

高濃度グラウトの微小亀裂への動的注入試験

Experiment of Dynamic Grout Injection into Small Fractures

高田 徹 *・寺戸康隆 **・平 治 ***・大橋 昭 ****

Toru TAKATA, Yasutaka TERADO, Osamu TAIRA and Akira OHASHI

Dynamic injection is a technique by means of which a high dense slurry can be efficiently injected into small fissures in rock. This technique improves the fluidity and penetration properties of the grout materials, thus preventing blocking during grouting. In this paper, the experimental process using a large scale model is described, which substantiates the efficiency of the dynamic grouting. The apparent viscosity of the grouting material due to dynamic excitation was examined using a viscometer specially designed for its test. Also the flow characteristics of the high viscosity fluid inside the small fissures, and the optimum conditions of injection were examined. In addition, the paper briefly describes a dynamic injection device, and the results obtained using this device.

1. まえがき

エネルギー地下備蓄や高レベル放射性廃棄物の地層処分施設など、岩盤を対象とする種々の地下構造物の施工では、空洞周辺の岩盤のゆるみ域における地下水の移流制御やその領域の固結化・安定化が重要な課題であり、高濃度グラウトを微小亀裂へ効率よく密実に注入する技術が要求される。

筆者らは、この課題を解決するために、高濃度グラウトに脈動を加えることで粘性抵抗を低下させ、流動性の向上と目詰まりの抑制を図りながら注入する技術、いわゆる動的注入工法を開発してきた。これまでは、高濃度グラウトと開口幅 100 μm 級の短尺模擬亀裂(流路長 146mm)を用いた高濃度グラウト注入試験、および微小隙間内の非定常解析を実施した^{1)~4)}。これにより動的注入工法の有効性と脈動圧の設定条件の一端を明らかにした。

昨年度は引き続いて、動的注入の効果を実大規模で確かめるために、長尺模擬亀裂試験体(流路長 2,900mm)を用いた動的注入試験、および加振下におけるグラウトの粘度試験を実施し、脈動(振動)を与えた高粘性流体の微小割れ目における流動特性を把握し、注入の最適条件と動的注入システムについて検討した。また本年度では、実用機を前提とした動的注入システムの開発の一助として、通常のグラウトポンプと動的注入装置を組合せた連続注入式のシステムの動作試験を行い、実用化へ向けてその可能性を確かめた。

2. 試験概要

2.1 長尺模擬岩盤亀裂の試験体による動的注入試験

(a) 長尺模擬亀裂試験体

岩盤亀裂の模型は、図-1に示すように、長さ 3,100×高さ 150×幅 50 (単位: mm) の 2 枚の縦型鋼製ブロックの間に、中ぐり加工した各種肉厚(H: 50~200 μm) の銅製のスパーサー(外寸法: 3,100×高さ 110、内寸法: 長さ 2,900×高さ 40、単位: mm)を挟み込み、両ブロックを M16mm ボルトで 75mm 間隔

* 日本基礎技術㈱ 技術本部 技術研究室

** 正会員 日本基礎技術㈱ 技術本部 技術研究室

*** 正会員 ㈱鴻池組 本社 原子力部

**** 正会員 ㈱鴻池組 技術研究所

に定トルクで締め付け、長尺の微小岩盤亀裂を形成したものである。鋼製ブロックの表面は硬質クロムメッキ加工と研磨によって平滑かつ平行に仕上げてあり、ブロックの片面にシールリングを設けて水密性を確保した。

(b) 動的注入装置

試験に用いる動的注入装置として、写真-1に示す油圧サーボ制御式の動的注入ポンプを開発した。主なパーツは、①油圧ユニット、②正弦波、矩形波、パルス波等の信号波形を発振する発振器、③サーボ制御装置、④油圧サーボアクチュエータ、および⑤圧力センサーから成る。動作の要領は、注入口元に取り付けた圧力センサーより検出される圧力波形と、発振器で与えた特定の周波数の正弦信号波形とを比較し、両方の波形が一致するように油圧サーボアクチュエータの動作をフィードバック制御して所定の脈動圧を与えることにある。

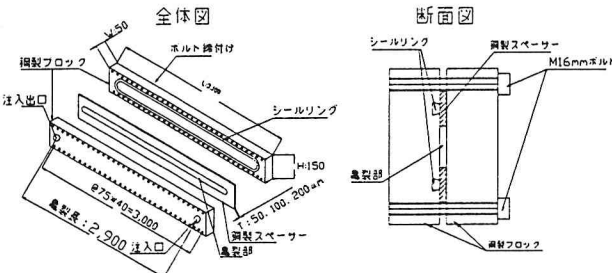


図-1 長尺模擬岩盤亀裂試験体の概要

(c) 試験方法

注入材には、超微粒子セメント(スーパーファイン SF; 以下 SF と略記)、山形産 300mesh ベントナイト(クニゲル VA; 以下 BE1 と略記)およびワイオミング産ベントナイト(ボルクレイ; 以下 BE2 と略記)を用い、その配合水比は、 $W/SF=0.5$ 、 $W/BE1=8, 10$ 、 $W/BE2=12, 15$ である。分散剤として、SF にはナフタリンスルホン酸塩系を、BE1、BE2 にはヘキサメタリン酸ソーダを使用し、固相分との重量比で一律 2% を添加した。材料の混練りは、超高速せん断型攪拌機を使用し、所定の手順と時間管理により実施した。混練り後、SF は直ちに、BE1、BE2 は養生 24 時間後に再攪拌して試験に使用した。亀裂内におけるグラウトの平均流速については、注入ポンプのピストン速度と断面積から算出し、流量を亀裂の開口断面で除して求めた。またグラウトが亀裂内を通過せず途中で閉塞した場合は、グラウト浸透距離(到達距離)を試験体の開放後に目視で読み取った。試料温度は $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ に管理した。

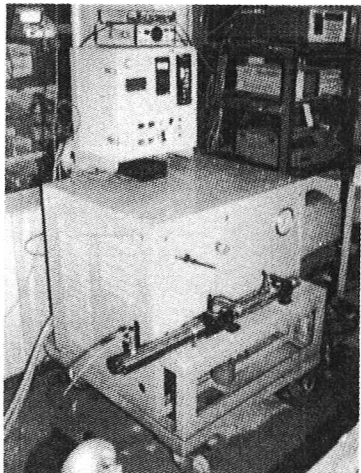


写真-1 動的注入装置

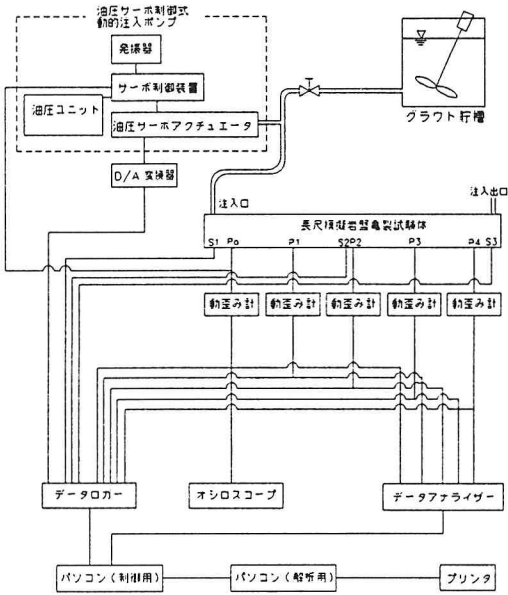


図-2 注入試験装置の概要

2.2 加振下におけるグラウトの粘度試験

(a) 試験装置

写真-2 に加振式二重円筒型回転粘度計の概要を示す。当装置は、回転粘度計と外筒のカップを円周方向に加振する装置から成る。粘度計の仕様は、[内筒半径：13mm、外筒半径：15mm、隙間：2mm、内筒高さ：70mm、内筒回転数：5～400rpm、6段変速]であり、小型加振機[加振力：50 N、最大加速度：33g、振動数：DC～14kHz]で外筒を正弦的な振動を与えることができる。

(b) 試験方法

本試験では、回転数を単調に増加させる定常せん断方式を適用し、振動数 f と速度振幅（外筒内壁の最大速度： u_g ）を制御した。ここに f と u_g は、振動センサと振動計により常時計測した。測定時、試料には、同じせん断履歴と回転数毎に1分の測定時間を与え、測定値の再現性を高めた。また測定値には、3ケースの平均値を採用した。試験材料には、2.1(c)で示した材料を使用し、同様な混練ぜ方法と管理方法で試料を作成した。

3. 結果と考察

3.1 長尺模擬亀裂試験体を用いた注入試験

試験は、まず、水により定圧注入試験を実施し、ポアズイニ流れを仮定して開口幅を推定・確認し、その後グラウト注入試験を実施した。推定結果を表-1に示す。また、注入試験中における鋼製ブロックの変位計測では、脈動圧によるブロックの変状は認められず、開口幅の変化はほとんどなかった。図-3に圧力波形の測定例を示す。

図-4は、模擬亀裂($H=100\ \mu\text{m}$)の1次元波動解析の結果であり、注入口からの距離 X と脈動圧発生成分 P_0 の減衰度合の関係を粘度(μ)毎に示している。ここでは解析波形から衝撃圧を除き、準正弦的な波形の最大値 $P_{\max}$ ・最小値 $P_{\min}$ を抽出し、圧力減衰を $[(P_{\max} - P_{\min})/P_0]$ で整理した。また、音速は $1\ \text{km/s}$ に固定した。結果によれば、水の測定値が解析値をかなり下回っている。これは、試験体中のゴム製シールリング(図-1 参照)によるダンピング効果が生じたためと推測される。

グラウト注入結果については、解析で示した高粘性による減衰分に加えて、音速の低下や波動の吸収による圧力減衰が大きく現れ、前述のダンピング効果を除いても脈動の影響範囲は、1 m程度であると考えられる。一方、図-5は、 $\mu=0.1\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ 、 $1\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ について振動数 f の影響をみた波動解析の結果である。 f が大きくなると脈動の減衰が著しくなるため、20～30Hz 付近までが利用の範囲と考えられる。

図-6にBE2の試験結果として振動数 f と浸透距離(到達距離)の関係を示す。この結果では、 $f=10\text{Hz}$ に明瞭なピーク値が現れており、前回の試験³⁾と同様な傾向を得た。図-7にSF、BE1の試験結果(グラウトが亀裂内を閉塞せず通過したケース)として振動数 f と亀裂内での平均流速 U の関係を示す。全体的に

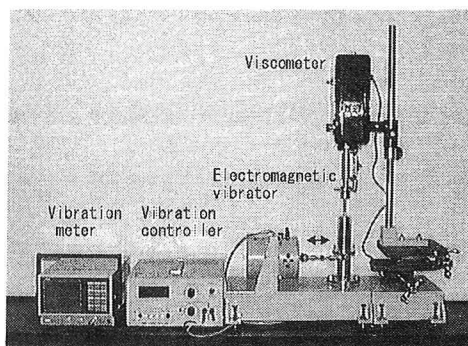


写真-2 加振式回転粘度計の概要

表-1 試験体の推定開口幅

設定開口幅 (使用したスプレーの厚さ) (μm)	水試験による 推定開口幅 (μm)	
	平均値	標準偏差
50	58.2	2.4
100	108.4	2.4
200	209.3	4.0

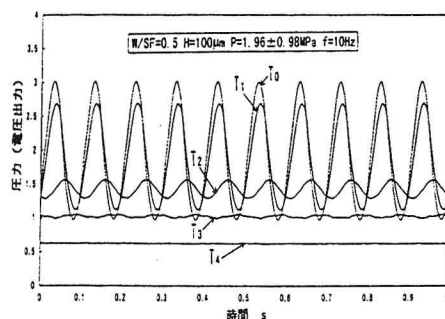


図-3 圧力波形の測定例

は 10Hz 付近にピーク値が認められるものの大きな差は見られなかった。これは、脈動の影響範囲が 1 m 程度であるため、2.9 m の流路長では脈動の効果が潜在化することによる。

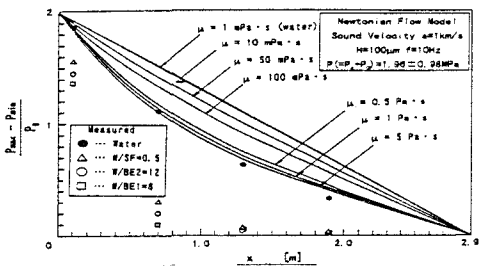


図-4 波動解析による脈動圧減衰(μ 影響)

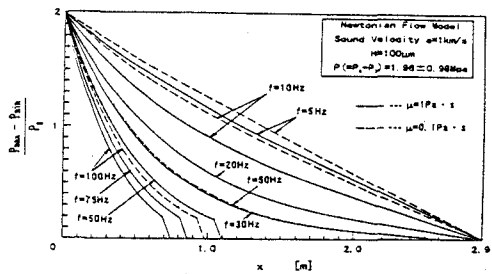


図-5 波動解析による脈動圧減衰(f 影響)

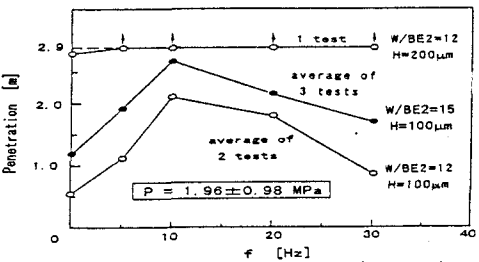


図-6 BE2 の注入試験結果 (浸透距離)

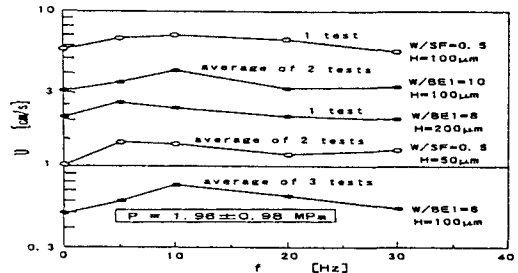


図-7 SF、BE1 の注入試験結果 (平均流速)

3.2 加振下におけるグラウトの粘度試験

無加振試験における流動曲線(ずり速度 D—ずり応力 τ の関係)を図-8 に示す。この結果に見られるように、高濃度グラウトでは非ニュートン流体の性質が顕著になる。また BE2 については円筒壁と試料間に明らかな滑りが見られる。図-9 は振動数を f = 0~40Hz の範囲で変化させた定速度(u₀ = 3cm/s)による加振試験の結果である。低ずり速度域において加振による影響が大きく、BE1 では D ≤ 42 s⁻¹ でニュートン流体に近くなることが分かる。各材料に共通した特徴として f = 10Hz で加振効果が最も強まり、微小模擬亀裂を用いた動的注入試験とよく一致している。試料に与えられる振動入力パワーは、[Power ∝ u₀² · f] で見積もられる。従って定速度試験では、f の増加に伴いパワーも比例的に増大するが、結果的にはパワーが小さな振動数域でグラウトの流動性が最も改善されており、動的注入における振動数の重要性が理解できる。

また、JIS 粘度計校正用標準液を用いて粘度試験を実施した。標準液には 2 種類選定し、液温 20℃ の粘度は、それぞれ 455mPa·s、および 1,789mPa·s である。試験としては、f = 0~100Hz、u₀ = 3cm/s の定速度による加振試験を実施した。試験結果によれば、粘度に及ぼす加振の影響は全く認められなかった。ここに、標準液はニュートン流体の粘度特性を示し、液温 21.5℃ の粘度

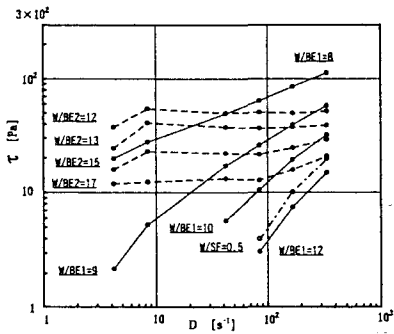


図-8 無加振粘度試験 (D—τ 曲線)

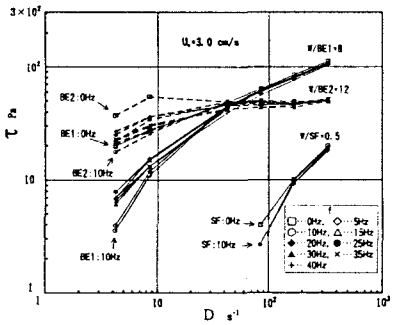


図-9 定速度による加振粘度試験

は、 $432\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、および $1,590\text{mPa}\cdot\text{s}$ であった。

4. 連続式動的注入システムについての検討

図-10 に、連続注入型の動的注入システムを示す。これは、2・2 (b) で述べた動的注入装置が室内試験用でパッチ的な注入であるのに対し、実用機を前提として連続的に動的注入を行うためのシステムであり、通常のグラウトポンプと上記の動的注入装置を逆止弁を介して直列に配管して構成されている。ここに、逆止弁は上流側への脈動を抑止するために設けたものである。

図-11 に測定点 P1～P3 の圧力波形の測定例を示す。試験結果より吐出口の圧力波形 P3 は、グラウトポンプのベース圧力に脈動圧成分が加わって形成される傾向があった。このように、グラウトポンプの吐出圧力に変動はみられるものの、このベース圧力に対して 10Hz に設定した脈動圧成分が正確に表われており、動的注入システムの実用化が十分可能であることが確かめられた。

5. あとがき

長尺模擬亀裂による動的注入試験と加振下における粘度試験との比較において、流動域の幅、流速分布や滑り挙動、回転粘度計に付随する粒子のはね出しや分離など、問題点も少なくない。しかし、動的注入工法の最適条件について両試験で同じ結果を得たことは、当工法の実用化を進める上で注目すべき成果であると考ええる。当工法の特徴は、限定した距離内で開口幅 $100\ \mu\text{m}$ 級の微細割れ目を迅速かつ確実にグラウチングできる点にあり、注入材や分散剤の開発とともに高止水グラウトの実現に向けた技術の1つとして、今後の発展が期待できる。

本研究は、科学技術庁補助金交付研究の一部をまとめたものであり、付記して感謝する。また、本試験を実施するに当り、(株)鴻池組の西浜譲二氏、日本基礎技術㈱の那須丈夫氏をはじめ、多数の方々に御意見と御協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

6. 参考文献

- 1) 平、他3名：微小亀裂へのグラウチングにおける動的注入効果，土木学会第49回年会講概集，1994
- 2) 大橋、他3名：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回年会講概集，1994
- 3) 大橋、他4名：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回年会講概集，1995
- 4) Ohashi, A., et al.: Study on Dynamic Injection into Small Fractures, Proc. IS Tokyo'96 Second Inter. Conf. on Ground Improvement Geosystems, 1996

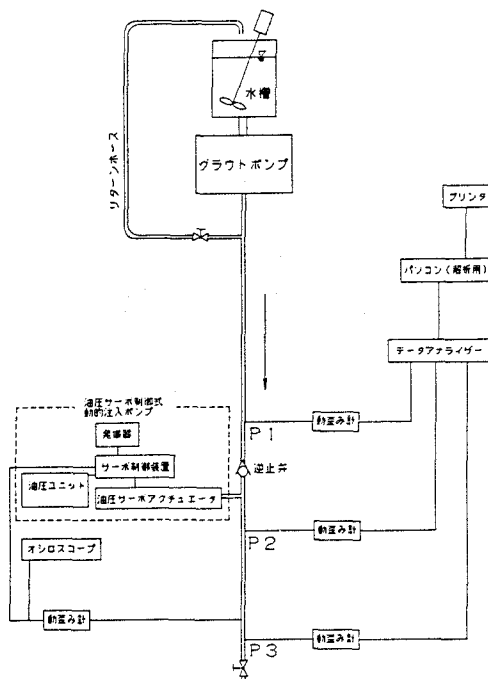


図-10 連続式動的注入システムの概要

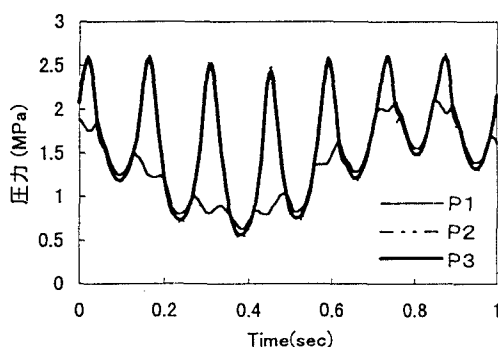


図-11 圧力波形の測定例