

## 動的圧力を利用した岩盤注入工法 - ダイナプレス工法 -

New Grouting Method with Dynamic Pressure - DynaPress Grouting Method -

脇田 伸吾 伊達 健介 山本 拓治  
吉迫 和生 加藤 節郎<sup>1)</sup> 青木 謙治<sup>2)</sup>

### 要 約

石油やLPGの地下備蓄基地及び高レベル放射性廃棄物処分場の建設においては、低透水性岩盤への経済的かつ確実なグラウチングが要望されている。一方、ダムやトンネル工事は、従来よりも地質条件の悪いサイトに計画される事例が増加し、注入工が総工事費の中で大きな割合を占め、また工期に及ぼす影響も無視できない。そこで、従来の静的注入工法と比較して、より高性能で、かつコストダウンや工期短縮の図れる効果的な岩盤注入工法が望まれている。今回、一定の注入圧に対して動的圧力を与えることで、より多くのグラウト材を注入することのできるダイナプレス工法を開発した。

本論文では、概要、亀裂注入実験検討、現場注入システム、現場適用結果について報告する。

- 目 次
- はじめに
- ダイナプレス工法
- 亀裂注入実験
- 現場注入システム
- 現場適用結果
- おわりに

#### はじめに

石油やLPGの水封式地下備蓄基地の建設においては、地下水位の低下を抑制し湧水量を低減させるためのグラウト技術が必要不可欠である。また、高レベル放射性廃棄物の最終処分施設建設においては、処分施設建設のために掘削される坑道及びその周辺の岩盤は、地下水の卓越した移行経路となる可能性があり、プラグやグラウトにより適切に処置する必要があるとされている<sup>1)</sup>。これら重要地下構造物においては、従来よりも厳密な止水注入技術が必要とされており、このような背景から、低透水性の微小亀裂に対しても注入が可能となる新たな技術の開発が望まれている。

一方、ダム建設ではより地質条件が悪く遮水性の低い基礎岩盤に構築されることが多くなり、また、トンネル工事では都市部などの土砂地山や脆弱な地質部を掘削することが増加しており、両者ともに、注入工の総工費及び総工期に占める割合が多くなってきている。そのため、従来よりも1孔あたりの単位注入量を増加させることにより、止水効果を増大させ、次段孔の低減が可能な効率的注入技術が求められている。

そこで、筆者らは、コストダウン、単位時間当たりの注入量増加、より微細なクラックへの注入を目的に、動的注入工法(ダイナプレス工法)を開発してきた<sup>2)</sup>。本工法は、一定の注入圧力に動的な圧力を適宜付加することで、高濃度のグラウト材料をより短時間で、より微細な間隙へ注入することのできる新しい岩盤注入工法であり、

これまでに、室内での亀裂注入実験及び実岩盤への注入実績から従来の静的注入工法に対する優位性を確認してきた。

本論文では、まずダイナプレス工法の概要を紹介するとともに、メカニズムの解明のために実施した室内での亀裂注入実験結果について報告する。さらに、実現場に適用するために新たに開発した現場注入システムについて述べ、実岩盤への適用実績とその分析結果について報告する。最後に、本論文で示した知見と考察を総括し、現状における問題点や今後の研究の方向性について述べる。

#### ダイナプレス工法

本工法は、Fig.1に示すように、一定の注入圧力に動的圧力を加えることを特徴としており、動的圧力の付加により、亀裂内の充填物除去やグラウト材粒子の目詰まり防止を発揮させている。動的圧力は、さらにグラウト材料の見掛け粘性を低下させ、流動性を増加させる効果も同時に生じさせている。これらの結果、亀裂内の圧損が軽減され、同濃度のグラウトであれば総注入量も増加し、より微細な亀裂への注入も可能となる。また、高濃度のグラウトを注入した場合には、総セメント注入量を増やしつつ総注入時間を短縮することができ、工期短縮に貢献することができる。このとき、ダムの基礎岩盤処理やトンネルの止水注入では、高次の注入孔数を軽減できる効果ももたらし、その場合はコスト、工期ともにさらなる縮減が期待できる。

以下に、ダイナプレス工法の特長を示す。

- 同配合であれば、より多くのグラウト材を注入できる
- より微細な亀裂への注入が可能となる
- 富配合のグラウト注入が可能となる
- 止水性(品質)の向上が期待できる
- 高次の追加孔の削減が可能となり、コスト・工期の縮減に貢献できる

1)東北支店  
2)京都大学大学院 教授

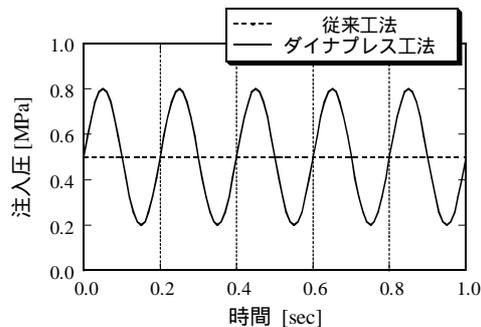


Fig.1 Difference between conventional and DynaPress method

・亀裂注入実験

ダイナプレス工法について、動的圧力による粘性低下と目詰まり防止効果について検証を行うことを目的に、亀裂模型を用いた室内注入実験を実施した<sup>3)</sup>。

1. 実験装置

Fig.2 に実験装置を示す。図に示すとおり、エアシリンダから供給される定常圧に対して、グラウトラインの途中に設けられた動的圧力伝達部において 動的圧力を付与するという形式を採用している。動的圧力はサーボシリンダからオイルに伝達され、さらに動的圧力伝達部に設置されたゴムチューブを介してグラウト材に付与される。サーボシリンダからは最大 50Hz の動的圧力を付与させることが可能である。亀裂模型においては、鏡面仕上げしたステンレス板 2 枚を所定の厚さの磷青銅を挟みこみ抑え枠で緊結することで、任意の亀裂幅に設定できるようになっている。今回の実験では、亀裂厚さは比較的微細だと判断できる 0.1mm(100 $\mu$ m)に固定した。流路長は 2m,流路幅は 160mm とした。計測については、注入口付近に初期圧の測定用に間隙水圧計を 1 個、亀裂内の流路方向に間隙水圧計を 8 個、吐出口下には流量測定を目的として排出液の重量を測定する重量秤(ロードセル)を 1 個配置した。各データは、2.5~5.0msec 間隔でサンプリングした。

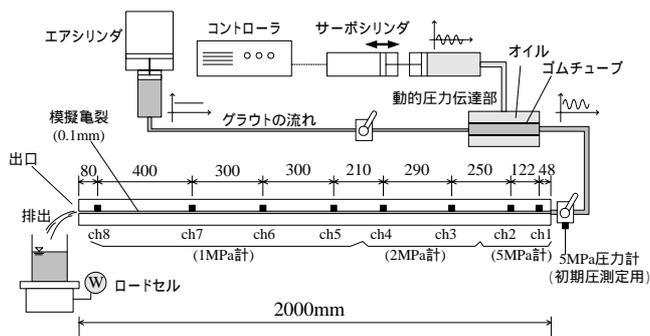


Fig.2 Schematic view of test device

2. 粘性低下効果の確認実験(シリーズ)

(1) 実験条件及び実験ケース

まず、動的圧力による粘性低下効果を確認するために、亀裂模型を用いた注入実験(シリーズ)を実施した。注入材料については、通常であれば、実岩盤での注入工を想定してセメントミルクを採用することが考えられるが、グラウト粒子の影響のうち、目詰まり防止効果の影響を排除するため、水溶性のセルロースを採用することとした。同セルロースは、溶解させる量に応じて粘性を変化させる

ことができ、同実験では、各種グラウト配合(W/C=8.0, 2.0, 1.0, 0.8)における粘性(1.5, 2.7, 15.0, 28.0mPa $\cdot$ s)に一致するように調整した。なお、同範囲では事前検討により、ニュートン性流体と近似しても問題ないことを確認している。その他の実験条件については、Table 1 に示すとおり、ケース 2~4 では動的圧力の振幅の影響を、また全ケースについて周波数の影響を検討できるように設定した。粘性低下の効果については、出口部に設置したロードセルの測定結果を基に導いた流量増加率によって評価を行った。

Table 1 Test cases of Series

ケース	粘性	動的圧力	周波数
	mPa $\cdot$ s	MPa	
1	1.5	1.0 $\pm$ 0.3	
2		1.0 $\pm$ 0.1	
3	2.7	1.0 $\pm$ 0.3	0(Static),
4		1.0 $\pm$ 0.5	0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 20.0, 30.0
5	15	1.0 $\pm$ 0.3	
6	28	1.0 $\pm$ 0.3	

(2) 実験結果

実験結果を Fig.3, Fig.4 に示す。両図から、まず、動的圧力によって流量が増加していること、すなわち材料の見掛け粘性が低下していることが確認できる。さらに、動的圧力の周波数による影響は実験の範囲内ではあまり大きくないということが分かる。また、Fig.3 からは、粘性が高くなるほど、粘性低下の効果が大きいことが分かる。このことから、より富配合のグラウトを用いた方がダイナプレス工法による効果が大きいと推測される。なお、Fig.4 からは、動的圧力の振幅が大きいほど流量増加率が大きく、すなわち見掛け粘性が低くなっていることが分かる。

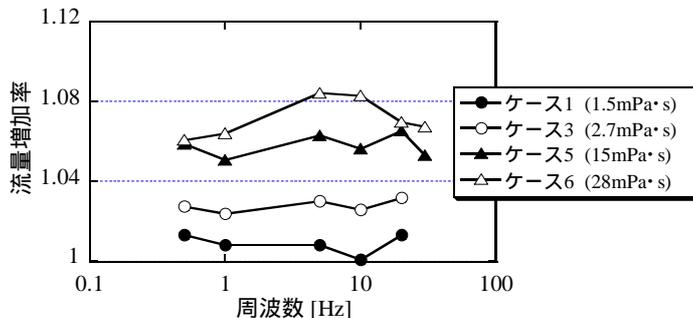


Fig.3 Increase ratio of flow rate (focused on viscosity)

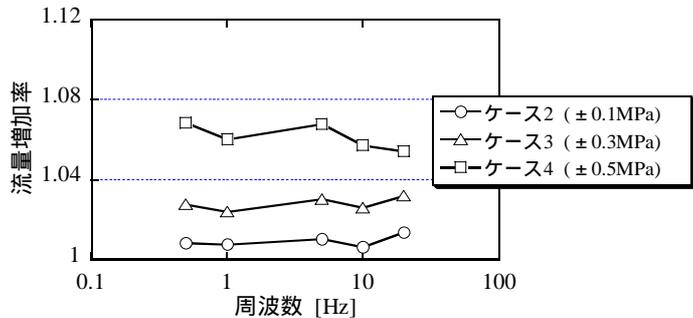


Fig.4 Increase ratio of flow rate (focused on amplitude)

### 3. 目詰まり防止効果の確認実験(シリーズ)

#### (1) 実験条件及び実験ケース

次に、動的圧力による目詰まり防止効果を確認するために、亀裂模型に障害物を設置した条件で注入実験(シリーズ)を実施した。実岩盤では、シリーズのように一定の厚さの亀裂が分布していることはなく、亀裂厚さや表面粗度についてバラツキがあるのが通常であり、目詰まりのトリガーとなるような箇所が数多く存在している。このような背景からも、目詰まり防止効果の果たす役割が大きいということが分かる。そこで、まず目詰まりの模擬として、亀裂内に堆積を起こす条件を設定することとし、Fig.5 に示すような障害物を設置した。さらに、Table 2 に示すように、実際にグラウチングで用いるセメント材料を用いることとし、低圧レベルで富配合のグラウト材を注入することとした。実験ケースは、Table 3 に示すとおりであり、粒度の違いを検討するため、普通セメントと超微粒子セメントを使用し、それぞれ静的・動的条件下で実験を実施した。なお、普通セメントを用いた場合は、最大粒径が亀裂厚さより大きくなるため、亀裂厚さ 0.1mm に近い 0.075mm アンダーに普通セメントの最大粒径を調整して使用した。

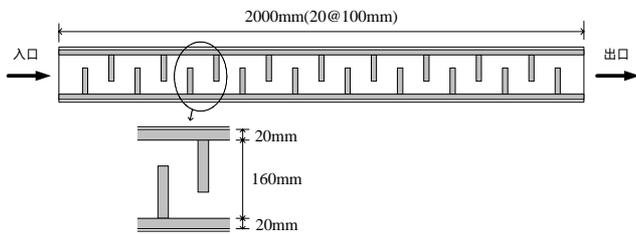


Fig.5 Arrangement of obstacles in fracture model

Table 2 Test specifications of Series

使用材料	普通セメント, 超微粒子セメント
注入材	最大粒径 0.075mm(普通), 0.010mm(超微粒子)
	配合 W/C=2.0
注入仕様	圧力 静的(0.5MPa) 動的(0.5±0.3MPa)
	周波数 5 Hz(動的のみ)

Table 3 Test cases of Series

ケース A	超微粒子セメント(静的注入)
ケース B	超微粒子セメント(動的注入)
ケース C	普通セメント(静的注入)
ケース D	普通セメント(動的注入)

#### (2) 実験結果

まず、ケース A, B についての実験結果を Fig.6, Fig.7 に示す。なお、ケース A, B では完全な目詰まりが生じる傾向が見られなかったため、準備した注入材が全て注入された時点で注入終了とした。Fig.6 は排出されたグラウト重量の経時変化を示しており、静的と動的

的ではほぼ同じ傾向を示している。一方、Fig.7 は排出されたセメント重量の経時変化を示しているが、同図から動的圧力を付加したケース B の方が多量のセメント分を排出していることが分かる。これは、ケース B の方が富配合のセメントミルクが排出されたことを意味し、粘性低下の効果では説明困難な現象であることから、亀裂内でのセメントの堆積が軽減された結果であると思われる。また、測定されたグラウト密度から注入された時間の平均的な配合を算定したところ、ケース A では W/C=3.0、ケース B では W/C=2.3 となっており、動的のケースの方が元の配合(W/C=2.0)に近い値を示しており、同考察を裏付ける結果となった。

次に、ケース C, D についての実験結果を Fig.8, Fig.9 に示す。ケース C については、注入後 50 分経過した時点で完全に目詰まりが生じ、出口側からの排出がストップしたため、その時点で注入終了とし、ケース D については準備した材料を全て注入した時点で実験終了とした。Fig.8, Fig.9 については、Fig.6, Fig.7 と同様に、グラウト重量とセメント重量の経時変化である。両図から、普通セメントのケースでは、超微粒子セメントと比較して徐々に注入重量が少なくなっていることが顕著に現れており、粒子が大きい分、亀裂内に堆積が起こりやすくなっていることが分かる。このような実験条件下では、Fig.9 に示すように、動的圧力の付加による効果はさらに顕著に現れており、前述のようにグラウト工事における高次孔の削減といった効果を裏付ける結果と言える。また、ケース A, B と同様に注入された平均的な配合を算定したところ、ケース C, D においても、それぞれ W/C=10.1, 2.5 となっており、上記の考察及び動的圧力付与の効果も裏付ける結果となった。一連の結果は、同配合のグラウト材を注入した場合、動的圧力を付与した方が、ある定まった配合の材料を、より遠方まで注入でき、より微細な亀裂にも注入できることを示しているものと思われる。

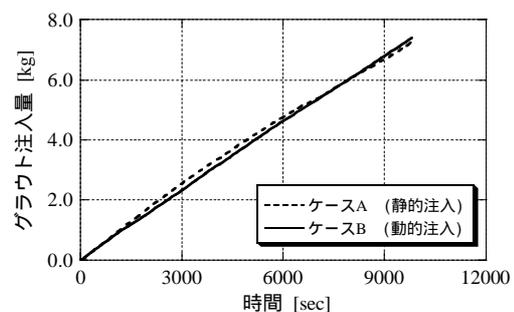


Fig.6 Total weight of discharged grout in Case-A and Case-B

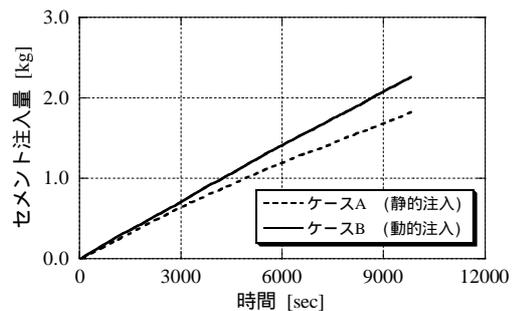


Fig.7 Total weight of discharged cement in Case-A and Case-B

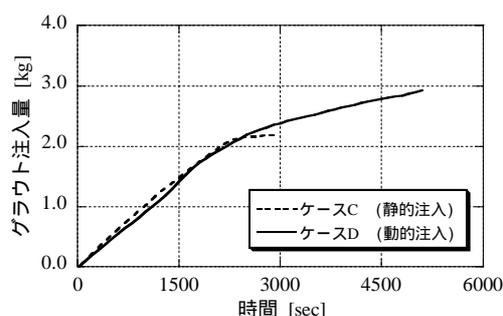


Fig.8 Total weight of discharged grout in Case-C and Case-D

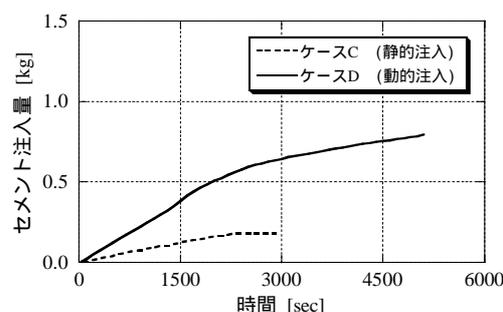


Fig.9 Total weight of discharged cement in Case-C and Case-D

## 現場注入システム

### 1. システム概要

実岩盤を対象としたグラウト注入工事に適用できるように、Fig.10に示す現場注入システムを開発した<sup>4)</sup>。本システムは、一定圧力でグラウトを供給する定圧グラウトポンプから注入孔内までのライン上に、動的圧力発生装置を付加することで、定圧のグラウトに任意周波数の動的圧力を与えることを実現させている。定圧グラウトポンプは、インバータ制御モータで駆動する3連式単動ピストン型であり、一定圧力、流量の供給が可能となっている。動的圧力発生装置の状況は、発生装置に内蔵した圧力センサーからの信号をデータロガーによりデジタルデータに変換し、リアルタイムにコンピュータのLCD表示にて波形を確認することができ、注入状況に応じて即座に条件変更が可能である。グラウト材の製造は、微粒子系セメントの高濃度、高粘性のグラウトの練り混ぜが可能な高速ミキサーを使用した。

本システムでは、耐圧ゴムホースによる動的圧力の減衰を防止する目的で、Photo 1に示す動的圧力発生装置のポンプ側にステンレス製フレキシブル管を、注入孔側にSGP鋼管を採用している。また、ポンプや検出器への動的圧力付与による損傷を避けるため、動的圧力発生装置よりポンプ側に逆止弁を設けている。

### 2. 追加システム

ダイナプレス工法は、従来工法のライン上に動的圧力発生装置及び管理計測システムを追加するだけの非常にシンプルなシステムで構成されており、余分なスペースをほとんど必要としない。動的圧力発生装置は、往復運動をするプランジャー部及び可撓性隔膜による動的圧力伝達部により構成される。両者を結ぶ回路には作動油が充填され、プランジャー部で生じた容積変化量を動的圧力伝達部に伝えられるようになっている。同装置では、現在、最大50Hzの動的圧力が安定して付与される。なお、動的圧力伝達部には、例えば

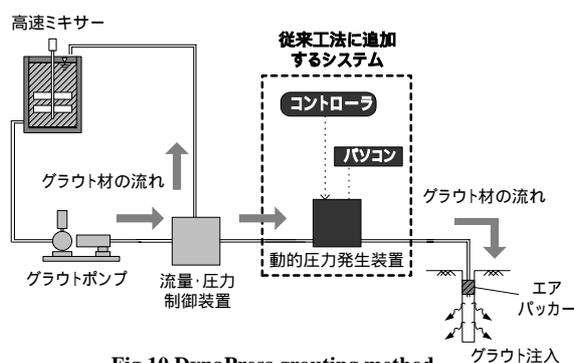


Fig.10 DynaPress grouting method

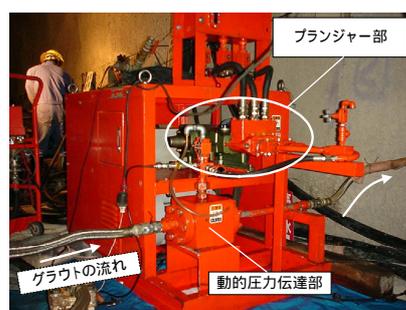


Photo 1 Generator of dynamic pressure

グラウト工で用いられる圧力計プロテクターの利用が可能である。管理計測システムについてもシンプルな構成であり、動的圧力付与の操作も、選択するプランジャー数を決定し、ダイヤル調整で周波数を変えるといた単純な方法を採用している。したがって、通常のグラウト工事経験者なら誰でもすぐに使えるシステムになっている。

## 現場適用結果<sup>5)</sup>

### 1. 試験概要

実岩盤におけるグラウト注入は、花崗岩体に掘削した長さ約75mのボーリング(φ66)孔に対して実施された。注入状況をPhoto 2に示す。注入域における地質は、Fig.11に示すとおり、アプライトの貫入岩付近と断層部で高透水域を示すものの、それ以外ではおおむね10Lu以下の低透水域となっている。

グラウト注入は、1ステップ(5m)削孔した後、パッカーをかけた先端5mを注入するフォアステップ形式で実施した。注入前には対象岩盤の透水性を把握するため、透水試験を実施してルジオン値を把握している。注入材料としては、超微粒子セメント(密度3.0g/cm<sup>3</sup>、平均粒径3.0μm)を用いたセメントグラウトを採用した。また、注入流量が0.1l/minとなつてから30分間に増加が認められなければ注入終了とした。なお、周辺へのリーク防止のため、従来工法(静的注入工法)の定圧レベルを0.5MPaと比較的小さい値に設定しており、ダイナプレス工法では定圧レベルに対し±0.3MPaの範囲で動的圧力を付与した。また、配合については、第1回では低透水性岩盤の開始配合として一般的なW/C=8の配合で、第2回についてはそれよりも富配合のW/C=4を設定した。周波数については、最適値として明確な傾向は室内試験において確認できなかったことから、安定して稼働が可能な5~10Hzの範囲で任意に設定した。以上の仕様についてTable 4に示す。



Photo 2 Application of DynaPress method to actual construction site

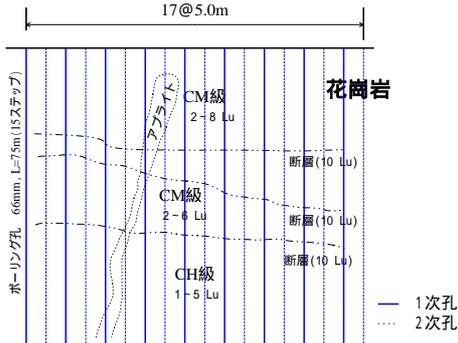


Fig.11 Geological profile in actual construction site

Table 4 Specifications of actual grouting

	W/C	従来工法 (静的注入工法)	ダイナプレス工法 (動的注入工法)
第1回	8	50 ステップ	44 ステップ
第2回	4	4 ステップ	4 ステップ

備考) 1 ステップは 5 m

## 2. 試験結果

### (1) 総注入量と注入完了時間

まず、従来工法とダイナプレス工法の差異について比較検討を行う。Fig.12 に、第1回の注入試験における単位セメント注入量（ボーリング区間 1 m 当りに注入されたセメント重量）とルジオン値の関係を、Fig.13 に注入完了時間とルジオン値の関係を示す。これらから、今回の注入条件においては、ダイナプレス工法の方が、従来工法に比べて、より短時間でより多くのセメント量を岩盤内に注入できたということが分かる。

次に Fig.14 において、第1回の注入条件の中での、両工法の代表的な注入チャート（時間 流量曲線）の比較例を示す。同図では、ダイナプレス工法適用区間ではルジオン値が 5.63 と、従来工法の区間での値 7.76 よりも透水性が低くなっているにもかかわらず、セメントグラウトの総注入量では従来工法よりも多くなっていることが分かる。セメントグラウトは同配合であることから、岩盤内にセメントがより多く注入されたということが分かる。一方、注入完了時間は短縮されており、総注入量の増加は、動的圧力によりセメント

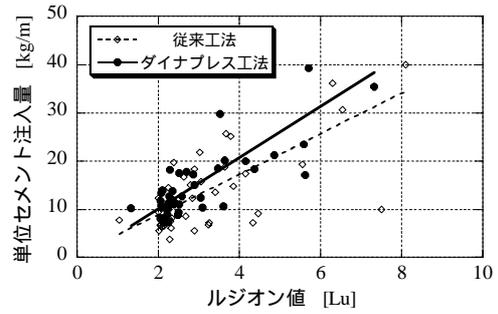


Fig.12 Unit injected-grout with Lugeon value in No.1

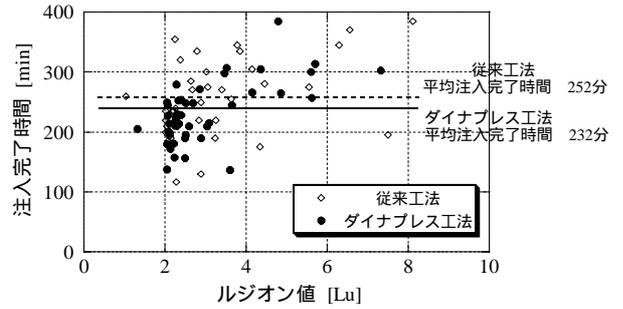


Fig.13 Total injection time with Lugeon value in No.1

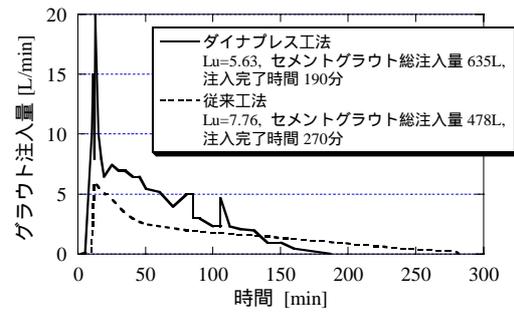


Fig.14 Comparison of grouting-charts in No.1

グラウトの流動性が向上し、初期の単位時間あたりの注入量が大幅に増加したためであると考えられる。

### (2) 富配合適用に関する検討<sup>6)</sup>

一般に、ダムグラウトでは、10Lu 以下の岩盤に対しては開始配合として W/C = 8, 10 といった比較的貧配合のセメントグラウトが用いられる。もしこれらより高濃度のグラウトを開始配合に用いて、最終的なセメント総注入量が増加すれば、フリージングの少ない品質の高い注入が可能となる。また、一般に高濃度のグラウトを注入すると、時間短縮が行えることから効率的なグラウチングが可能となる。そこで、事前試験として B 型粘度計を用いた粘度試験を実施したところ、W/C = 8 及び W/C = 4 ではそれぞれ粘性が 1.5 mPa·s, 1.8 mPa·s であり、粘性から判断した流動性についてはほとんど差異のないことがわかった。さらに、Fig.2 の亀裂模型（亀裂厚さ 100 μm）を用いて W/C = 8, 4 での注入量比較実験を行ったところ、W/C = 4 では W/C = 8 の場合に比べて、単位時間あたり、セメントミルク注入量は重量比で 3% 減となったが、セメント自体の注入量は 1.75 倍になるという結果になった。この結果から、W/C = 4 の方が、低透水性岩盤においても効率的であると考え、第2回の注入試験では、2 ~ 3 Lu の極めて低ルジオン域に

対して適用を行った。Fig.15 に、同範囲における単位セメント注入量とルジオン値の関係を示す。図中の は第2回の結果を、は第1回のうち2～3Luの範囲での結果をプロットしたものである。同図から第2回のデータ数が少ないため 厳密な比較はできないが、おおむね第2回の方が上回っていると判断できる。この結果より、一般に低透水性岩盤の注入に対しては富配合のグラウトは不適當であるとされてきたが、今回の結果では、超微粒子セメントを使用した場合、2～3Lu程度の低透水性岩盤でもW/C=4の方が単位セメント注入量に関して優位性があることが確認できた。また、動的圧力の付与効果に着目すると、富配合のW/C=4ほど動的注入の効果が発揮されていることがわかり、室内における亀裂注入実験結果に一致するものであった。このことから、従来の開始配合をより富配合にする方が効率的であること、またダイナプレス工法を用いることで、さらに富配合の条件で適用できる可能性があることが示された。

ここで、ダイナプレス工法の効果についてさらに詳しく検討する。Fig.16は、第2回の低ルジオン域(2～3Lu)における両工法の注入チャートを比較した結果である。同図の時間 流量曲線は、両工法のそれぞれ4ステップ分のデータを平均したものである。同図から、ダイナプレス工法が、単位時間あたりの注入量が増加するという傾向についてはFig.14と同様だが、注入完了時間については、従来工法よりも延びるという結果となった。これは、比較的富配合であるにもかかわらず、動的圧力により目詰まりが遅延され、注入し続けることができたためではないかと考えられる。これらの試験結果から、今回Fig.14,16に示したように、注入完了時間については、状況によってはダイナプレス工法の方が長くなる場合もあるが、注

入されるセメント量については、配合やルジオン値によらず、多くなることが分かった。

．おわりに

低透水性岩盤部に高濃度のグラウト材をより確実に注入可能な工法を開発すること、遮水性の低い岩盤を対象としたグラウト注入に対しコストダウンと工期短縮を可能とする注入工法を開発することを目的に、従来の静的注入工法に動的圧力を付与したダイナプレス工法を開発した。

まず、室内での亀裂モデルを用いた注入試験により、粘性低下や目詰まり防止の効果を確認できたので、現場注入システムを開発後、実現場への適用を図った。

その結果、10Lu以下の岩盤において、総注入セメント量の増加が確認できたが、注入完了時間に関しては、ルジオン値やグラウト配合などのパラメーターから判断すると、必ずしも全ての場合短縮するとは限らないことも確認できた。また、富配合に着目した結果から、Lu=2～3の極めて低ルジオン域においても、従来は不適當と判断されるW/C=4といった富配合の方が、W/C=8の場合よりも有利であるという結果を得た。また、室内試験結果と同様、富配合の方がダイナプレス工法の効果が高いことも確認できた。

今後は、さらに現場注入実績を増やすとともに、室内の模擬亀裂注入実験を実施し、シミュレーション解析によるアプローチもあわせて、岩盤状況に応じた最適な注入仕様及び注入特性について検討していくつもりである。また、セメント注入量の多さだけでは止水グラウトとしての評価は不十分であり、注入範囲の確認や止水性向上の程度についても検討を行っていく必要がある。その他、注入システムや新しい注入材料の開発もあわせた統合技術に昇華し、LPG地下備蓄基地や放射性廃棄物処分施設の建設に対して、総合的なグラウト技術の向上を目指し研究を進めていく予定である。

#### 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) 伊達健介ほか；低透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講演論文集、(2002.1),G01
- 3) Date K. et al; Development of dynamic grouting technique for the ground improvement, ITA2003, (2003.4), pp.929-935.
- 4) 山本拓治ほか；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, (2002.8), pp.25-29.
- 5) 脇田伸吾ほか；低透水性岩盤における動的注入工法の基礎的検討、岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集、第32回、(2003.1), pp.197-202.
- 6) 日比谷啓介ほか；動的注入(ダイナプレス)工法の開発、電力土木, No.304, (2003.3), pp.161-163.

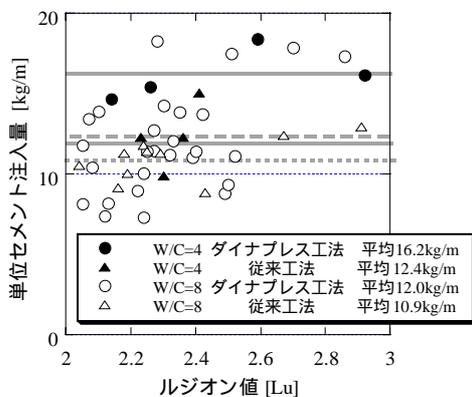


Fig.15 Unit injected-grout with Lugeon value in low-permeable rock in No.1, No.2

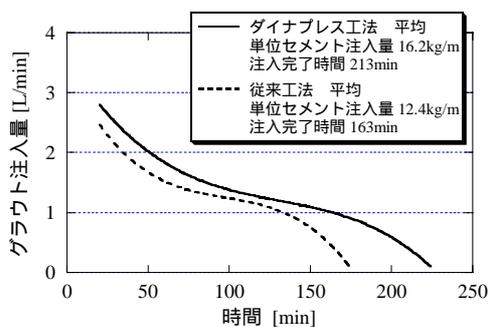


Fig.16 Comparison of grouting-charts in low-permeable rock in No.2