

## 論文の内容の要旨

論文題目 地盤・岩盤中の溶液型・懸濁型グラウト材の移行挙動に関する数値解析手法の開発

氏 名 米山 一幸

### 1. 検討目的と検討内容

グラウト注入工法は地山の止水・補強を目的とする補助工法であり、現在でも土木工事のさまざまな分野で広く利用されている。この工法は土質地盤を対象とする地盤注入工法と、硬岩・軟岩を対象とする岩盤注入工法に大別され、注入に用いるグラウト材には、水ガラスを主材とする溶液型材料と、セメント・粘土などの懸濁型材料が主に使用される。溶液型材料は水ガラス水溶液に反応剤を加えて地中でゲル化させるものであり、浸透性に優れ低透水性の地盤・岩盤亀裂への注入が可能だが、時間の経過とともにシリカの溶脱やゲルの体積変化が生じ、長期的な補強・止水の目的には適さない。懸濁型材料はセメントや粘土の懸濁液で、浸透性が低く低透水性の地盤・岩盤亀裂への注入には適さないが、長期的には水和反応により結晶質の硬化体を形成するため固化後の強度は高く、耐久性・恒久性にも優れる。

グラウト注入工法は歴史が古く現在でも広い分野で利用されているにも関わらず、設計・施工に関しては過去の実績などにに基づき計画されることが多い。その理由として、地中のグラウトの移行挙動と用いる材料・注入方法などの関係が十分に解析されていないことが指摘されている。一方で、建設コスト削減や環境負荷低減などの観点から合理的なグラウト注入工法が求められており、また最近では、高レベル放射性廃棄物処分施設などグラウト注入効果の高度な管理が必要となる事例が増えていることから、グラウトの移行挙動や拡散範囲・改良効果を定量的に予測する手法が今後重要になると考えられる。

以上より、本論文ではグラウト注入工法における地盤・岩盤中のグラウト材の移行挙動の予測評価手法の精度向上に資することを目的に、グラウト材料ごとに止水のメカニズムが異なる点に注目し、

①砂質地盤への溶液型グラウト（コロイダルシリカ）の注入

②岩盤亀裂への懸濁型グラウト（微粒子セメント）の注入

について、グラウト材移行挙動のモデル化とこれを導入した数値解析手法を作成し、室内実験の再現解析により有効性を検証する。また、開発した解析手法を用いて仮想モデルを対象とするケーススタディを実施することにより、実施工への適用性を検討する。

### 2. 溶液型グラウト材の移行挙動予測解析手法に関する検討

溶液型グラウト材の砂質地盤への浸透注入について、模擬地盤を用いた室内注入実験により砂質地盤中の移行挙動を検討するとともに、これをモデル化した数値解析手法を提案し、実験結果との比較検証を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 小型試験体を用いた浸透性能実験結果より，注入開始直後は実測値がグラウトの粘度変化より算出した計算値とほぼ一致するが，作液から時間が経過してグラウト粘度が上昇すると実測値が計算値を下回るようになる。同時に作液して異なる時刻に注入を開始した比較実験の結果に有意な差は見られないことから，上記の実測値と計算値の差はグラウト材作液時に含まれる粗粒分の目詰まりなどによる試験体の透水性低下が原因ではなく，グラウト材のゲル化に伴うレオロジー特性の変化に起因することが推測される。
- ・ 高精度の回転式粘度計によるグラウト材のレオロジー特性の測定結果より，作液直後のグラウト材はほぼニュートン流体と見なせるが，ゲル化の進行にともない非ニュートン的な挙動を示すようになる。測定結果をビンガム流体，または，擬塑性流体として近似した場合，それぞれ，降伏応力，非線形率と粘度の間に一定の相関が示される。
- ・ 非ニュートン流体の浸透モデルに関する既往研究を参考に，ゲル化にともなうグラウト材のレオロジー特性の変化を考慮した新たな浸透流解析モデルを提案し，これを組み込んだ解析プログラムを作成した。円柱状の模擬地盤によるグラウト注入実験の再現解析結果より，グラウト材を擬塑性流体としてモデル化すると，ニュートン流体としてモデル化するよりもゲル化進行後の注入流量変化を精度よく再現できる。このことより，グラウト材の粘度変化だけではなく，ゲル化にともなう非ニュートン流体的な挙動を考慮することで，移行挙動をより精度よく予測できることが示された。

### 3. 懸濁型グラウト材の移行挙動予測解析手法に関する検討

懸濁型グラウト材の岩盤亀裂内の移行挙動の予測解析手法について，セメント粒子の目詰まりによる止水効果に着目し，平行板スリットを用いた室内注入実験と，懸濁型グラウトの巨視的挙動，および，グラウト中の水・セメント粒子の微視的挙動について，それぞれ混合流体モデル（差分法），固液2相流モデル（粒子法）による数値解析を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 平行スリットを用いた室内注入実験の結果から，スリットの開口幅より十分小さな粒径のセメント材料を用いた場合でも注入流量の低下が生じることが確認され，複数のセメント粒子が吸着・団粒化して生じる目詰まりにより流路が閉塞され，浸透率が低下することが推察された。また，この目詰まりによる浸透率の低下は，グラウト材の濃度と積算流量の積，すなわち，スリットを通過するセメント粒子の積算量とほぼ線形の相関が示されることから，グラウト中の粒子が一定の割合で滞留し，その積算量に応じてスリットの浸透率が線形に減少するモデルを想定できることがわかった。
- ・ 前項の室内注入実験の浸透率の低下について深層ろ過の概念を適用し，目詰まりによりスリット内に滞留するグラウト材の量に比例して浸透率が低下するモデル（目詰まりモデル）を導入した混合流体モデルによる予測解析手法を新たに作成し，注入実験結果を良好に再現できることを示した。
- ・ 前項で導入した目詰まりモデルについて，粒子法（MPS法）を用いてグラウト材中のセメン

ト粒子の微視的な挙動に関する固液2相流解析を実施した。近接したセメント粒子が一定の確率で吸着し粒子塊として挙動するというモデルを新たに導入したプログラムを作成し、室内注入実験のモデル解析を実施した結果、解析時間・解析領域は異なるが、積算流量とグラウト濃度の積に対して流量が線形に低下するという実験結果と同様の傾向が示され、提案モデルと整合的であることが明らかとなった。

#### 4. 提案モデルの適用性に関するケーススタディ

溶液型グラウト、および、懸濁型グラウトの移行挙動解析について提案したモデルの実施工への適用性に関して、統計的手法により作成した仮想モデルなどによる解析ケーススタディによる検討、および、別途実施した現場注入実験の再現解析による検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- ・提案したセメント粒子目詰まりによる浸透率低減効果モデル（目詰まりモデル）を導入した懸濁型グラウトの予測解析手法を用いて、1次元および2次元の平行平板モデルによる解析ケーススタディを実施した結果、初期透水量が等しい場合、2次元流れ（放射状流）の方が1次元流れ（線状流）よりも目詰まりによる流量低下が顕著なことが示された。
- ・単一の岩盤亀裂への懸濁型グラウト材の注入に関して、等方的／異方的な開口幅分布を有する仮想的な岩盤亀裂モデルを統計的手法により作成し、目詰まりモデルを導入した懸濁型グラウト材の予測解析手法による解析ケーススタディを実施した。解析結果より、等方的な開口幅分布によりグラウトが同心円状に移行するケースの方が、異方性を有する開口幅分布により特定方向に卓越してグラウトが移行する場合に比べて目詰まりによる流量低下が大きくなる結果となり、これは前項の平行平板モデルと整合する。また、グラウト拡散範囲の大きさは注入条件により変化するが、拡散範囲の形状は変化しないことが示された。
- ・断層破碎帯の遮水を目的とした中央内挿法による懸濁型グラウト注入に関して、等方的／異方的な浸透率分布を有する仮想的な破碎帯モデルを統計的手法により作成し、多段階注入の解析ケーススタディを実施した。解析結果より、等方モデルにおいては1次注入でグラウト材が領域内にほぼ均質に広がり2次注入が不要となるのに対し、異方モデルでは1次注入で未浸透の領域が残り2次注入の追加が必要であることが示された。また、等方モデルの方が各注入孔における注入量の経時変化のばらつきが少なく、異方モデルに比べて流量低下が早く生じることが示された。
- ・以上の結果より、懸濁型グラウト材を用いた岩盤亀裂・破碎帯への注入の実施工において、注入流量・圧力などのデータを事前予測解析と比較することにより拡散範囲の不均質性・異方性などを評価することができ、多段階注入における追加注入の要否の判定などに利用することができる可能性が示された。
- ・提案した擬塑性流体モデルを用いた溶液型グラウトの予測解析手法を用いて、砂質地盤を対象に実施したコロイダルシリカの現場注入試験の再現解析を実施した結果、実施工の注入圧の変化を適切に再現できることが示された。

## 5. 今後の課題

本論文の今後の課題としては以下があげられる。

- ・ 提案した解析モデルをグラウト浸透挙動の予測に用いる場合，地盤中の流路の形状を示すパラメータ（修正係数）を定める必要がある。修正係数はグラウトの浸透経路となる土粒子間の空隙の大きさ・形状や連続性などにより変化することが予想され，その定量的評価が課題である。
  - ・ 本章で提案したモデルを実現場での注入工法においてグラウトの注入範囲や改良効果の評価に用いる場合，現場で取得できる限られたデータから注入対象の亀裂の透水性や性状，目詰まりパラメータなどの値を設定する必要がある点が今後の課題となる。
- これらについては，今後，現場での実測や原位置実験を通じて検討していく予定である。