

MPS-DEM 連成解析による薬液注入工法の薬液浸透性評価

芝浦工業大学大学院（現 竹中土木）

（学）福島一馬

芝浦工業大学大学院

（学）○染谷 明・（正）稲積真哉

大林組

（正）照井太一・（正）諸富鉄之助・（正）三浦俊彦

大阪防水建設社

（正）本橋俊之

富士化学

（正）笹原茂生

1. はじめに

薬液注入工法は止水や強度増加を目的として地盤改良工法のひとつであり，軟弱地盤対策では欠くことができない。薬液注入工法は膨大な施工実績を有しているものの，改良範囲を人為的にコントロールできないので，一般に改良された範囲が不均一になる技術的課題がある。その要因として，対象地盤の薬液の粘性の経時変化が挙げられる。薬液の粘性変化（ゲル化）が想定よりも早く起こると，薬液が所定範囲まで到達しない問題が起きる。

本研究では薬液の粘性の経時変化を考慮した薬液の浸透挙動を定量的に評価することを目的としている。具体的には，MPS-DEM 連成解析上で薬液注入工法における浸透注入を再現し，注入開始から最後まで薬液の粘性変化がない場合と，注入途中でゲルタイムに達した薬液が粘性変化する場合の 2 ケースの解析結果における浸透範囲を比較した。

2. 薬液の粘性の経時変化

薬液注入工法の薬液の種類にはゲルタイムが数十分と長い緩結性のものから，数秒の瞬結性のものまでであるが，本研究では浸透注入する緩結性の薬液について扱う。現在，薬液注入工法で使用できる薬液は水ガラス系薬液である。水ガラス系薬液は主材の水ガラスとそれを固める硬化剤からなっており混合したところから化学反応が始まりやがて流動性を失う¹⁾。本来，薬液が設計上の改良範囲に到達する時間とゲルタイムが同時であるのが理想である。しかしながら，地盤内での化学反応であることから，ゲルタイムが想定よりも早くなってしまうという問題が生じる可能性がある。

3. MPS-DEM 連成解析の概要

MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法は，主に流体解析や構造解析に用いられる粒子法である。粒子法では流体を「粒子」でモデル化することで，流体の流れを粒子自体の挙動で表すことができる²⁾。本研究では，流体である薬液と間隙水に対し MPS 法を適用した。

DEM (Discrete Element Method) 法は，解析対象を微小な粒子の集まりと考え，粒子個々の運動を解析することで集合体全体の挙動や反力を解析する手法であり，不連続体モデルに基づく解析手法である³⁾。本研究では，固体である砂粒子に対し DEM 法を適用した。

本研究では，上記の通り MPS と DEM を連成し解析を行った。式-1 は流体の運動を，式-2 は粉体の運動を表す方程式である⁴⁾。

$$\rho \frac{D\vec{\epsilon}_l}{Dt} = -\nabla \epsilon P + \mu \nabla^2 \epsilon \vec{v}_l - \frac{\epsilon}{l_0^3} \vec{F}_D \quad (\text{式-1})$$

$$m \frac{D\vec{v}_s}{Dt} = \vec{F}_{DEM} + \vec{F}_D + \vec{F}_{VP} \quad (\text{式-2})$$

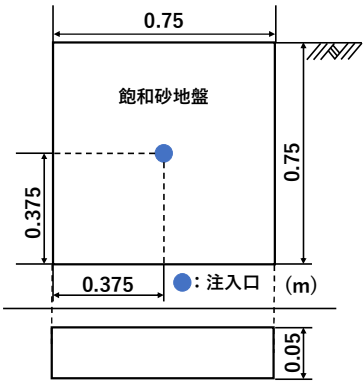


図-1 解析断面

表-1 間隙水および薬液のパラメータ (MPS)

流体の扱い	ニュートン流体	ビンガム流体
密度 (kg/m ³)	1000	1300
動粘性係数 (m ² /s)	1×10 ⁻⁶	
ケース 1 塑性粘度 (m ² /s)		1.7×10 ⁻³ (0s~85s)
ケース 2 塑性粘度 (m ² /s)		1.7×10 ⁻³ (0s~60s) 1.8×10 ⁻¹ (60s~85s)
降伏値 (N/m ²)		1×10 ⁻⁶
限界ひずみ速度 (1/s)		6.25×10 ⁻¹⁰

表-2 砂粒子パラメータ (DEM)

密度 (kg/m ³)	2650
粒子径 (m)	0.01
粗視化倍率	5
バネ定数 (N/m)	1×10 ⁴
反発係数	0.8
摩擦係数	0.577

キーワード：MPS-DEM 連成解析， 薬液注入工法， 透水性
連絡先：〒135-8548 東京都江東区豊洲 3 丁目 7-5（TEL：03-5859-8360；FAX：03-5859-8401）

ここで、 ρ ：流体密度、 ε ：流体の体積分率、 $\vec{v}_l$ ：流体速度、 P ：流体圧力、 μ ：粘度、 m ：粉体質量、 $\vec{v}_s$ ：粉体速度、 $\vec{F}_D$ ：流体抵抗力、 $\vec{F}_{VP}$ ：浮力である。

4. 解析条件

図-1はMPS-DEM連成解析の実施において対象にした解析断面を表している。本研究の解析で扱う対象断面は解析時間短縮のため、薬液注入工法の実大サイズより小さくし、 $0.75\text{m} \times 0.75\text{m} \times 0.05\text{m}$ の立方体の3次元飽和砂地盤とした(図-1)。飽和砂地盤の間隙比は0.65(飽和密度 1.78g/cm^3)であり、粒子径 0.01m の砂粒子と粒子間距離 0.01m の間隙水からなる。表-1は間隙水と薬液のパラメータを示している。薬液は注入口から注入速度 $1 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$ で注入される。注入時間は85sとした。また、飽和砂地盤の中心を薬液の注入口とした(図-1)。表-2は砂粒子の各パラメータを示している。本研究では砂粒子を扱うので砂粒子の大きさの視化倍率を5とした。

また、本研究では2ケースの解析を行った。ケース1は薬液が注入開始から最後まで粘性変化しない場合である。薬液の塑性粘度は $1.7 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ で一定とした。一方、ケース2は注入途中にゲルタイムに達した薬液の粘性が変化する場合である。ゲルタイムは60sとした。薬液の塑性粘度は、注入直後から60秒まで $1.7 \times 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$ であり、注入されて60秒(ゲルタイム)に達した薬液は $1.8 \times 10^{-1}\text{Pa} \cdot \text{s}$ に変化する。

解析結果の比較方法として得られた解析結果を比率から薬液注入工法の実大サイズでの比較を目指した。薬液注入工法では一般的に直径1mの改良体を目指す。ケース1の解析結果、すなわち粘性が一定の場合に理想の改良体サイズになると仮定し、ケース2の浸透範囲から粘性変化が浸透範囲に与える影響を評価した。

5. 解析結果

本研究では薬液の浸透範囲は注入口を通る鉛直方向の距離で比較することとした。その結果を図-2に示す。

注入時間85秒の結果では、ケース1の鉛直方向距離は0.30mであり、ケース2の鉛直方向距離は0.26mとなった。このことから、薬液の粘性の経時変化が想定よりも早く起きると、想定 of 改良範囲まで薬液が到達しないリスクがあるといえる。なお、MPS-DEM連成解析では、ゲルタイムが早くなったときの浸透割裂注入や割裂注入の形態も表現できるものの、今回検討した条件においては割裂注入が生じていない。

本研究では解析時間の短縮のために、薬液注入工法の改良体の実大サイズに比べ、解析断面と注入時間を小さくしているため、本研究の解析結果と実大サイズの比較を目指した。ケース1の粘性変化がない場合に理想の浸透範囲になると仮定する。その際、ケース2も同じ比率で考えることで、実大サイズでの薬液の粘性の経時変化が与える浸透リスクを評価する。実大サイズとケース1の関係を図-3に示す。

実大サイズでは浸透範囲を1mと想定している。ケース1の解析結果の浸透距離が0.3mであることから、 $1\text{m}/0.3\text{m}=3.33$ であり、この値が浸透距離と注入時間の比率となるので、ケース2の解析結果も3.33倍して実大サイズでの評価を行う。ケース1、ケース2の解析結果と実大サイズでの注入時間と浸透範囲の関係を図-4に示す。

実大サイズでのケース1とケース2の差は、 $1\text{m}-0.87\text{m}=0.13\text{m}$ となった。このことから、本研究での条件では薬液が想定よりも早くゲル化することで、改良体の直径が0.13m小さくなる影響を与えるといえる。

これらの結果より、1mの改良体を造るには注入時間926秒必要であるが、ゲルタイムが想定よりも早く653秒でゲル化すると0.87mの改良体になってしまう。薬液の粘性の経時変化が浸透範囲に大きな影響を与えることが明らかである。このことから、薬液注入工法の適用において、設計の改良範囲に適切なゲルタイムを有する薬液を用いる必要がある。

6. おわりに

本研究では、MPS-DEM連成解析によって薬液注入工法における粘性の経時変化が浸透範囲に与える影響を評価した。本研究でのMPS、DEMの各パラメータ設定により、薬液注入工法における浸透注入をMPS-DEM連成解析上での再現ができた。さらに、MPS-DEM連成解析により、薬液の粘性の経時変化は薬液の浸透範囲に大きな影響を与えることが明らかになった。

参考文献 1) 日本グラウト協会：新訂正しい薬液注入工法，日刊建設工業新聞社，2011． 2) 酒井幹夫：粉体の数値シミュレーション，丸善，2013． 3) 後藤仁志：固液混相流解析のためのDEM-MPS法の構築，水工学論文集，第47巻，2003．

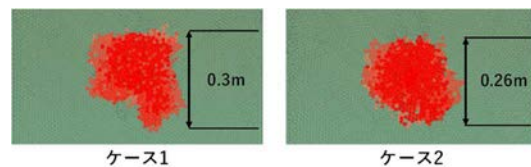


図-2 解析結果（注入時間 85s）

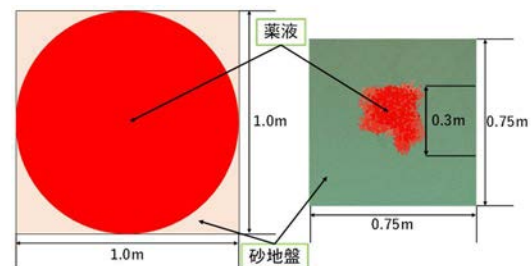


図-3 実大サイズとケース1の関係

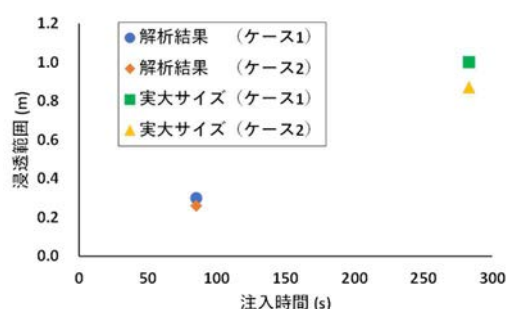


図-4 解析結果と実大サイズの浸透範囲