

動的グラウチング工法の開発と ダム基礎処理への適用

内田 善久¹・蓮本 清二¹・平 治²・大橋 昭³・西垣 誠⁴・高田 徹⁵

¹東京電力㈱ 建設部 土木・建築技術センター（〒100-0011 東京都千代田区内幸町 1-1-3）

²株式会社鴻池組 土木本部技術部（〒101-8316 東京都千代田区神田駿河台 2-3-11）

³舞鶴工業高等専門学校教授 建設・生産システム工学科（〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋 234）

⁴岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科（〒700-8530 岡山県岡山市津島中 3-1-1）

⁵日本基礎技術株式会社 技術本部技術管理部（〒150-0031 東京都渋谷区桜丘町 15-17）

動的グラウチング工法は、注入圧力に脈動を与えることによりグラウトの見かけ粘度を低下させ、目詰まりを抑制して、グラウトの流動性・浸透性の向上を図る新しい岩盤注入工法である。筆者らは、本工法のダム基礎処理への適用性を確認することを目的に人工亀裂を用いた注入試験を行い、本工法の有効性と最適注入条件を明らかにした。さらに、現場で簡易に施工できる動的グラウチングシステムを開発して、ロックフィルダムのブランケットグラウチングを対象に原位置注入試験を実施した。その結果、本工法がグラウトの改良効果と注入効率の向上に有効であり、ダム基礎処理のコスト縮減が期待できることを確認した。

キーワード：動的注入，脈動注入，目詰まり，亀裂性岩盤，ダム基礎処理，人工亀裂注入試験，原位置注入試験，グラウトパルサー

1. はじめに

通常、ダム基礎処理では基礎岩盤の遮水性や変形特性の改良することを目的に、セメントグラウトが一定圧力で注入されている。近年、ダム基礎処理のコスト縮減が強く要請されているが、セメントグラウトにおいては、セメント粒子の目詰まりがグラウトの改良効果や施工効率に影響する要因の一つと考えられる。すなわち、注入孔内の亀裂入口等での目詰まりは亀裂中へのグラウトの浸透を妨げ、亀裂の充填密度の低下や改良範囲の狭小化につながる可能性がある。また、目詰まりによって亀裂の開口断面積が狭くなると、グラウトの流量が低下して注入時間が長くなり、施工効率が低下することも考えられる。過去に実施された微小人工亀裂や細管を用いた注入試験では、グラウトの配合や亀裂の開口幅の関係によっては、亀裂や細管の入口にセメント粒子の目詰まりが発生する場合があることが報告されている。岩盤亀裂でのセメント粒子の目詰まりを抑制してグラウトの改良効果と施工効率を向上させる工法は、所定の改良品質を確保してコストを縮減するた

めの有効な手段の1つと考えられる。

動的グラウチング工法は STRIPA Project で組織された高レベル放射性廃棄物地層処分研究の一環として提案されたもので、注入圧力に高周波の動的な圧力成分を付加することによりグラウトの見かけ粘度を低減して、微細な亀裂に高濃度・高粘性のグラウトを注入しようとする新しい発想の止水技術である¹⁾。

筆者らは、動的グラウチング工法が地層処分坑道の建設に関連した止水だけでなく、懸濁型グラウトを用いた注入全般に有効であり、改良効果の向上と施工コストの抑制につながる可能性があるものと考え、ダム基礎グラウチングへの適用に向けた研究開発を進めてきた^{2),3)}。

本報告では、動的グラウチング工法の有効性と脈動の最適振動数を確認するために実施した人工亀裂への注入試験結果を報告する。さらに現場で容易に施工できる動的グラウチングシステムの概要及びロックフィルダムのブランケットグラウチングを対象とした原位置注入試験結果について報告する。

2. 人工亀裂への注入試験

(1) 試験の目的

人工亀裂への注入試験を実施して、セメント粒子の目詰まり抑制に対する動的注入の効果と最適注入条件（脈動の振動数と振幅）を検討した。図-1に示すように、セメント粒子の目詰まりは、注入孔内の亀裂の入口(孔壁)及び亀裂中の開口幅の変化部で発生することが予想される。そこで、注入試験では、注入孔内の亀裂入口での目詰まりに対する動的注入の効果を検討するために、亀裂の開口幅が一定の平行平滑な人工亀裂への注入試験を実施して、人工亀裂の入口での目詰まりの発生状況を調べた。亀裂の断面変化部での目詰まりに対する動的注入の効果については、人工亀裂の途中に岩盤表面の粗さを模擬したラフネスを設置して注入試験を行い、目詰まりの発生状況を調べた。

(2) 注入試験装置

図-2に人工亀裂の概要を示す。亀裂は、流路長：2,900mm、流路幅：40mmであり、鋼製の下板とアクリル製の上板の間に所定の厚さの銅製スペーサ（流路部分をくり抜いている）を挟み込み、16mmボルトを75mm間隔に配置して一定トルクで締め付け形成した。鋼製下板の内表面は硬質クロムメッキと研磨により平滑に仕上げている。圧力測定については、測定口T0～T5により、注入圧力と亀裂内の静圧分布を測定した。

亀裂途中で開口幅を変化させるため、亀裂途中でラフネスを設定した。ラフネスは、耐水ペーパー（JIS R 6253で規定される耐水研磨紙#240）を注入口から1.3m～1.7mの範囲で亀裂の下面に張り付けて設定した。ラフネスの厚さは0.3mmである。ラフネスを設定した場合の亀裂の開口幅を0.45mmとしたため、ラフネス設定部は亀裂の開口幅が0.45mmから0.15mmに変化することとなる。

図-3に注入試験システムを示す。このシステムは、コンプレッサーからの圧縮空気によって攪拌機付加圧装置内のセメントミルクを一定圧力で供給し、グラウトパルサーによって所定の振動数と振幅を持つ脈動を付加することができる。攪拌機付加圧装置は2基の加圧タンク（10 $\frac{1}{2}$ ×2基）から構成され、2基のタンクを交互に切り替えることで、グラウトを循環させながら長時間にわたって注入試験を実施することが可能である。グラウトパルサーはゴムチューブとピストンから構成され、ピストンによりゴムチューブを高速で開閉しながら脈動を発生させる装

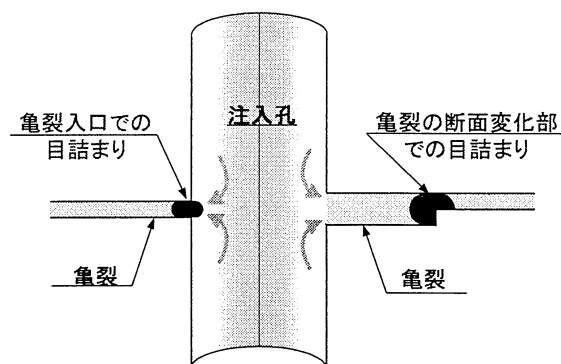


図-1 目詰まりの発生イメージ

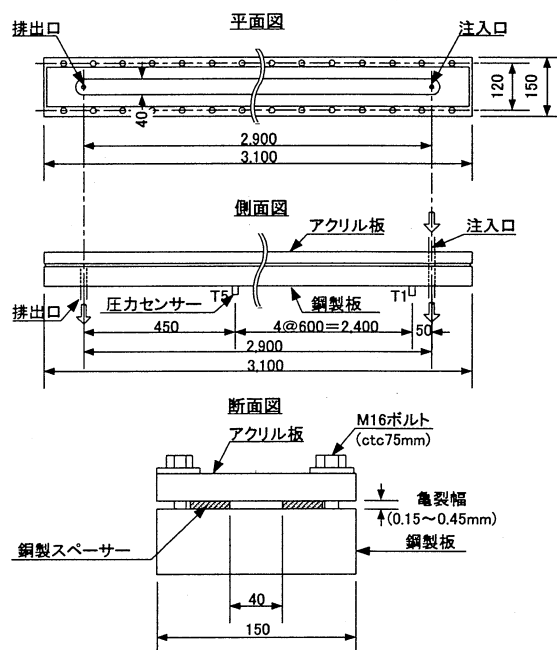


図-2 長尺人工亀裂の概要

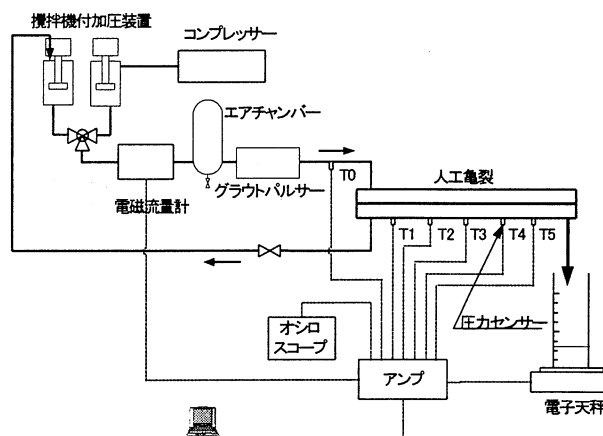


図-3 注入試験システム

置である。

(3) 試験方法

グラウト材には、ダム基礎グラウチングで一般に使用されている高炉セメントB種を用いた。材料の混練りにはソイルミキサを使用し、所定の手順と時間管理のもと試料を作製した。また、粗粒分を取り除くため、混練り後のグラウトは0.25mmのふるいを通過させた。試料の温度を $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ に管理した。配合はC:W=1:0.75, 1:1とし、プレーンとした。

注入圧力の設定では、動的注入の中心圧と静的注入圧を一致させた。脈動の振幅は中心圧の75%とした。また、動的注入の最適振動数を確認するため、脈動の振動数を0(静的注入)~10Hzに変化させた。

人工亀裂の注入口には特殊なシャッターを取り付けており、シャッターを閉めた状態では、グラウトは人工亀裂を貫通して攪拌機付加圧装置側へ循環する。試験開始前にはシャッターを閉じておき、グラウトを循環させながら所定の圧力と循環する流量を設定した。注入条件が設定された後、シャッターを開けて循環するグラウトの一部を亀裂中へ注入した。亀裂を通過したグラウトについては電子天秤と超音波変位センサーで重量と体積を連続的に計測した。動的注入では、静的条件で圧力及び循環する流量を設定した後、グラウトパルサーを起動して所定の振動数と振幅を持つ脈動を付加した。

(4) 試験結果

図-4に亀裂の開口幅が一定の亀裂への注入試験結果として、亀裂を通過するグラウトの経時変化を示す。この試験の目的は、注入孔内の亀裂入口におけるセメント粒子の目詰まりに対する脈動効果を検証することである。配合はC:W=1:1である。注入圧力は $P=0.2\text{MPa}$ 、脈動の振動数は0Hz, 5Hz, 7Hzである。静的注入では注入開始後流量が徐々に低下しているが、動的注入では流量がほとんど変化せず、静的注入の約2倍の流量が確保されている。これは、脈動によって注入孔入口での目詰まりが抑制されたことによる効果と考えられる。

図-5~7に、流路にラフネスを設定して亀裂の開口幅を変化させた亀裂への注入試験結果を示す。この試験の目的は、亀裂中の開口幅の変化部におけるセメント粒子の目詰まりに対する脈動効果を検証することである。図-5は、配合がC:W=1:0.75の場合の亀裂を通過するグラウトの経時変化を示したものである。注入圧力は $P=0.1, 0.2, 0.3\text{MPa}$ であり、脈動の振動数は0Hz, 3Hz, 5Hz, 7Hz, 10Hzであ

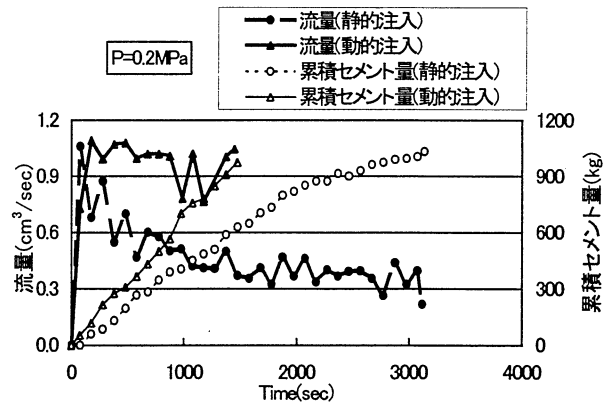


図-4 亀裂を通過するグラウトの経時変化
(亀裂の開口幅：0.2mm, C:W=1:1)

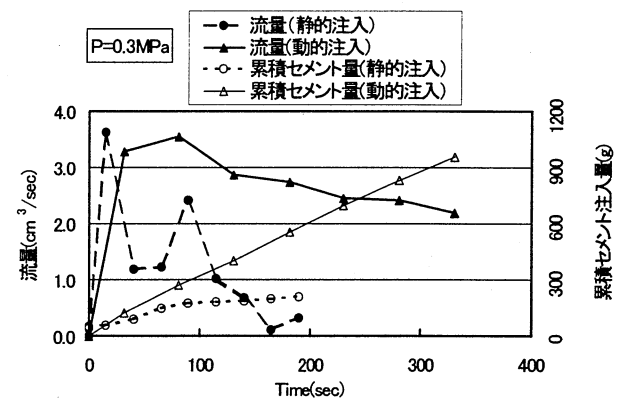
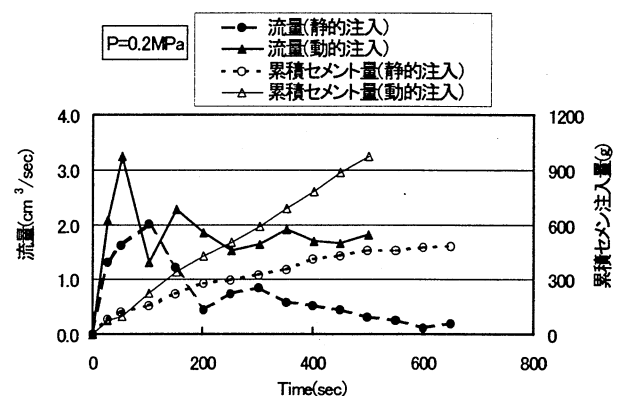


図-5 亀裂を通過するグラウトの経時変化
(亀裂の開口幅：0.45mm, ラフネス設定あり, C:W=1:1)

る。図より、静的注入では注入開始直後から目詰まりによって流量が低下しており、亀裂が閉塞したケースもある。一方、動的注入では静的注入に比べて流量が多く、経時的な変化も少なくなっており、顕著な脈動効果を示している。

図-6は、配合がC:W=1:1の場合の亀裂を通過するグラウトの経時変化を示したものである。注入圧力は $P=0.2, 0.3, 0.4\text{MPa}$ とし、脈動の振動数は

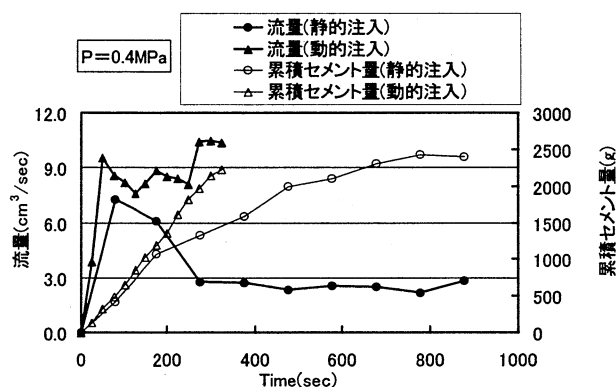
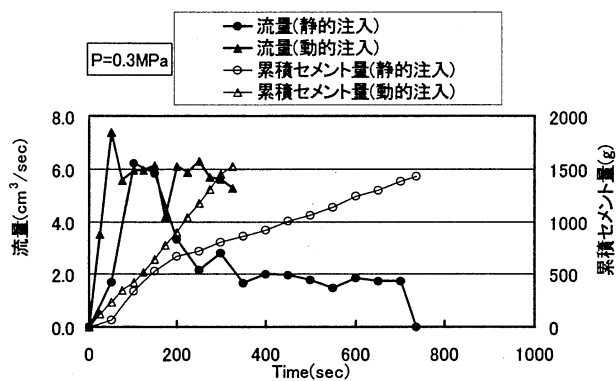
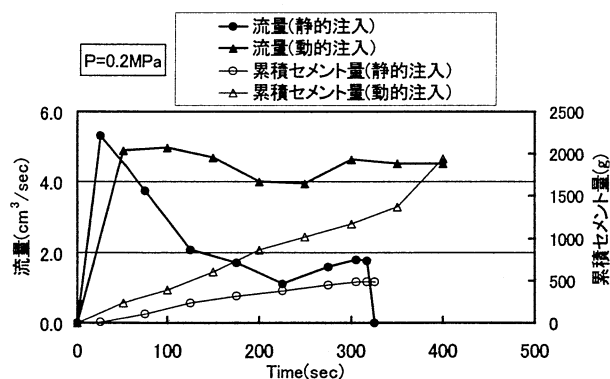


図-6 亀裂を通過するグラウトの経時変化
(亀裂の開口幅: 0.45mm, ラフネス設定あり, C:W=1:1)

0Hz, 5Hz, 7Hz とした. この場合も動的注入では静的注入に比べて流量が多く, 経時的な変化も少なくなっており, 顕著な脈動効果を示している. 写真-1に亀裂の開口幅の変化部における目詰まりの発生状況を示す. 静的注入では亀裂の開口幅の変化部で目詰まりが発生している. 動的注入では目詰まりが発生しておらず, グラウトが安定して流れている. なお, 写真下部のスケールは注入口からの距離を示す.

図-7に, 目詰まりによって亀裂が閉塞するまでに亀裂を通過したグラウトの量と振動数の関係を示す. 亀裂の開口幅は $H=0.45\text{mm}$ であり, 流路にラフネスを設定している. 配合は $C:W=1:0.75$ である. 図

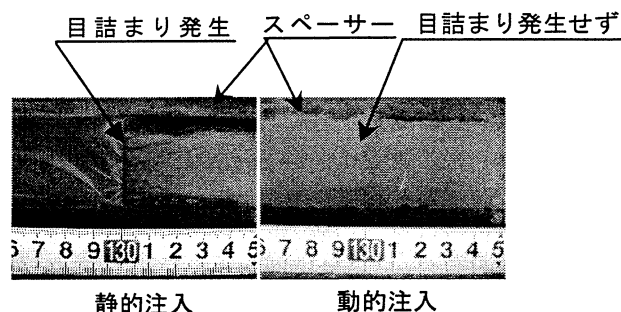


写真-1 亀裂の開口幅の変化部での目詰まり状況

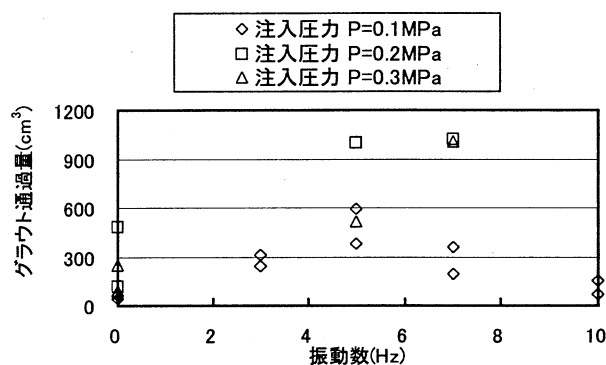


図-7 亀裂を通過したグラウトの流量
(亀裂の開口幅: 0.45mm, ラフネス設定あり, C:W=1:0.75)

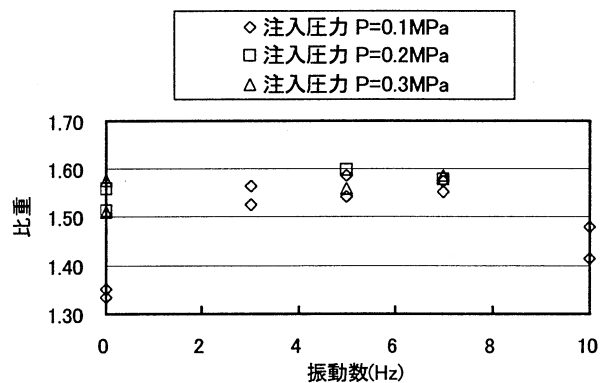


図-8 亀裂を通過したグラウトの比重
(亀裂の開口幅: 0.45mm, ラフネス設定あり, C:W=1:0.75)

より, 静的注入に比べて動的注入のグラウトの通過量が多くなっており, 脈動の効果が現れている. また, 5~7Hz に明らかなピークが認められ, 脈動の振動数としては, 5~7Hz 程度が最適であると考えられる. 図-8に亀裂を通過したグラウトの比重と振動数の関係を示す. 図より, 静的注入に比べて動的注入の場合の比重が大きくなっており, 動的注入ではより高濃度のグラウトを亀裂中へ注入することが

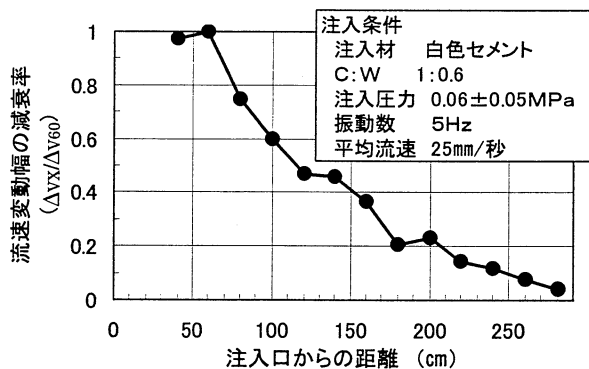


図-9 長尺人工亀裂内の脈動の伝播状況

可能であると考えられる。この場合も 5～7Hz が最適振動数であることを示している。

脈動は岩盤亀裂中で減衰するため、動的注入においては、脈動の伝播範囲すなわち動的注入の有効範囲を検討しておく必要がある。亀裂中では、圧力の振動に伴ってグラウトの速度が振動する。そこで、脈動の伝播範囲として、グラウトの速度振動の伝播範囲を求めることとした。グラウトの速度振動は、グラウトに添加したマーカー粒子の振動をデジタルビデオカメラにより拡大撮影し、撮影画像を画像解析して求めた。デジタルビデオカメラは人工亀裂の亚克力上板の直上に設置した。亀裂の開口幅は 0.2mm とし、グラウト材はマーカー粒子を際立たせるために白色セメントを用いた。配合は C:W=1:0.6 である。注入圧力は 0.06±0.05MPa である。マーカー粒子として、活性炭（粒径は 0.106～0.15mm に調整）を用いた。

図-9 に注入口からの距離とグラウトの速度振幅の減衰率の関係を示す。速度振幅の減衰率は、注入口からの距離 60cm における速度振幅 Δv_{60} ($v_{\max} - v_{\min}$) に対する速度振幅 Δv_x の比 ($\Delta v_x / \Delta v_{60}$) である。なお、注入口から 60cm までの範囲はマーカー粒子の速度が速すぎるため、画像解析が不可能であった。図より、グラウトの速度振動は距離に応じて減衰しているが、人工亀裂のほぼ全長 (2.9m) まで伝播していることがわかった。

(5) 動的注入の効果に関する考察

注入孔内の亀裂入口における目詰まりに対する動的注入の効果を検討するため、亀裂の開口幅が一定の亀裂に対する注入試験を実施した。静的注入では注入口(亀裂の入口)において目詰まりが発生して、グラウトの流量が低下した。一方、動的注入では目詰まりはほとんど発生しておらず、亀裂内のグラウ

トの流量も多くなっている。動的注入では、脈動によってセメント粒子を振動させることにより亀裂入口部分での目詰まりを抑制する効果があるものと考えられる。

亀裂の開口幅の変化部における目詰まりに対する動的注入の効果を検討するため、人工亀裂内にラフネスを設定して亀裂の開口幅を変化させた亀裂に対する注入試験を実施した。静的注入では注入口(亀裂の入口)における目詰まりに加えて、亀裂の開口幅の変化部でも目詰まりが発生し、グラウトの流量の低下や亀裂の閉塞が生じた。動的注入では亀裂中の開口幅の変化部での目詰まりが少なく、静的注入に比べて亀裂を通過するグラウトの量(cm^3)や亀裂内のグラウトの流量(cm^3/sec)も多くなっている。また、亀裂を通過したグラウトの比重も静的注入に比べて同等以上であった。動的注入では脈動によってセメント粒子の不規則運動が助長され、ラフネス部でのセメント粒子の沈積および目詰まりの成長が抑制されるものと考えられる。

以上の結果から、動的注入では注入孔内の亀裂入口及び亀裂の開口幅の変化部での目詰まりを抑制し、高濃度のグラウトを効率的に注入する効果が期待できると考えられる。脈動の最適振動数は、亀裂を通過するグラウトの量及び比重から、5～7Hz 程度と考えられる。また、これまでの研究成果から、脈動の振幅が大きいほど脈動の効果が大きいという結果が得られている。

脈動の伝播範囲については、画像解析結果からグラウトの速度振動が人工亀裂のほぼ全長 (2.9m) まで伝播することが示された。なお、亀裂中で目詰まりが生じた場合は、目詰まり部分の上流側の圧力が上昇し脈動振幅も大きくなることから、目詰まりの発生位置によっては脈動の伝播範囲が広くなり、一旦目詰まりが生じた場合でもそれを解消する可能性があると考えられる。

以上より、動的注入は静的注入に比べて注入孔内の亀裂入口や岩盤亀裂中での目詰まりを抑制してより高濃度のグラウトを亀裂中へ注入することが可能となり、脈動の伝播範囲において改良効果と施工効率の向上が期待できる注入工法であると考えられる。

3. 動的グラウティングシステムの開発

以上の基礎研究成果を基に、現場での施工が可能な動的グラウティングシステムを開発した。図-10 にシステムの概要を示す。本システムは、従来の注入

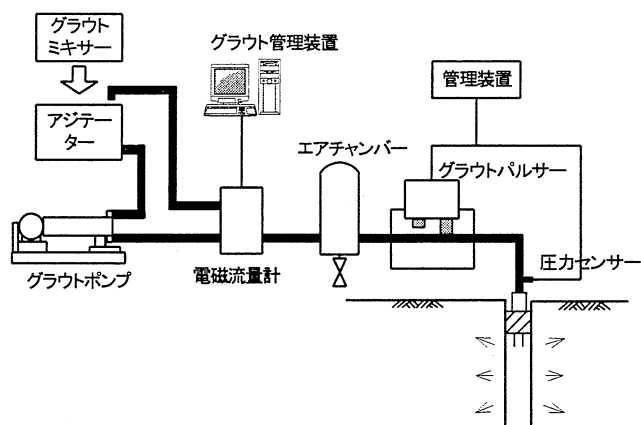


図-10 動的グラウチングシステム

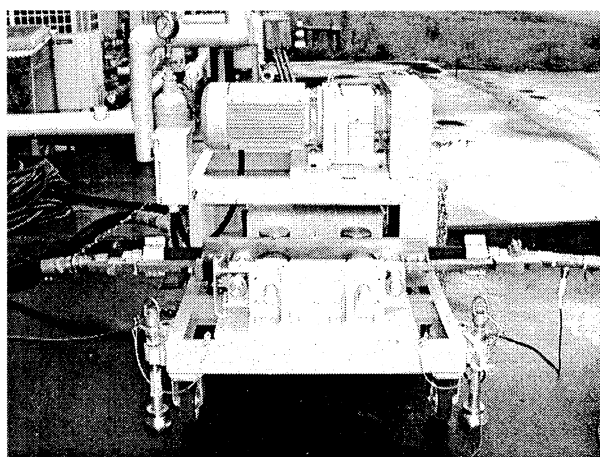


写真-2 グラウトパルサー

システムにより一定圧力でグラウトを供給し、注入孔近傍に設置したエアチャンバーとグラウトパルサーで、所定の振動数の脈動を付加する簡便な簡便な方式であり、注入時の脈動圧力を容易に制御・管理することができる。写真-2にグラウトパルサーの概要を示す。グラウトパルサーは、注入試験で用いたものと同様にゴムチューブとピストンから構成され、ピストンにより圧送ラインを高速で開閉しながら脈動を発生させる装置である。

4. 原位置注入試験

(1) 概要

ロックフィルダムのブランケットグラウチングを対象として原位置注入試験を実施し、動的注入の有効性と現場への適用性を評価した。試験では、近接した2つの試験エリアにおいて、動的注入と従来の静的注入を中央内挿法によって実施し、両者の試験結果を比較することで動的注入の効果を検討した。

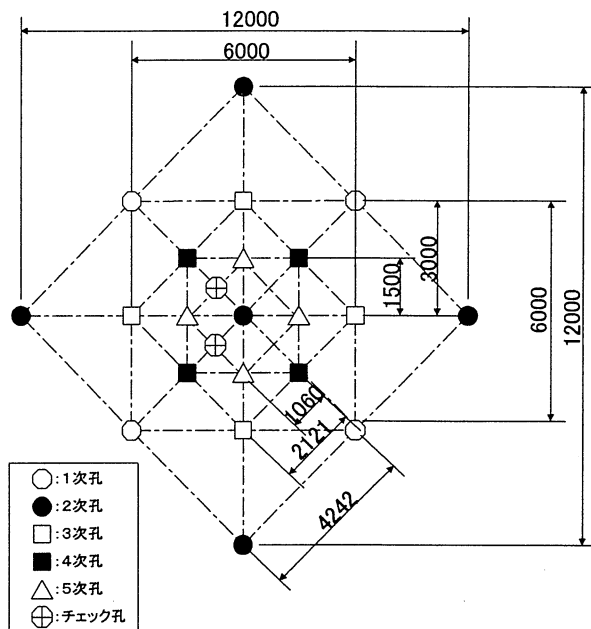


図-11 孔配置図

表-1 注入仕様

	動的注入	静的注入
注入圧力 (GL-5m~10m)	1.4MPa~0.3MPa 5~7Hz	0.8MPa
最大流量	30L/min	30L/min
配合 (C:W)	1:2 ~ 1:1	1:4 ~ 1:1

図-11に孔配置、表-1に注入仕様を示す。

(2) 試験条件

図-12は、試験を実施した2つのエリアにおける開口亀裂の頻度分布を比較したものであり、2つのエリアが初期状態ではほぼ同様の亀裂頻度、亀裂幅の分布であることを示している。図-13は、初期状態での水理特性を比較するために1次孔の注入前ルジオン値の頻度分布を示したものであり、2つのエリアの初期ルジオン値がほぼ同等の分布を示している。

以上より、動的注入と静的注入の比較注入試験は、ほぼ同等の亀裂特性及び水理特性を持つ岩盤を対象に実施したものと考えられる。

(3) 試験結果

動的注入、静的注入とも、第1ステージではリークが多く発生し、その処理方法が両注入方法で異なっているため、試験結果の比較は第2ステージのみ

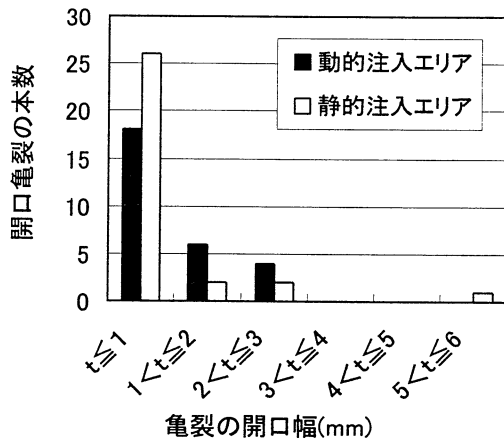


図-12 亀裂の開口幅の分布

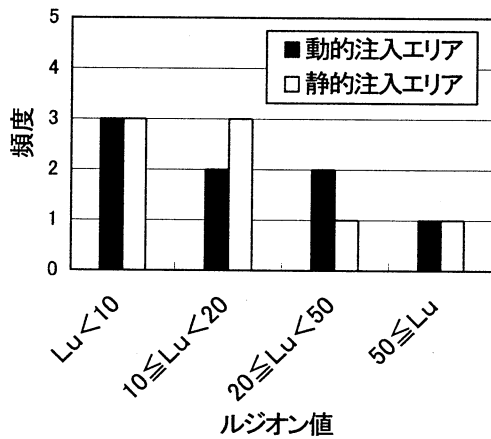


図-13 1次孔のルジオン値

で行う。

図-14にルジオン値の次数低減図を示す。両工法とも次数が進むにしたがってルジオン値が低下しているが、動的注入では4次孔で改良目標値である5ルジオンに達したのに対し、静的注入では5次孔で改良目標値に達している。図-15に単位注入セメント量とルジオン値の相関図を示す。両工法ともほぼ同等の結果となっている。

図-16に動的注入と静的注入のP-Q関係と累積単位注入セメント量の測定例を示す。例では注入圧力、ルジオン値、注入セメント量が同等のケースを示している。なお、動的注入と静的注入の開始配合の違いを調整した上で比較している。図より、動的注入は、静的注入に比べて短い時間にセメントが注入されている。図-17に動的注入と静的注入の注入孔率の比較を示す。注入効率は単位時間あたりのセメント注入量とし、ルジオン値と注入圧力の影響を排除するため、 $[(C/Lu/P)/\text{注入時間}]$ と定義した。図より、動的注入の注入効率は静的注入の約2倍となっている。

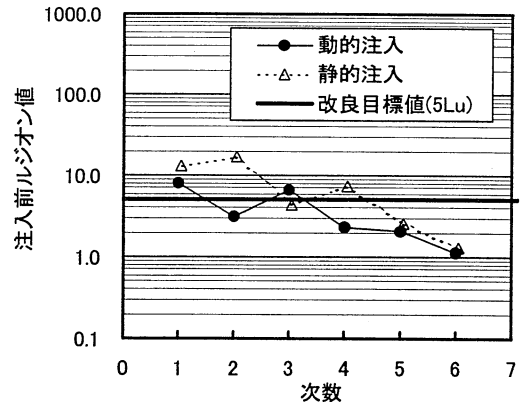


図-14 次数毎のルジオン値の変化

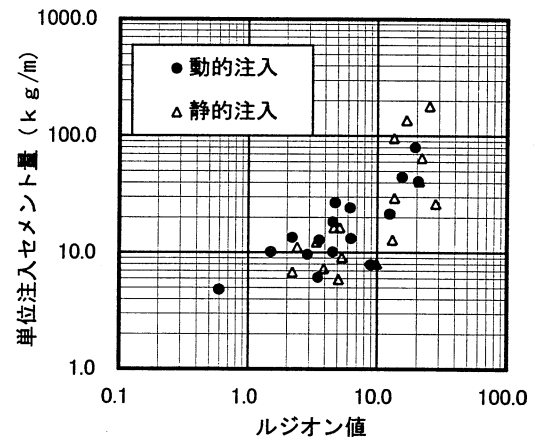


図-15 ルジオン値と単位注入セメント量の相関

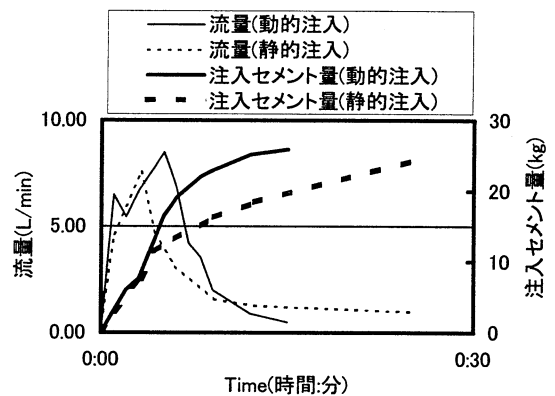


図-16 注入記録比較図

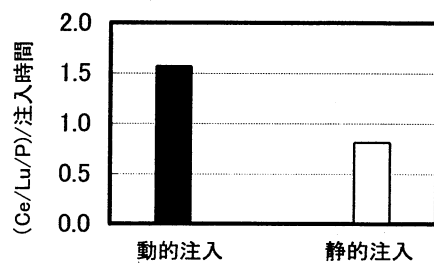


図-17 注入効率

表-2 1枚の亀裂に複数のセメントミルクを挟む亀裂の出現状況 (●:1回)

深度	静的注入	動的注入
5～6m	●	
6～7m	●●●	
7～8m	●	
8～9m	●	
9～10m	●	

る。

今回の注入試験では、注入回数毎に異なる色でグラウトに着色し、ボーリングコアを観察してグラウトの浸透状況を調べた。調査結果のうち、表-2は1枚の亀裂に複数の回数のセメントミルクを挟む亀裂の出現状況をまとめたものである。表より、静的注入では1枚の亀裂に複数の回数のセメントミルクを挟む亀裂が合計7箇所確認されているが、動的注入では1箇所も確認されていない。

(4) 考察

ルジオン値の回数低減では、静的注入が5次孔で改良目標値に達しているのに対し、動的注入は4次孔で改良目標値に達している。データの数が少なく明確な差は認められないが、動的注入の改良効果が高いことを示している可能性がある。

動的注入の注入効率（単位時間あたりのセメント注入量）は静的注入の約2倍となっている。人工亀裂への注入試験結果で示されたように、動的注入では、亀裂入口及び亀裂中でのセメント粒子の目詰まりを抑制する効果があるため、グラウトの流量が多くなる。その結果、注入効率すなわち単位時間あたりのセメント注入量が多くなったものと考えられる。これより、動的注入では施工時間が短縮されることによるコスト削減効果が期待できる。

静的注入では1枚の亀裂に複数の回数のセメントミルクを挟む亀裂が確認されているが、動的注入では確認されていない。動的注入では亀裂の入口等での目詰まりが抑制され、高濃度のグラウトが注入されると期待される。そのため、動的注入は静的注入に比べて亀裂の充填度合いが高く、1度の注入で亀裂の充填が完了したものと考えられる。

動的グラウティングシステムは簡便なシステムであ

り、原位置試験を通して現場での施工及び管理の容易さが確認された。動的グラウティングシステムの現場適用性は高いと考えられる。

5. まとめ

筆者らは、ダム基礎グラウティングに対する動的グラウティング工法の効果を検討するため、人工亀裂への注入試験及び原位置注入試験を実施した。以下に得られた成果を示す。

- ① 人工亀裂への注入試験結果から、動的注入では、注入孔内の亀裂入口及び亀裂の開口幅の変化部における目詰まりの発生を抑制する効果がある。
- ② その結果、動的注入では、静的注入に比べて高濃度のグラウトを効率的に亀裂中に注入することが可能となり、改良効果と施工効率の向上が期待できる。
- ③ 動的注入の最適振動数は、5Hz～7Hz程度と考えられる。
- ④ 現場での施工が容易な動的グラウティングシステムを開発し、原位置試験を通して、その性能と現場適用性を確認した。
- ⑤ 原位置注入試験では、動的グラウティング工法の注入効率（単位時間あたりのセメント注入量）が静的注入に比べて高く、改良効果の向上とコスト削減が期待できることが示された。

以上より、動的グラウティング工法は、従来の静的注入に比べて改良品質と施工効率の向上が期待できる工法であると考えられる。今後は、原位置試験を積み重ね、本工法の有効性を実証していく予定である。

参考文献

- 1) Borgesson, L., et al.: Final Report of the Rock Sealing Project vol.1, *Sripa Project Technical Report*, SKB, Stockholm, 1991
- 2) 平, 他.: 動的グラウティングシステムの開発, *ダム工学* Vol.9, No.3, pp.164-174, 1999
- 3) Uchida, Y., et al.: Dynamic injection method for Dam foundation grouting, *Proceedings of Workshop : Modern techniques for Dams Financing, Construction, Operation, Risk Assessment, Vol.1*, pp.217-229, ICOLD 69th Annual Meeting, 2001