

低透水性岩盤における動的注入工法の基礎的検討

Evaluation of Dynamic Grouting System Applying to Rock Mass with Low Permeability

脇田伸吾^{*}, 伊達健介^{*}, 山本拓治^{*}, 黒川義民^{**}, 水戸義忠^{***}, 青木謙治^{***}

Shingo WAKITA, Kensuke DATE, Takuji YAMAMOTO, Yoshitami KUOKAWA, Yoshitada MITO, Kenji AOKI

Effective grouting system for rock mass with low permeability needs to be developed in order to prevent a leakage of water, oil or dangerous substance etc., especially in constructing underground storage plant or repository of radioactive waste.

Dynamic grouting method is characterized by adding oscillating pressure to constant grouting pressure for injection. Authors have developed the dynamic grouting system as a more effective one than the present, and on-site grouting tests were carried out in rock mass with low permeability. In this paper, first, the outline of this system is mentioned. Furthermore, the result of on-site grouting tests and injection tests in laboratory is reported, especially about the superiority to static grouting in rock mass with low permeability.

Key Words : dynamic grouting system, permeability, Lugeon test, injection

1. 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¹⁾。これら重要地下構造物においては、これまでのトンネルより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。

動的注入工法は、放射性廃棄物の地層処分技術の開発を目的として実施された、STRIPA Projectにおいて提案された注入工法であり、一定の注入圧力に動的な圧力を付加することにより、微細な亀裂にも高粘性、高濃度のグラウトが注入可能であるという報告がなされている²⁾。しかし実用的な動的注入装置は未開発であったため、筆者らは長時間注入可能な実機を開発し、動的注入工法の注入特性や効果(優位性)を確認するため、原位置試験を行いその有効性を確認してきた³⁾。

本論文では、まず動的注入工法の概要を紹介するとともに、現場注入システムについて述べる。次に、今回新たに実施した原位置注入試験結果について報告し、動的注入工法の注入特性について検証した結果を記述している。また原位置試験と並行して行った粘性流体を用いた室内模型実験について説明し、模型実験から得られた動的注入工法の注入特性について検証する。最後にまとめとして、今回の原位置注入試験の意義、それから得られた知見と考察、さらに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。

^{*} 正会員 鹿島技術研究所 土木技術研究部

^{**} 学生会員 京都大学大学院 工学研究科資源工学専攻

^{***} 正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科資源工学専攻

2. 動的注入工法の概要

動的注入工法は、一定の注入圧力に動的な圧力を付加することにより、従来よりも高濃度、高粘性のグラウトを、微細な亀裂にも注入させることができると考えられている工法であり、これまでに筆者らは図-1、写真-1 に示すような注入装置を開発している⁴⁾。同システムは、脈動の少ない定圧グラウトポンプにより一定圧力でグラウトを供給する注入孔内までのライン上に、脈動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脈動を与えることを実現させている。

定圧グラウトポンプは、インバーター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。脈動発生装置はプランジャ型ポンプによりオイルをアクチュエータに送り込み脈動を発生させる機構である。脈動発生装置の状況は、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ーのLCD表示にて波形を確認することができ、注入状況に応じ、即座に条件変更が可能である。グラウト材の製造は、高濃度、高粘性の超微粒子系セメントが、混練り可能な高速ミキサーを使用した。

本システムでは、注入前の事前脈動圧確認試験から、通常の注入工事で用いられる耐圧ゴムホースでは、ホース長が30mにも及ぶと脈動の減衰が非常に大きくなること、また脈動発生時には脈動発生装置よりポンプ側のホースが大きく振動し、配管そのものとアクチュエータの一次側の定圧ポンプに損傷を与えることが懸念されたため、アクチュエータの一次側に逆止弁を設け、逆止弁から脈動発生装置までをステンレス製フレキシブル管とした。なお、逆止弁は脈動を注入側へ安定して効果的に付与する役割も同時に果たしている。

3. 原位置注入試験

3.1 原位置試験概要

今回の原位置注入試験は、これまでと同地区³⁾に設置した、長さ75mの2本のボーリング孔(φ43)を対象に実施した。今回注入を行った地点の地質は、中生代白亜紀の新鮮な花崗岩であるが、一部茶褐色に風化した部分が混じっている。岩盤等級はCL級からCH級が混在しているが、約70%程度はCM級の硬岩である。またコアの亀裂間隔は10~50cm程度で、比較的小さく小規模な破碎部が1孔につき5箇所程度見られたが、ボアホールカメラによる孔壁観察結果では、その他のコアの亀裂は石英脈や方解石脈で密着していたため、透水性は低いことが予想された。グラウト注入は、5m掘削した後、パッカーをかけ先端5mを注入するフォアステップ形式で実施した。注入前には必ず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た。その結果、今回原位置試験を実施

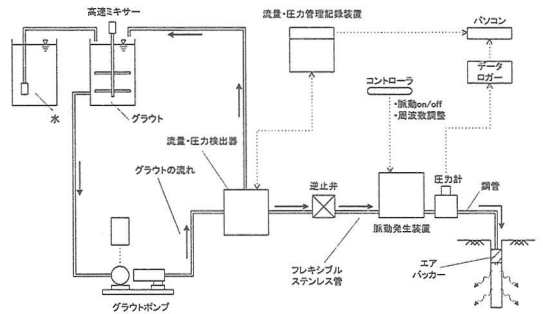


図-1 現場注入システム

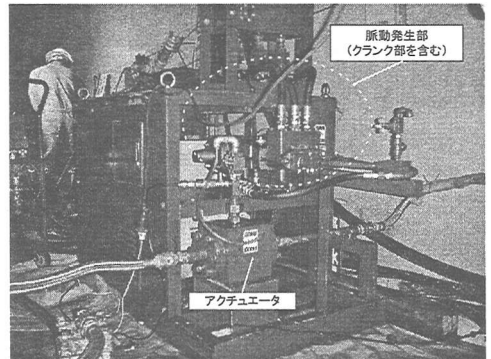


写真-1 脈動発生装置

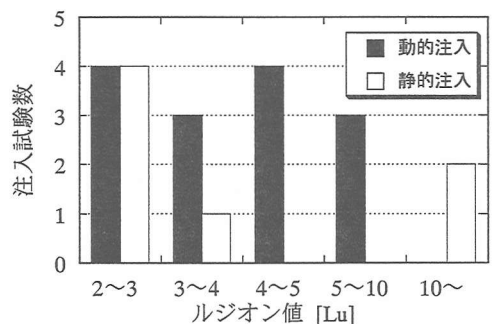


図-2 注入試験数とルジオン値の関係

した岩盤は図－２に示すように、大部分がルジオン値 5 以下の低透水性の岩盤であった。注入は表－１に示す材料、配合にて行い、注入量が 0.1L/min となつてから 30 分間に流量の増加がなければ注入終了とした。なお注入途中での配合切替は行っていない。注入圧に関しては、静的注入時は 0.5MPa、動的注入時は注入圧 0.5MPa に±0.3MPa の圧力振幅を付加し、周波数については脈動発生装置が同圧力範囲において安定して稼働可能な最小値である 5Hz を下限値として採用し、前回の原位置試験で最も注入効率が高かった 10Hz を上限値として実施した。

3.2 動的注入工法と静的注入工法の注入実績の比較

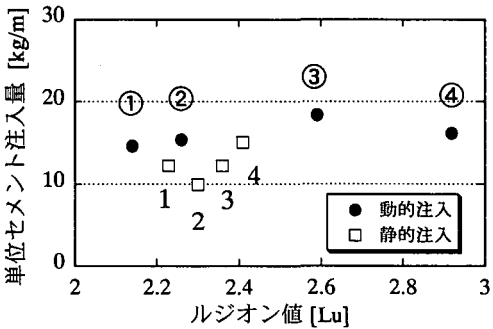
表－２ 注入試験結果及びコア観察結果

		ルジオン値 [Lu]	単位セメント注入量 [kg/m]	注入時間 [min]	平均RQD [%]	最大コア長 [cm]
動的注入	①	2.1	14.7	220	20	14
	②	2.3	15.4	211	20	17
	③	2.6	18.4	222	33	20
	④	2.9	16.2	198	30	19
静的注入	1	2.2	12.3	160	33	16
	2	2.3	9.9	149	10	11
	3	2.4	12.3	179	25	21
	4	2.4	15.0	165	23	18

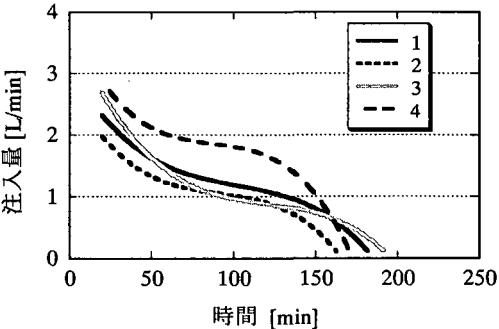
本論文では低透水性岩盤に対する動的注入の効果を検討するため、図－２に示した 2～3 ルジオンでの動的注入 4 ケース、静的注入 4 ケースの計 8 ケースの試験結果に着目して分析を行った。表－２はその 8 つの孔における注入試験結果及びコア観察結果であり、図－３はルジオン値と単位セメント注入量の関係について示したものである。図－３より、動的注入の方が全体的に単位注入セメント量が多くなっていることがわかる。これはすなわち、動的注入の方が岩盤亀裂内により多くのセメントが充填されたことを示しており、動的注入工法の優位性が示されたと言える。しかし動的注入工法の効果のメカニズムは、はっきりとは解明されておらず、その要因を知ることは非常に重要である。そこで、次にそれぞれの注入ケースについて注入チャート（時間－注入量曲線）を検証した。図－４、５は静的と動的注入における注入チャートである。図－４に示すように静的注入時の注入チャートの傾向は、注入時間が 150～200 分間で終わっており、ほぼ同様のルジオン値を対象としていることもあり、注入量の時間変化の傾向はよく似ていることがわかる。一方図－５に示す動的注入の注入チャートの傾向は、どのケ

表－１ 超微粒子セメント物性及びセメント配合

セメント物性	種類	超微粒子セメント
	比表面積	12600cm ² /g
	平均粒径	3.0μm
配合	W/C	400%
	混和剤の種類、添加量	高性能減水剤をセメント重量の1.5%添加



図－３ ルジオン値と単位セメント注入量の関係



図－４ 静的注入 4 ケースの時間－注入量曲線

ースも注入時間が 200 分以上伸びており、静的注入時のものに比べ注入量が減少していく傾きが緩やかであることがわかる。次に図-6 は図-4 の静的 4 ケースについての平均と、図-5 の動的の 4 ケースについての平均をプロットしたものである。図-6 からわかるように、明らかに動的注入の結果の方が静的に比べ、セメント注入量が多くなっているのがわかる。これは脈動圧によりセメントグラウトの流動性が向上し、その結果目詰まりが遅延され、注入時間が伸び、その分だけ注入量が増加したためであると考えている。今回、チェック孔等による止水改良後の透水性の評価は実施していないが、同程度の亀裂に対して、より多くのセメント粒子が注入できたということは、止水性も大きく改善されていると思われ、放射性廃棄物処分施設のような、止水性を最重要課題と考える岩盤空洞周辺へのグラウチングには、有効であると考えている。

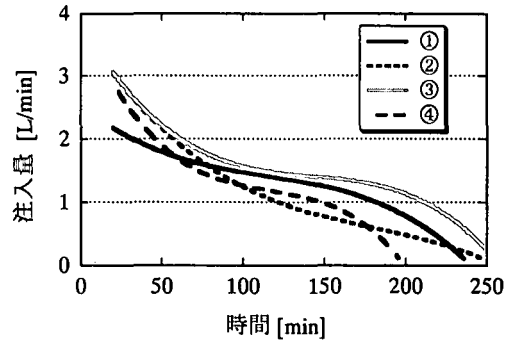


図-5 動的注入 4 ケースの時間-注入量曲線

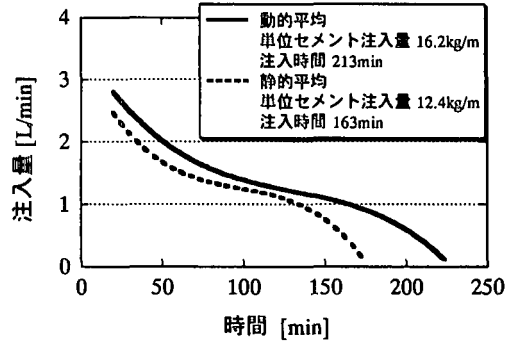


図-6 静的と動的についての平均の時間-注入量曲線

3.3 水セメント配合比の検討

従来までの原位置試験³⁾では、一般に行なわれている低透水部でのダム基礎グラウトの配合を参考に、 $W/C=8$ の配合でグラウト注入を実施してきたが、今回の原位置試験では水セメント比を $W/C=4$ で注入した。その変更理由は、 $W/C=8$ と 4 では B 型粘度計を用いた粘性試験結果が $1.5\text{mPa}\cdot\text{s}$ と $1.8\text{mPa}\cdot\text{s}$ であり、それほど粘性において差がなかったこと、別途実施した亀裂模型を用いた室内実験から、 $W/C=4$ の場合、単位時間あたりのセメントミルク注入量は $W/C=8$ に比重重量比で 3% 減となるが、セメント自体の注入量は 1.75 倍注入されたことより、注入性に関しても問題ないと判断したためである。また動的注入による高濃度、高粘性グラウト材の注入性についても検討する目的で、今回の注入試験では富配合とした。図-7 は前回と今回の原位置試験における静的と動的の注入結果のうち、2 ~ 3 ルジオンにおいての単位セメント注入量について比較したものである。前回の試験数は静的 17 回、動的 28 回であり、今回の試験数は静的 4 回、動的 4 回とデータ数が少ないため、厳密な比較はできないが、おおむね今回の注入結果の方が上回っていると考えられる。この結果より、一般には低透水性岩盤には富配合のグラウトは注入に対して不適当であるとされてきたが、少なくとも今回の結果では、超微粒子セメントを使用した場合、2 ルジオン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が多くなっていることが確認できた。また動的注入の配合の違いによる効果の差を見ると、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る。このことから、今回の原位置試験では、配合を高くして注入量を増やすことができ、さらに動的注入によりその傾向を高めることができたと考えている。

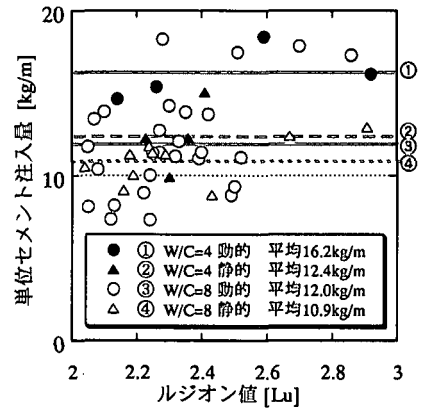


図-7 前回と今回の原位置試験における単位セメント注入量の比較

4. 室内亀裂模型実験

4.1 実験装置概要

原位置試験においては亀裂分布や亀裂幅、充填物など、さまざまなパラメータが存在するため、動的注入の最適仕様に関する検討はデータ数を多く得ることが出来ない限り非常に困難である。そこで動的注入の注入特性を解明するために、室内における模型実験を行った。図-8に注入試験システムの概要を示す。図に示すとおり、注入口に与える振動圧は、圧力変換用シリンダからの定常圧に、サーボシリンダからの振動成分が脈動装置を介して提供される。圧力

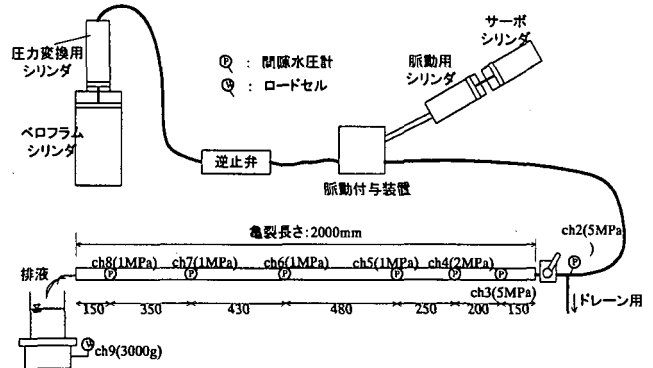


図-8 実験注入試験システム

変換用シリンダでは最大約 2MPa の圧力を、サーボシリンダでは最大 50Hz の振動成分を注入流体に加えることが可能である。亀裂模型では、2 枚の鋼製ブロックの表面を鏡面仕上げしたステンレス面の間に所定の厚さの銅製スペーサーを挟み込み、任意の亀裂幅を与える事が可能である。流路長は 2m、幅 20cm であり上部鋼製ブロックには図に示した位置に間隙水圧計を設置した。また注入口付近にも間隙圧計を設置し、注入圧や動的注入時の振幅を管理し、排出口下には流量測定を目的として、排出重量を測定する重量秤（ロードセル）を設置した。各データは 2.5~5msec 間隔でデータロガーによりサンプリングした。

4.2 実験条件

注入材については、原位置試験と同じ超微粒子セメントミルクを用いることが考えられるが、超微粒子分の間隙への充填過程や硬化の影響が複雑であるため、今回の実験の材料については粘性のみをパラメータとし、容易に粘性の調整が可能な水溶性セルロース溶液を用いて実験を行った。セルロースの水溶液の粘度については、 $W/C=0.8, 1, 2, 8$ の超微粒子セメント注入材の粘性を測定した結果と同様に粘性 $28, 15, 2.7, 1.5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ とした。注入圧力については、静的注入は 1MPa、動的注入は脈動圧の振幅による影響についても調べるため、平均圧力 1MPa に 3 通りの振幅（ $\pm 0.5, \pm 0.3, \pm 0.1 \text{ MPa}$ ）を与え試験した。周波数については 0.5, 1, 5, 10, 20, 30Hz を設定した。亀裂幅については低透水性岩盤を想定して今回は 0.1mm とした。

4.3 実験結果

図-9, 10 は、4 種類の粘性のセルロースを用いて、脈動圧の振幅を一定にした時（振幅 $\pm 0.3 \text{ MPa}, \pm 0.5 \text{ MPa}$ ）の粘性の違いによる流量増加率の違いを示したものである。流量増加率とは、静的注入時の単位時間あたりの注入量を 1 とした時の動的注入量がどれだけ増加したかを示したものである。図-9, 10 より、振幅を一定値に固定すると、粘性が高くなればなるほど、脈動圧により見かけの粘性が低下し、動的効果が顕著に表れる結果となった。この結果は、図-7 の原位置試験において富配合（高粘性）ほど動的注入効果が顕著となった結果と一致している。図-11, 12 は、粘性を一定にした時（粘性 $2.7 \text{ mPa}\cdot\text{s}, 15 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ）の 3 種類の振幅の違いによる流量増加率の違いを示したものである。図-11, 12 より粘性一定に固定すると、脈動圧の振幅が大きいほど動的効果は増し、流量増加率が大きくなることがわかった。また図-9~12 において動的の周波数に関しては、今回実施した 0.5Hz~30Hz においては、それほど顕著な差はなかった。セルロースを用いた実験では、粒子が完全に溶解した溶液型であるため、セメント粒子をもつグラウトとは動的効果の表れ方に若干違いがあるのではないかと考えられる。そこで今後はセメントグラウトを使用して実験を実施し、その場合の動的注入特性を検証していく必要があると考える。

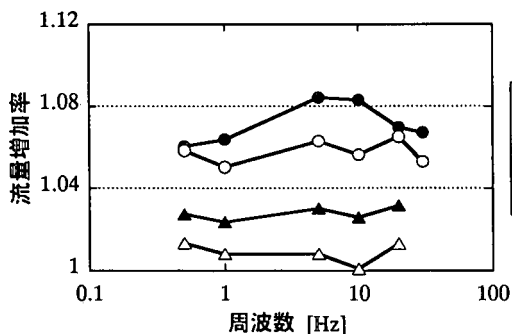


図-9 振幅 $\pm 0.3\text{MPa}$ における
粘性の違いによる流量増加率の関係

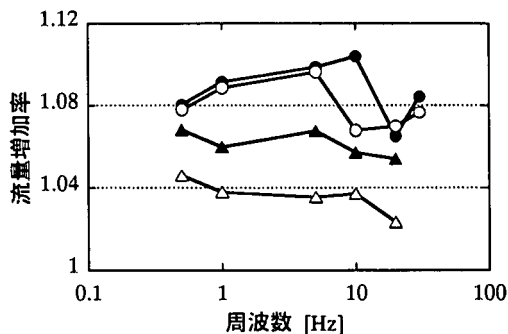


図-10 振幅 $\pm 0.5\text{MPa}$ における
粘性の違いによる流量増加率の関係

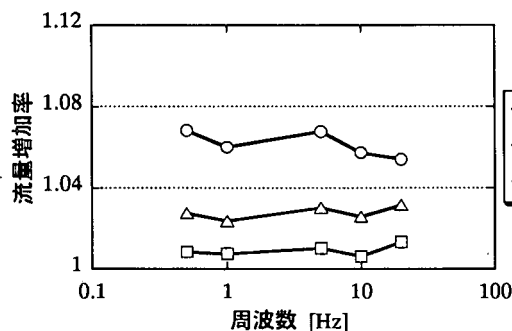


図-11 粘性 $2.7\text{mPa}\cdot\text{s}$ における
振幅の違いによる流量増加率の関係

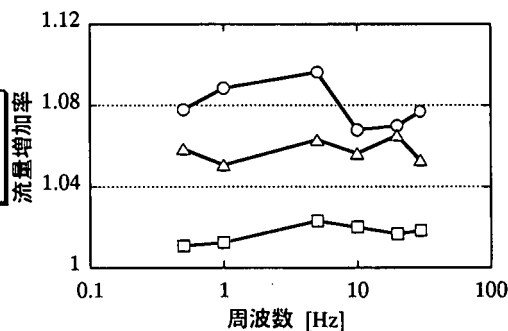


図-12 粘性 $15\text{mPa}\cdot\text{s}$ における
振幅の違いによる流量増加率の関係

5. まとめ

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するための動的注入工法を開発し、同じ低透水性岩盤（2～3Lu）のサイトで原位置試験を実施した。その結果、動的注入工法を適用すれば、より多くのセメントを注入できることを確認した。また注入チャートの検討結果から動的注入工法の特徴として、流動性の向上により、目詰まりの発生が遅延され、セメント注入量の増加が期待できることを確認した。

セルロースを用いた室内実験においては、粘性が高いほど、また振幅が大きいくほど動的な効果が発揮されることがわかり、粘性の高い注入材に対してより効果を発揮することがわかった。

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も実施して、岩盤状況に応じた最適な注入仕様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、注入効果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などを行い、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) R. Pusch：Executive Summary and General Conclusions of the Rock Sealing Project, STRIPA PROJECT TR92-27, 1992
- 3) 伊達, 山本, 桑川, 大場, 青木：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
- 4) 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