

# 粒状体個別要素法を用いた 動的注入におけるグラウト充填機構の検討

青木謙治<sup>1\*</sup>・水戸義忠<sup>1</sup>・張傳聖<sup>1</sup>・藤原崇行<sup>1</sup>・清水靖<sup>1</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

\* E-mail: aoki@kumst.kyoto-u.ac.jp

本研究では、低透水性岩盤の微小亀裂を対象とするフラクチャーシーリングに有効と考えられる動的注入工法におけるグラウト充填機構のミクロな視点からの解明を目的として、粒状体個別要素法を用いたシミュレーションを行うことで検討を行った。このシミュレーションを通して得られた知見から、動的注入を行うことで、より低い透水性を示す岩盤に対しても、より安定した高濃度のグラウト材を注入できることが示された。

**Key Words :** grouting, dynamic injection, low permeable rock, fracture sealing, distinct element method

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分施設や液化石油ガスの地下備蓄施設などの岩盤地下貯蔵施設では、長期にわたって貯蔵物質に対する高度な遮蔽性能が要求されるため、低透水性岩盤にサイトを選定する必要がある<sup>1)</sup>。しかしながら、この長期にわたる高度な遮蔽性能を十分に確保するために必要な水理性状を、自然の岩盤そのものに求めることは難しく、人工的にさらなる透水性の改良が要求されるのが一般的である。

このような背景のもと、筆者らは、低透水性岩盤に対する有効なシーリング技術として、定常圧に振動圧を付加し、セメントに水を混入したグラウト材と呼ばれる注入材を岩盤亀裂に注入・シーリングする動的注入工法を提案してきた。この工法においては、振動圧を与えることにより、グラウトの流動性の向上、及び目詰まりの抑制が期待され、現在までに原位置試験や室内実験より、その有効性が確認されている<sup>2)</sup>。

また、動的注入をより効率的かつ確実にを行うため、注入パラメータと動的注入効果の関係を検討することによって、低透水性岩盤の微小亀裂に対するグラウトの注入メカニズム（流動特性に関するメカニズム・充填特性に関するメカニズム）の解明を進めてきた。このうち充填特性に関するメカニズム（以下、グラウト充填機構）については、これまでマクロな視点からセメント粒子の充填過程をモデル化することで検討を進めてきたが、微小

亀裂に対するグラウトの充填状況を詳細に評価するには、よりミクロな視点からの充填過程を検討することが必要であると考えられる。そこで、本研究では個々のグラウト粒子の流動を直接的にモデル化することができる粒状体個別要素法を用いたシミュレーションを行うことによって、動的注入におけるグラウト充填過程の検討を行った。

## 2. 動的注入におけるグラウト材の流動特性

これまでに、室内および現場実験によって、動的注入時にグラウト材の単位時間あたりの注入量が増加することが確認されている。これは、振動圧によるグラウト材の見かけ粘性の低下によるものと考えられる。ここでは、粒状体個別要素法によるモデル化に必要となる、動的注入におけるグラウトの流動特性について述べる。

過去にBörgessonら<sup>3)</sup>によって行われた実験により、動的注入における流速の振動成分の最大値を開口幅の半分の値で除した値であるせん断ひずみ振幅が大きくなるに従って、グラウトの流動性が向上する、すなわち見かけ粘性が低下することが知られている。そこで、非定常流について運動方程式を解くことにより、注入パラメータとせん断ひずみ振幅の関係を明らかにすると同時に、実験によりせん断歪振幅と見かけ粘性の関係式を求めることで、注入パラメータである振動圧の振幅・周波数が流

動メカニズムに与える影響について検討した。

図-1は、振動圧振幅と見かけ粘性の関係を表したものである。各亀裂幅において、振動圧振幅と見かけ粘性は比例関係にあり、振幅が大きくなるに従って、見かけ粘性が低下し、流動性が向上すると考えられる。

図-2は、振動圧周波数と見かけ粘性の関係を表したものである。各亀裂幅において、周波数が低くなるに従い、見かけ粘性が低下し、流動性が向上する。しかしながら、振動圧振幅が見かけ粘性の低下に与える影響と比較すると、その低下率には顕著な差がなく、すなわち、振動圧の周波数の違いによる見かけ粘性の変化は殆どないものと考えられる。

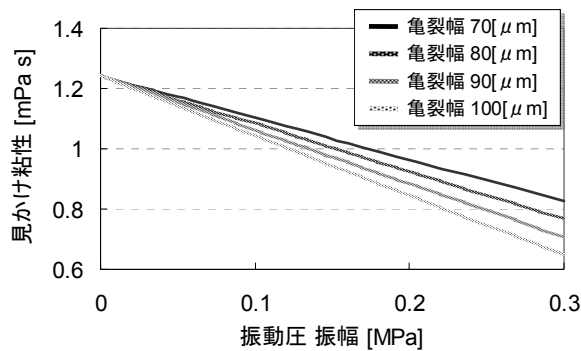


図-1 振動圧振幅と見かけ粘性の関係

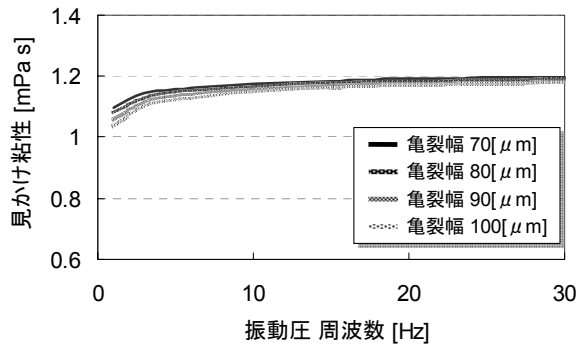


図-2 振動圧周波数と見かけ粘性の関係

### 3. 粒状体個別要素法を用いたセメント粒子の充填過程のモデル化

亀裂内の注入流量の経時変化は、セメント粒子の沈降・堆積による亀裂の開口幅変化によって生じると考えられる。そこで、2の検討結果を考慮した上で、注入パラメータによって規定される速度分布および体積力を個々のセメント粒子に与えることで、平行平板状亀裂の微小区間内における粒子の流動を粒状体個別要素法によりモデル化した。

図-3は作成したセメント粒子の流動モデルである。本研究で対象とするような微小な開口幅を有する亀裂内ではポアズイユ流れが生じているとみなすことができるので、個々のセメント粒子に対して水平方向の速度分布 $u$ を次式で与えた。

$$u = u_c + u_o \quad (1)$$

但し、 $u_c$ : 流速の定常成分、 $u_o$ : 流速の振動成分は、

$$u_c = \frac{\alpha}{2\mu(h^2 - y^2)} \quad (2)$$

$$u_o = \frac{\alpha'}{2\mu(h^2 - y^2) \sin(2\pi f)t} \quad (3)$$

である。ここに、 $\alpha$ : 圧力勾配の定常成分、 $\alpha'$ : 圧力勾配の振動成分、 $f$ : 周波数、 $\mu$ : 粘性係数である。また、鉛直方向には、粒子の沈降力 $F_s$ および流体の抵抗力 $F_r$ を体積力として与える。このような条件の下で、セメント粒子を亀裂の一端のランダムな位置から逐次発生させた。なお、単位時間当たりのセメントの発生数は、グラウト材の平均流速と配合から決定する。

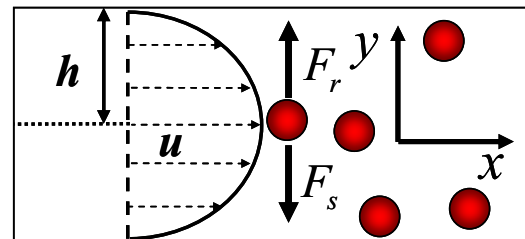


図-3 セメント粒子の流動モデル

## 4. 室内実験およびシミュレーション

平行平板状の亀裂モデルに対して静的注入ならびに動的注入を行う室内実験を行うとともに、室内実験のシミュレーションを行うことで、3で作成したセメント粒子の充填過程モデルを用いたシミュレーションの妥当性を確認する。

### (1) 実験装置

図-4に注入試験システムの概要を示す。図に示すとおり、注入口に与える注入圧力は圧力変換用エアシリンダからの定常圧に、振動装置を介してサーボシリンダからの振動圧を付与したものである。圧力変換用エアシリンダでは最大約2MPaの定常圧を、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。またグラウト注入用タンクには、注入実験中にセメント粒子がタンクの中で沈降しないように、攪拌翼によ

り常に練り混ぜを行っている。

亀裂モデルは、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。今回、亀裂幅は $80\mu\text{m}$ 、流路長は2m、流路幅 $0.16\text{m}$ と設置した。

実験条件として、注入材料には超微粒子セメントを用いた水セメント配合比 $w/c=0.8$ のグラウト材を使用した。注入圧は静的注入の場合 $0.3\text{MPa}$ とし、動的注入の場合 $0.3\text{MPa}$ に振幅 $\pm 0.03\text{MPa}$ 、周波数 $5\text{Hz}$ の振動圧を加えた。

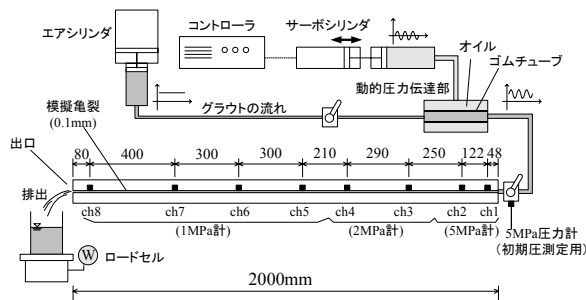
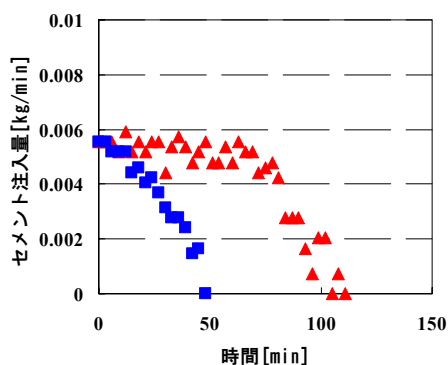
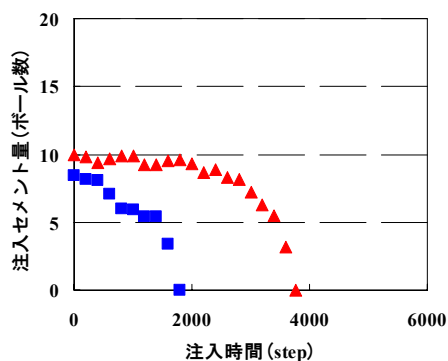


図-4 セメント粒子の流動モデル



（■：静的，▲：動的）

図-5 室内実験結果



（■：静的，▲：動的）

図-6 シミュレーション結果

## (2) 室内実験及びシミュレーションの結果

図-5は、室内実験によって得られたセメント注入量の経時曲線である。静的注入と比較して動的注入による注入量の増加および注入時間の延長が認められる。一方、図-6は、シミュレーションによって得られたセメント注入量の経時曲線であり、動的注入による注入量の増加および注入時間の延長の割合が室内実験結果とよく一致している。すなわち、シミュレーションによって得られたミクロな領域での粒子の充填挙動が室内実験で得られたマクロな領域での粒子の充填挙動とよく一致しており、充填過程の検討にあたっての、本モデルの適用性が示された。

## 5. シミュレーションによるグラウト充填機構の検討

3.で提案したセメント粒子の充填過程モデルを用いてシミュレーションを行うことで、注入パラメータ（振動圧の振幅・周波数および水セメント配合比）がグラウト充填過程に与える影響を平行平板状の亀裂において検討した。

### (1) 動的注入によるグラウト充填過程の検討

水セメント配合比 $w/c=2$ において、静的注入・動的注入のシミュレーションを行い、セメント粒子の挙動を比較することで、グラウト充填過程について検討した。注入圧は静的注入の場合 $0.3\text{MPa}$ とし、動的注入の場合 $0.3\text{MPa}$ に振幅 $\pm 0.03\text{MPa}$ 、周波数 $5\text{Hz}$ の振動圧を加えた。

図-7は、静的注入ならびに動的注入の粒子の流動状況を、500step毎に記録したものである。上段が静的注入、下段が動的注入のシミュレーションの状況を表している。静的注入の場合、 $T=1000\text{step}$ 前後で目詰まりが生じ、そのまま充填が進行し、 $T=3500\text{step}$ で充填が完了する。それに対して、動的注入の場合、 $T=1000\text{step}$ 前後で一旦目詰まりが発生するが、その後目詰まりが解消されることが確認できる。その後、再び $T=5500\text{step}$ 前後で目詰まりが生じ、充填が進行し、 $T=9500\text{step}$ で充填が完了している。ここで、静的注入の場合と比較して、動的注入では、目詰まりが発生してから充填が完了するまでの時間が延長されていることが確認できる。これは、振動圧を付加することによって、目詰まりが抑制されるためと考えられる。

ここで、動的注入において目詰まりの抑制および解消が生じる要因を、個々の粒子に着目して考察する。粒子の充填は、粒子が平衡状態（粒子に作用する物体力と抵抗力が釣り合い静止する状態）に達することによって進行すると考えられる。動的注入では、振動圧を付加する

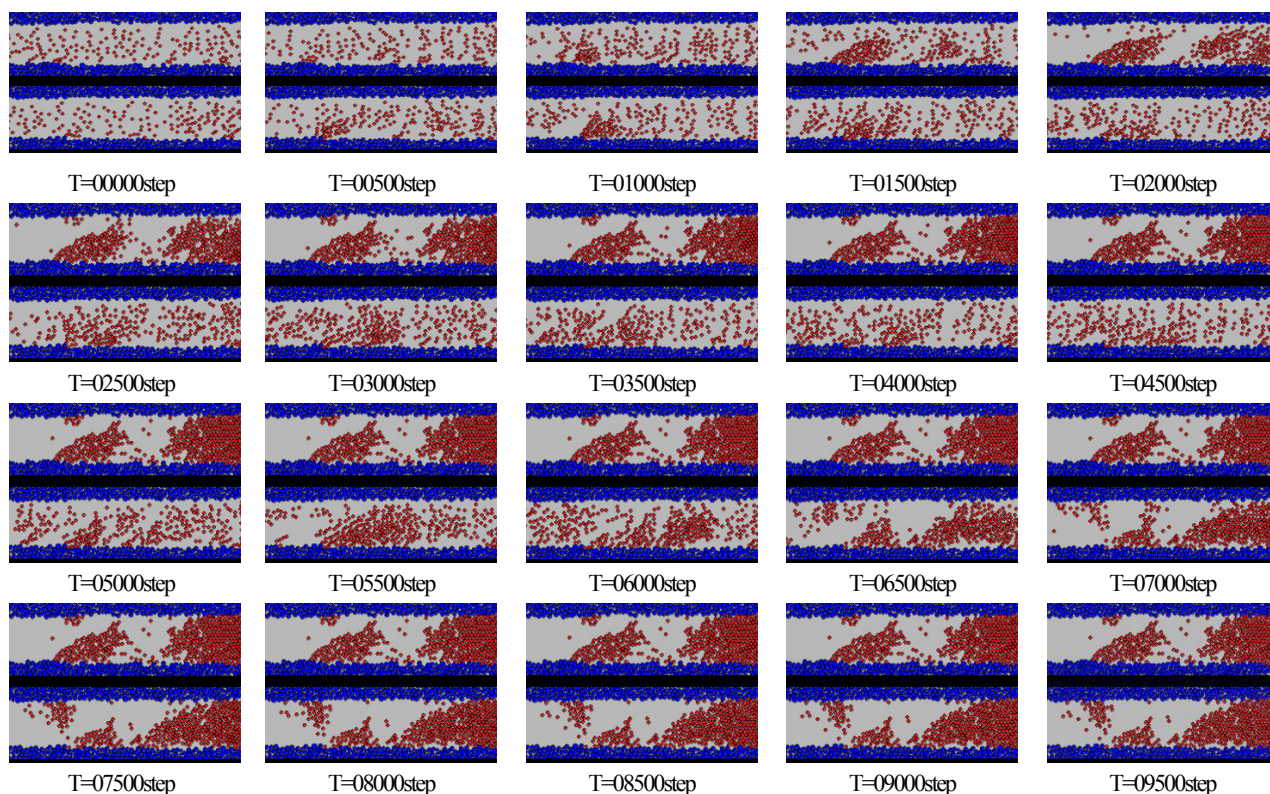


図-7 シミュレーションにおけるセメント粒子の充填過程

ことによって、粒子に作用する物体力が周期的に変化するため、静的注入と比較して平衡状態に達するまでに時間を要し、目詰まりが抑制されると考えられる。また、動的注入では、振動圧を付加することによって、粒子に作用する物体力の最大値が静的注入時に比べて大きいいため、目詰まりの解消も生じると考えられる。

## (2) グラウトの充填に対する注入パラメータの影響

本研究では、注入パラメータを変化させた多数のシミュレーションを行うことにより、グラウトの注入パラメータが充填に与える影響を検討した。以下、その結果を示す。

図-8に振幅と注入時間の関係を、図-9に振幅と総注入セメント量の関係を示す。まず、図-8から、振動圧の振幅が大きくなるに従って注入時間が延長していることがわかる。また、図-9から、振動圧の振幅が大きくなるに従って総注入セメント量が増加していることがわかる。これは、振幅が大きくなるに従って動的効果（目詰まりの抑制および解消）が大きくなっているためと考えられる。

次に、図-10に周波数と注入時間の関係を、図-11に周波数と総注入セメント量の関係を示す。図-10および図-11を見ると、周波数と注入時間・総注入セメント量との間には明白な関連性を認めることはできないことがわかる。

さらに、図-12に動的注入による注入時間の増加度（動的注入における注入時間／静的注入における注入時間）を振幅に対してプロットしたものを、図-13に動的注入によるセメント注入量の増加度（動的注入における注入時間／静的注入における注入時間）を振幅に対してプロットしたものを示す。

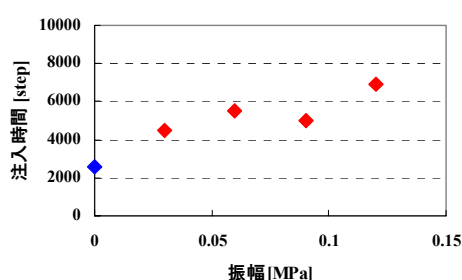


図-8 振動圧振幅と注入時間の関係

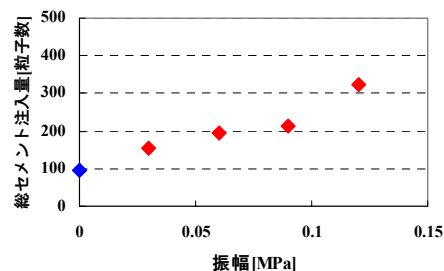


図-9 振動圧振幅と総セメント注入量の関係



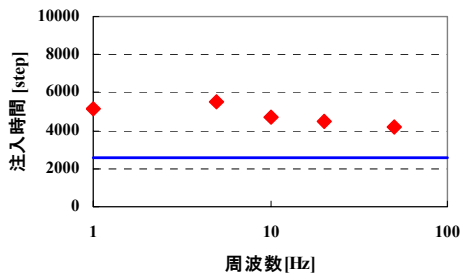


図-10 振動圧周波数と注入時間の関係

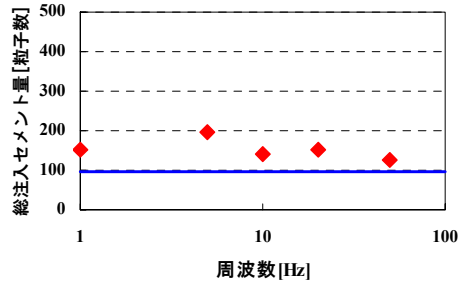


図-11 振動圧周波数と総セメント注入量の関係

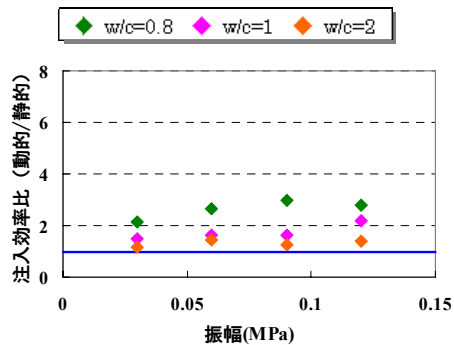


図-12 振動圧振幅と注入時間の増加度（動的／静的）の関係

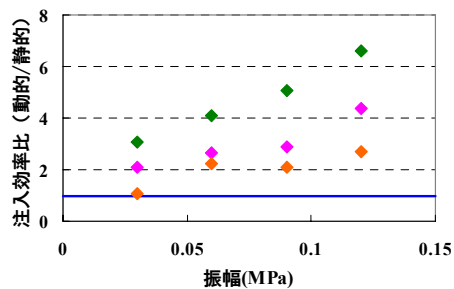


図-13 振動圧振幅と総セメント注入量の増加度（動的／静的）の関係

図-12および図-13から各振幅において、水セメント配合比の値が小さいほど注入時間および総セメント注入量の増加度が大きくなっていることがわかる。これより、水セメント配合比の値が小さいほど、すなわちグラウト材の粘性が高いほど、動的効果が顕著になると考えられる。

## 6. 亀裂幅とグラウト充填機構の関連性

亀裂幅がグラウト充填過程に与える影響を検討するため、実際の低透水性岩盤の亀裂形状<sup>4)</sup>（図-14）を模して作成した粗度の高い亀裂（図-15）を対象として、亀裂幅を50 $\mu$ m、80 $\mu$ m、100 $\mu$ mと変化させてシミュレーションを行った。ここで、水セメント配合比w/c=1とした。

図-16に動的注入による注入時間の増加度（動的注入における注入時間／静的注入における注入時間）を亀裂幅に対してプロットしたものを、図-17に動的注入によるセメント注入量の増加度（動的注入における注入時間／静的注入における注入時間）を亀裂幅に対してプロットしたものを示す。図-16、図-17から、亀裂幅が小さいほど注入効率比が大きくなっていることがわかる。これより、亀裂幅が小さいほど、動的効果が顕著になると考えられる。また、このことは、低透水性岩盤の改良に対する動的注入の優位性を同時に示すものである。



図-14 亀裂幅と注入時間効率比（動的／静的）の関係

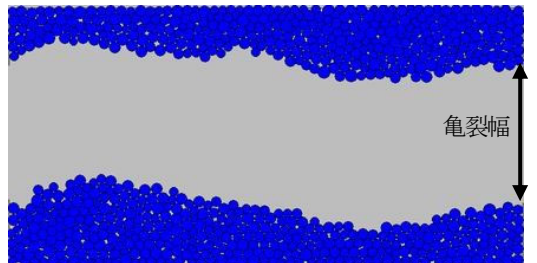


図-15 亀裂幅と注入時間効率比（動的／静的）の関係

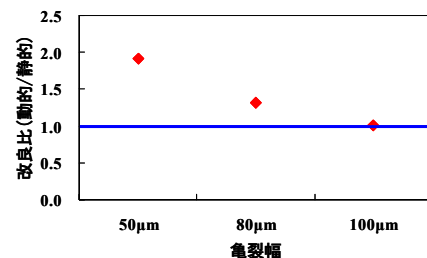


図-16 亀裂幅と注入時間効率比（動的／静的）の関係

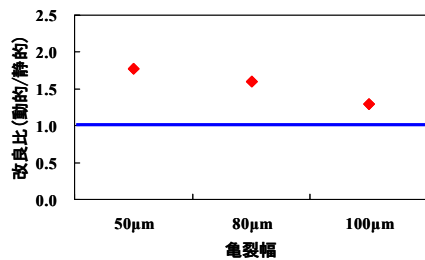


図-17 亀裂幅と総注入量効率比（動的／静的）の関係

## 7. 結論

本研究では、低透水性岩盤の微小亀裂を対象とするフラクチャーシーリングに有効と考えられる動的注入工法におけるグラウト充填機構のミクロな視点からの解明を目的として、粒状体個別要素法を用いたシミュレーションを行い、検討を行った。

以下に動的注入におけるグラウト充填機構について得られた知見を述べる。

- ①動的注入における注入時間の延長は、主として局所的な目詰まりの発生の抑制および解消に起因する。
- ②振幅が大きいほど目詰まりの発生の抑制および解消

効果が生じるため、注入時間の延長度合および注入量の増加度合が大きくなる。

③水セメント配合比の値が小さいほど、目詰まりの発生の抑制および解消効果が顕著になる。

④亀裂幅が小さいほど、目詰まりの発生の抑制および解消効果が顕著になる。

以上のことから、動的注入を行うことで、より低い透水性を示す岩盤に対しても、より安定した高濃度のグラウト材を注入できることが示された。

## 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技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ, JNCTN1400 99-022, 1999
- 2) 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
- 3) Lennart Börgeßon : Rheological properties of cement and bentonite grouts with special reference to the use of dynamic injection Grouting in Rock and Concrete Widmann 1993 P3-11
- 4) Eva Hakami and Erik Larsson : Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture 1995 P9

## NUMERICAL SIMULATION ON THE MECHANISM OF THE DYNAMIC INJECTION FOR LOW PERMEABLE ROCK MASSES

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Chuan Sheng CHANG, Takayuki FUJIWARA  
and Yasushi SHIMIZU

Dynamic injection is a technique for grout injection by oscillating pressure added to a fixed underlying pressure. This technique is efficient to inject grouting material into micro-fractures in low permeable rock masses. In this study, the author proposes the numerical model of cement penetration process using Distinct Element Method (DEM) and carries out numerical simulations in order to clarify the mechanism of grout penetration by dynamic injection.