点を以下に挙げる。

a) メカニズムと注入パラメータの関係

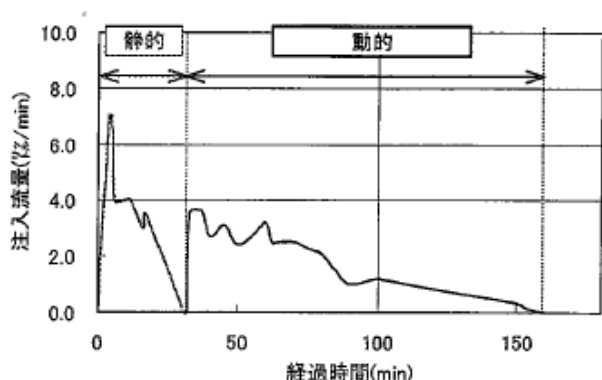


図-1 目詰まり解消例¹⁾

先に示した通り、動的注入のメカニズムに関しては、流体の見掛け粘度の低下・粒子堆積の軽減・目詰まりの解消が既往の研究から確認・予測されているが、これらのメカニズムが実際の注入特性に支配的であるかどうかについては必ずしも立証されているわけではなく、周波数・注入圧の振幅等の注入パラメータとの関係は明確ではない。

b) 改良範囲の差

改良範囲に関しては、圧力脈動が注入孔からの距離に比例して低減すると考えられるが、動的と静的注入の改良範囲の差については明確にされていない。

c) 目詰まりの解消効果

静的注入により目詰まりした亀裂に対して、どのような仕様の動的注入を行えば解消効果があるか等については知見がない。

(3) 検討内容と目的

以上より、本研究ではまず2. (2) a) に挙げたメカニズムが実際の動的注入において機能しているかについて立証し、より効率のよい注入パラメータを検討する。これにより、将来的には従来のような経験則による注入パラメータの決定方法ではなく、対象とする岩盤・材料種類から自動的にパラメータを決定できることを目標とする。

3. 注入実験概要

動的注入のメカニズムと注入パラメータの関係を明確にするため、以下の実験を行った。

(1) 条件設定

a) 実験モデル

従来のような平行平板モデルは、岩盤の亀裂状態を亀裂幅について模擬できるというメリットがあり、その流れの次元は2次元となる。しかしながら、実験技術として亀裂幅を均一にすることが困難であり、亀裂の流路長と流下幅の2つのパラメータが実験結果に影響する。そこで、本実験では注入対象のパラメータを1つとして、よりわかりやすく評価することを目的として、また実際にも1次元の亀裂は存在するであろうことを想定して、1次元チューブモデルを注入対象とする実験を行うこととした。

b) 注入材料

一般的に亀裂性岩盤に対する注入で最も多く使われるのは、セメント系グラウトであるが、本実験では2. (3) で挙げた目的に絞った実験、すなわち流体の粘度特性が動的注入に与える影響を検討することを利用して、グラウト材料を模擬した溶液状の粘性流体を主として用いることとした。

c) 測定項目

本実験では圧力、周波数、流体の粘性をパラメータとした定圧注入（動的注入の場合は正弦波の設定圧力）を実施し、その流量を測定した。さらに、注入時の圧力がチューブ内で下流側方向にどのように伝播しているかを定量的に捉えるため、チューブ内の一定間隔毎に圧力センサを設置し、計測を行った。

(2) セメント系グラウトの流体特性について

3. (1) b) で粘性流体を用いることとしたが、基本的なグラウトの流体としての粘度特性を調べるため、一般的な粘性試験を精密に行うことが可能な、レオメータ（デジタル粘度計）を用いて測定した。

a) セメント系グラウトの流体特性

まず、亀裂性岩盤に最も多く使われるセメント系グラウトの流体特性を検討した。使用した材料は普通ポルトランドセメントで、水セメント比1, 1.5, 2, 4について、複数の回転数における抵抗値を測定した。測定状況を写真-1、代表的なケースとして、W/C=1のケースの計測結果を図-2に示す。



写真-1 レオメータ粘性試験状況

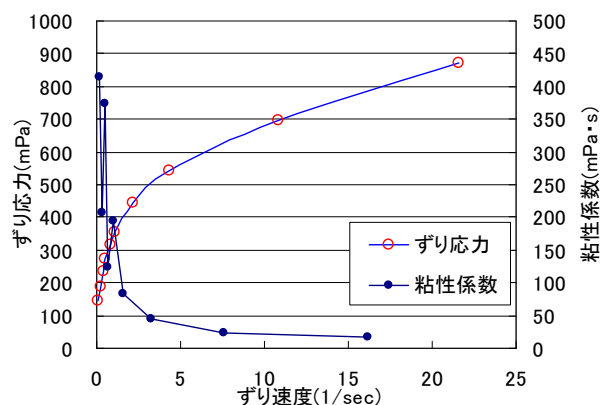


図-2 セメント系グラウトの粘性試験結果
(水セメント比1の場合)

図-2の結果より、グラウト材料はずり速度が上昇するに従って粘性係数が低下する擬塑性流体であることがわかる。セメント系グラウトの流体特性はニュートン性流体として注入特性が評価される場合もある、しかしながら動的注入の特性を捉える上では、動的注入時に受ける小さいずり速度領域も支配的に考慮して、流体の粘度特性を捉える必要がある。

b) 粘性流体の選定

本実験では、図-2の結果をもとに、セメント系グラウトを擬塑性流体と仮定し、水溶性のポリアクリル酸ナトリウム（以降、SAP）を選定した。また、実験では動的注入効果の比較のため、ニュートン性流体として低濃度SAPとセルロースを選定した。

(3) 実験条件の設定

注入実験では、チューブ内に粘性流体を流す際、実際の亀裂性岩盤にセメント系グラウトを注入した場合と同等の流れを想定することを考えた。そこで、想定される亀裂性岩盤に対して、セメント系グラウトを注入した場合のレイノルズ数（以下、Re数）を想定し、それと同等のRe数となるチューブ径と粘性流体の濃度の組合せを考慮した実験条件下で実験を行うこととした。

a) 目標Re数

想定される亀裂のRe数については以下のように設定した。割れ目の透水量係数を $10^{-6} \sim 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 程度¹⁴⁾。割れ目長は一般的なグラウトの改良範囲は2～5m程度と考えられるため3m程度と設定した。また、グラウト材としてW/C=4のセメント系グラウトと設定して粘性試験結果を適用した。

以上の条件より、まず亀裂の三乗則を用いて、式(1)より亀裂幅、式(2)より透水係数、またダルシー則が成り立つと仮定し、式(3)よりRe数を求める。

$$T = \frac{\rho g}{12\mu} b^3 \quad (1)$$

$$K = \frac{T}{b} \quad (2)$$

$$\text{Re} = \frac{Vb}{\nu} \quad (3)$$

T ：透水量係数($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、 K ：透水係数(m/s)、 Re ：レイノルズ数、 ρ ：流体密度(kg/m^3)、 b ：亀裂幅(m)、 μ ：静粘性係数($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、 ν ：静粘性係数($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 V ：代表速さ

本実験で目標とする透水量係数 $10^{-6} \sim 10^{-10} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 程度に相当するRe数は、式(1)(2)(3)により $10^{-2} \sim 10^{-6}$ 程度であると想定された。

b) 詳細条件

実験で用いるチューブ径は、実験が可能な最小径を用いた。また、粘性流体を流した場合のRe数は実測の流速値から求められるため、予め実験で使用する材料濃度を決定し、計測を行った。表-2は詳細条件一覧、写真-2は実施状況である。

表-2 詳細条件一覧

粘性流体	擬塑性流体	SAP 0.5%,0.7%,0.8%,1.0%
	ニュートン性流体	SAP 0.04% セルロース3.0%,4.0%
チューブ	直径	2mm
	長さ	8m
注入圧	基準注入圧	0.05MPa～0.5MPa
	動的注入周波数	0.0Hz(静的),0.5Hz,5.0Hz,10.0Hz
	動的注入振幅	脈動発生装置の稼動領域5mmに設定→圧力振幅はケースにより異なる
測定項目	流量	流出時の流量を測定
	圧力	チューブに1m毎で圧力センサを設置し測定



写真-2 注入実験状況

4. 実験結果

(1) 擬塑性流体と動的注入へ与える影響

本実験により明確になった、動的注入のメカニズムについて以下に述べる。

図-3はSAP0.7%の場合の基準注入圧に対する流量を示したグラフである。これより、静的・動的に関わらず、基準注入圧が上昇する、つまりチューブ内のずり速度が上昇すると、流量が二次曲線的に上昇することがわかる。これに対し、図-4はセルロース3.0%の場合のグラフであるが、基準注入圧に対する流量は直線的に増加していることがわかる。つまり、擬塑性流体であるSAPは、圧力の上昇（ずり速度の上昇）と共に粘性係数が低下し、流量が増加したと考えられる。

また、図-3では静的注入と比較し、動的注入の流量が増加しているのに対し、図-4では両者はほぼ等しい結果であった。また、実際の注入結果より得られた、SAP0.7%における壁面ずり速度に対する粘性係数を図-5に示した。図-2に示した擬塑性流体の傾向を示していることが明らかとなった。

さらに、各々の結果に着目すると、静的注入の粘性係数は最も低下した時点で75.2($\text{mPa} \cdot \text{s}$)であるのに対し、動的注入周波数10Hzの粘性係数は最も低下した時点で41.2($\text{mPa} \cdot \text{s}$)であった。つまり、動的注入により粘性係数がより低下したために、流量が増加したと考えられる。以上より、動的注入による流量の増加は、流体の擬塑性が支配的な要因となっていることが明らかになった。

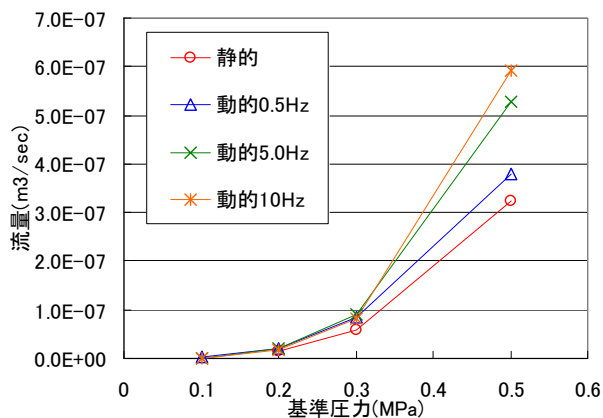


図-3 基準注入圧に対する流量 (SAP0.7%)

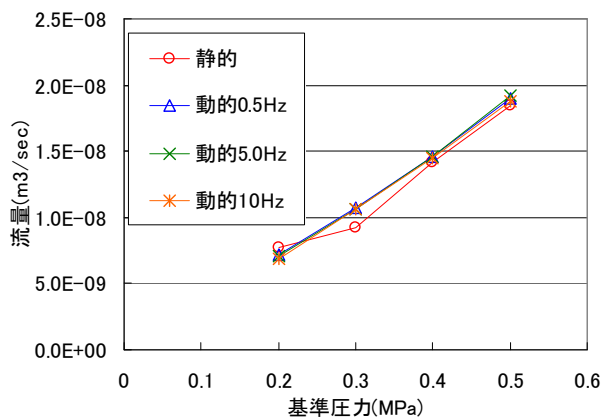


図-4 基準注入圧に対する流量 (セルロース3.0%)

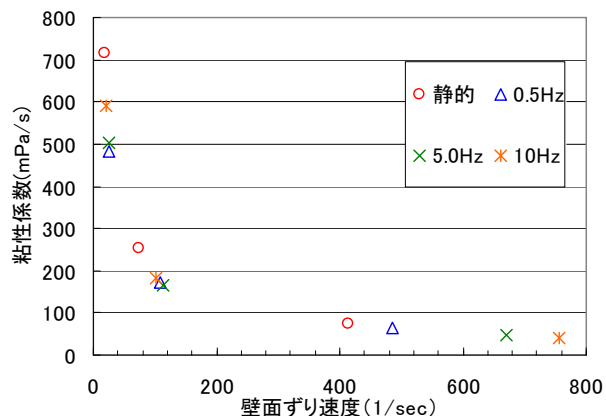


図-5 注入時のずり速度に対する粘性係数

(2) 動的注入特性

(1)において、擬塑性流体による粘性係数の低下現象が、動的注入の効果をもたらすことを述べた。2. (1)に示した通り、既往の研究では5～10Hzが最適な周波数であるとされていたが、ここでは、(1)の結果を踏まえた上で、周波数と動的注入効果の関係を検討した。

図-6は今回実施したSAP全ケースの、周波数に対する流量（同条件の静的注入時流量に対する割合、以降「流量」と示す）を表したグラフである。これより、各濃度における特徴を以下に列挙する。

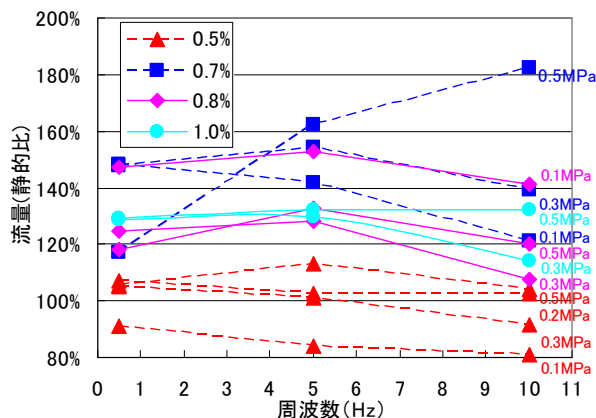


図-6 SAP全ケースにおける周波数に対する流量（静的注入時流量に対する割合）

- ・ 流量は今回のチューブを用いた場合、0.5%＜0.8%＜1.0%＜0.7%であった。ただし、チューブ径が異なる（亀裂条件が異なる）場合には、流量と濃度の関係は異なる。
- ・ 0.5%濃度では、周波数0.5Hzの場合に最大流量となるケースが多かった。また、半数は静的注入よりも流量が小さかった。
- ・ 0.8%および1.0%濃度では、周波数5.0Hzの場合に最大流量となるケースが多かった。
- ・ 0.7%濃度では、最大流量となる周波数は注入圧力により異なっていた。

以上より、流体の粘性が低い場合には動的の効果は小さく、ある程度の粘性を持つ擬塑性流体にのみ動的効果が現れる。流体の粘性が高まり動的注入効果が現れると、動的注入に効果的な周波数は高まるように見えるが、実験範囲内の最大の粘性を持つ流体ではかえって動的効果は小さくなった。最適な周波数は設定圧力や亀裂の大きさにも影響を受け変動すること。等がわかった。本試験では、3種の周波数について検討したが、より多くの周波数を検討する必要がある。

(3) 収束圧力と流量の関係について

ここでは1m毎に設置した圧力センサの結果を述べる。図-7はSAP0.7%、中心圧力0.2Mpa、周波数0.5Hz時に、0.2秒毎のチューブ内の圧力分布（同条件の静的注入時圧力に対する割合、以降「圧力」と示す）を示した結果であり、図-8はSAP0.5%、中心圧力0.3MPa、周波数10.0Hz時に、0.005秒毎のチューブ内の圧力分布を示した結果である。

この結果より、チューブ内の圧力は注入口である0m付近で最も脈動が大きく、4m付近で脈動が収束している状況が判る。脈動収束後、圧力は約110%のまま注入出口から1mの地点に達しその後出口に向けて低減していくものと考えられる。他の実験条件においてもチューブ内の圧力分布はどのケースにおいても脈動がある一定の値で収束することが明らかになった（以降、「収束圧力」と示す）。また、図-9より脈動が収束した距離と流

量の関係はほぼ一定であり、これらの一連の実験より収束するまでの距離と流量の間には大きな相関がないことがわかった。

図-10にSAP全ケースにおける、収束圧力と流量の関係を示す。これより、動的注入を行うことで収束圧力が上昇し、それに伴って流出時の流量が増加するものと考えられた。収束圧力の大きさと得られた流量の間には正の相関がある、すなわち動的效果が効果的に流量の増加に寄与する場合には、収束圧力の値も高くなる傾向が明らかになった。ここで、図-7と図-8を比較すると、動的效果の大きかった図-7では、静的に対する流量が148%で収束圧力が約110%かつRe数は比較的小さい0.0267、一方、動的效果の小さかった図-8では、流量が92%、収束圧力が約100%、Re数は比較的大きい2.37となっており、Re数が比較的小さいケースで収束圧力が増加する傾向があることがわかった。

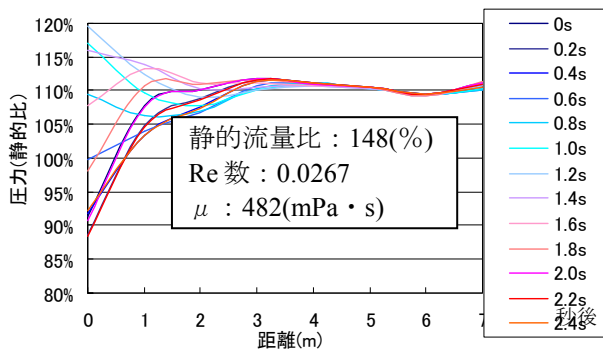


図-7 SAP0.7%0.2MPa0.5Hzチューブ内圧力変動

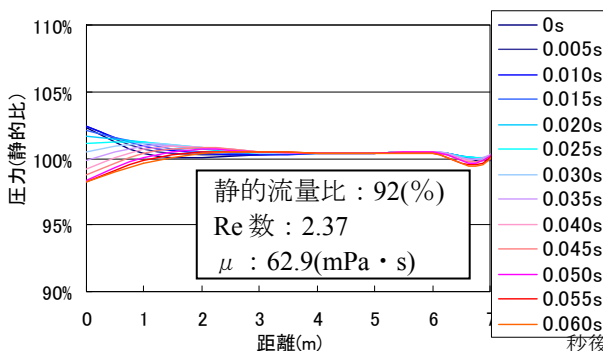


図-8 SAP0.5%0.3MPa10.0Hzチューブ内圧力変動

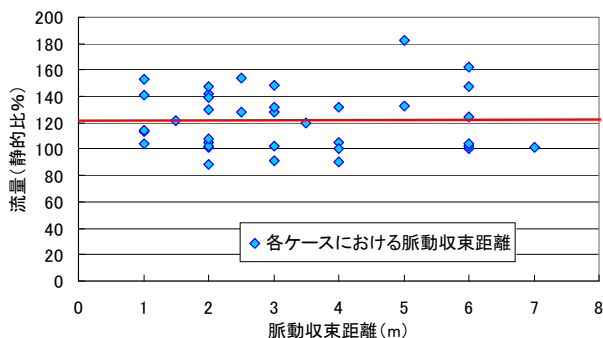


図-9 各ケースにおける脈動収束距離

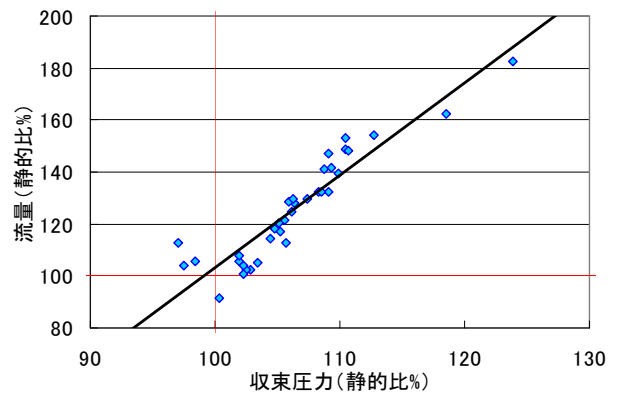


図-10 SAP全ケースにおける収束圧力に対する流量
(圧力、流量共に静的注入時に対する割合)

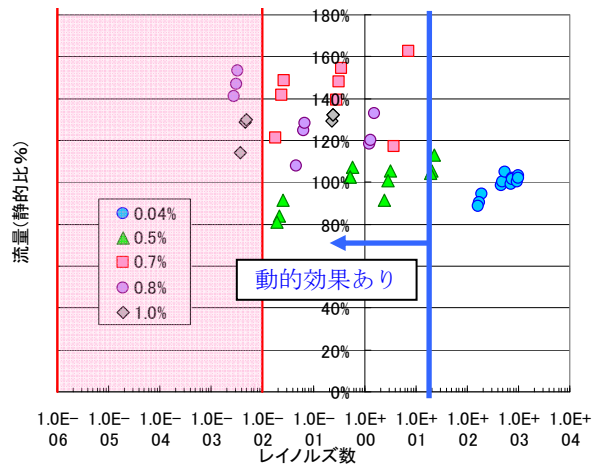


図-11 各ケースにおけるRe数と流量の関係

(4) Re数と流量の関係について

本実験により算出されたRe数と流量の関係を図-11に示す。なお、亀裂への注入時の想定Re数の範囲を赤枠で示す。

図-11を見ると、本実験において動的注入効果がみられるRe数の範囲は、10程度以下の範囲であると考えられる。また、本実験では実験値より算出したRe数が想定Re数の範囲内であったケースは少ない結果となったが、想定Re数の範囲内のケースにおいても、動的注入効果は見られた。

5. さいごに

本研究で明らかになった点と、今後の課題を以下に述べる。

- 通常、岩盤グラウトで多く用いられている、セメント系グラウトの粘性試験を行った結果、ずり速度が上昇するにつれて粘性係数が低下する擬塑性流体であることを確認した。
- 一次元チューブモデルと粘性流体を用いた注入実験では、擬塑性流体であるSAPを採用し、想定される亀裂とセメント系グラウトの注入条件と同等のRe数を目標として、チューブ径と材料

濃度を選定し、注入実験を実施した。その結果、SAPでは基準注入圧が上昇する、つまりずり速度が上昇すると二次曲線的に流量が上昇する結果が得られた。これは、擬塑性流体であるSAPの流体特性が動的注入の流量増大効果に影響を与えていることによるものと考えられた。

- SAPと比較してセルロースを用いた注入実験については、静的注入と動的注入の流量に明確な差は見られず。ニュートン流体では動的効果は見られなかった。
- 圧力の脈動伝達距離と流量には直接的な相関はないことがわかった。
- SAPでは静的注入と比較して、動的注入の方が、流量が増加する傾向が確認できた。実際の注入時の壁面ずり速度と粘性係数の関係から、静的注入に対して動的注入の方が、粘性係数の低下率が高いことから、見掛けの粘性係数の低下が流量増加の要因になっていると判断した。以上より流体の擬塑性は動的効果を得る上で支配的であることが確認された。
- SAP全ケースの周波数と流量比の関係から、動的注入における最適周波数は、動的効果が得られる注入材料においても、亀裂条件・注入圧力により異なり、1~10Hz間でばらつきがあった。
- チューブ内で動的注入時に測定された圧力分布では、注入口付近で最も脈動が大きく、出口に向かって脈動が減衰し、ある一定の圧力に収束することが判った。
- また、動的注入により流量が増加したケースでは、収束圧力が静的注入時の圧力よりも高い値を示し、流量と比例関係を取ることが判った。これより、動的注入の効果により効果的に収束圧力が上昇した場合に、流量が増加することが推定できる。

本実験により、動的注入効果に及ぼす流体の粘度特性の影響について、その基本的な特性が明らかになったと考える。今後はこれらの結果を元により理論的な定量検討を行うと共に、実際のセメント系グラウトとの特性の違い等についてさらに実験的に検証していく所存である。

参考文献

- 1) 山本拓治, 日比谷啓介, 伊達健介: 低動水性岩盤における動的注入工法の適用, 土木学会第 56 回年次学術講演会, IV-321, pp.642-643, 2001.
- 2) 伊達健介, 山本拓治, 桑川政則: 低動水性岩盤における動的注入工法の適用結果, 第 11 回岩の力学国内シンポジウム, G 01, 2002.
- 3) 伊達健介, 山本拓治: 動的注入工法における最適注入方法に関する基礎的検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会, 共通-57, pp.439-440, 2002.
- 4) 山本拓治, 伊達健介, 白井俊輔: 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, 8 月, pp.25-29, 2002.
- 5) 脇田伸吾, 伊達健介, 山本拓治: 動的注入工法の注入特性に関する検討, 第 30 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2003.
- 6) 伊達健介, 山本拓治, 日比谷啓介: 動的注入 (ダイナプレス) 工法の開発, 電力土木, 304, pp.161-163, 2003.
- 7) 寺戸康隆, 劉 維徳, 平 治: 微小模擬亀裂の静的・動的注入条件とグラウタビリティの関係, 第 29 回土質工学研究発表会, K-2, pp.2125-2128, 1994.
- 8) 大橋 昭, 寺戸康隆, 平 治: 微小亀裂への動的グラウチングに関する流動解析, 土木学会第 49 回年次学術講演会, III-372, pp.734-735, 1994.
- 9) 平 治, 西浜譲二, 寺戸康隆: 微小亀裂へのグラウチングにおける動的注入の効果, 土木学会第 49 回年次学術講演会, III-373, pp.736-737, 1994.
- 10) 大橋 昭, 平 治, 寺戸康隆: 高濃度グラウト材の微小亀裂への動的注入試験, 土木学会第 50 回年次学術講演会, III-326, pp.652-653, 1995.
- 11) 大橋 昭, 平 治, 寺戸康隆: 加振下におけるグラウト材の粘度試験, 土木学会第 51 回年次学術講演会, III-A319, pp.638-639, 1996.
- 12) 平 治, 大橋 昭, 寺戸康隆: 長尺模擬岩盤亀裂への動的注入試験, 土木学会第 51 回年次学術講演会, III-A320, pp.640-641, 1996.
- 13) 平 治, 大橋 昭, 西浜譲二: 動的グラウチングシステムの開発, 土木学会第 52 回年次学術講演会, III-A295, pp.590-591, 1997.
- 14) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物処分の技術的信頼性一地層処分研究開発第 2 次取りまとめ一総論レポート.

FUNDAMENTAL EXAMINATION ABOUT THE MECHANISM OF A GROUT DYNAMIC INJECTION METHOD

Mayuko MURAKAMI, Jyunichi KAWABATA, So FUJISAWA
and Takuji YAMAMOTO

Conventionally, a dynamic injection method exists as a more efficient pouring construction method for a base rock crack. A dynamic injection method is giving a sine wave to pouring pressure, and is a method of causing pulsation to pouring material. In KAJIMA, the effect has so far been checked by the laboratory experiment and the field experiment. It aimed at clarifying the mechanism of a dynamic injection method in this research. The base rock crack was made into the tube model, and the experiment which pours in the viscous fluid which imitated cement system Grout was conducted. By this document, while reporting these, a future subject is also explained.