

CS2-1〔Ⅲ〕 個別要素法によるセメント粉体注入現象の解析

(株)熊谷組 正員 森 邦夫
京都大学 正員 柴田 徹

1. はじめに

著者らは、微粒セメント粉体を圧縮空気とともに地盤中に注入する地盤改良工法である「粉体注入工法」の有用性を、各種注入実験から検討してきた^{1), 2)}。本研究では、地盤空隙内へのセメント粉体の注入現象のシミュレーションを個別要素法により行った。

2. 注入モデル

地盤空隙を微細円管路とみなし、図-1に示すように管内をセメント堆積層のように粒子が集団状態にある部分と空気単相部に
分かれている場合を考えた。

$$\frac{\Delta P_e}{\Delta z} = \frac{\lambda}{D_h} \frac{1}{2} \rho U_e^2 \quad \text{-----(1)}$$

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta z} = \frac{4f}{d_p} \frac{1}{2} \rho (U_d - V_s)^2 \quad \text{---(2)}$$

ここで、

ΔP_e ; 空気単相部圧力損失 ΔP_d ; セメント層内圧力損失 λ ; 管摩擦係数 ρ ; 空気密度 d_p ; セメント粒径 U_e ; 空気単相部流体速度 U_d ; セメント層内空塔流速 V_s ; 堆積粒子平均移動速度 D_h ; 水力直径 ($4A_e/L_w$) L_w ; めれ縁長さ f ; 損失係数 (Ergun式により計算)

である。

空気単相部分とセメント粒子層内の圧力損失が等しいとする 表-1 シミュレーション条件
と、 U_e , U_d および ΔP が得られる。 Δz 区間に含まれる粒子数を
 $N\Delta z$ とすると、粒子層内の粒子一個に働く流体力 f_D は

$$f_D = A_d \Delta P / N\Delta z \quad \text{-----(3)}$$

により求めることができる。

本研究では、弾性変形による反発力と接近量の関係を法線方向はHertz式により、接線方向はMindlin式により与え、流体力、流体抵抗、回転による揚力を考慮して個別要素法によりシミュレーションを行った。付着力・摩擦力は、接線方向の反発力が摩擦力より大きいとき接触点で滑りが生じたと判定し、法線方向の反発力が、粒子同士の付着力により小さいとき粒子は付着していると考えた。

3. シミュレーション結果

表-1にシミュレーション条件を示す。

図-2に付着力を有するセメント粒子の崩壊状況と、各位置での単位長さあたりの圧力損失の時間変化図を示す。圧力損失図中の○印は圧力の急増地点であり、圧力値を図中に示す。図より、粒子が分離する時点で分離位置の圧力損失が急速に大きくなるがこれは、分離位置の粒子が僅かに移動し流路をほとんど閉塞したとみなされたためであると考えられる。

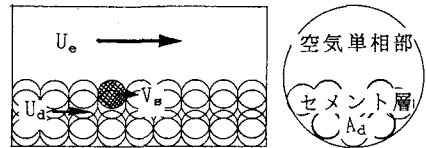


図-1 堆積層のある管内の流れ

表-1 シミュレーション条件

項 目	設定値
管 路 径 (μm)	20
管 路 長 (μm)	100
セメント径 (μm)	4
ヤング率 (×10 ⁹ Pa)	5
ポアソン比	0.20
摩擦係数	0.3
粒子の密度 (kg/m ³)	3000
粒子付着力 (×10 ⁻⁹ N)	1.23
反発係数	0.1
管摩擦係数	0.04
空気密度 (kg/m ³)	1.205
粘性係数 (×10 ⁻⁵ m ² /s)	1.501
空気流速 (m/s)	1.0
粒子数	156
計算時間 (s)	10 ⁻⁸
出力時間 (×10 ⁻⁴ s)	4

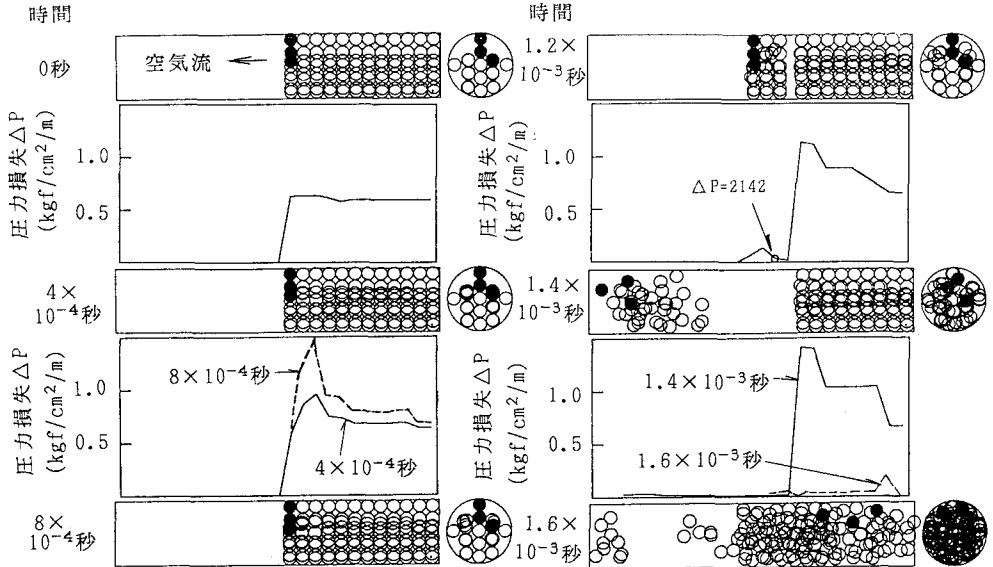


図-2 シミュレーション結果(付着力の有る場合)

図-3に付着力の無い粒子の挙動を示す。付着力の無いセメント粒子層は、空気の流路に当たっている上部のセメント粒子が離脱するとともに全体が崩壊していく様子がわかる。図-4に管路半分に堆積するセメント層の粒子均移動速度を付着力の有無で比較した。付着力の有る場合、粒子は安定した位置に移動した後、静止するが、付着力の無い場合、粒子は徐々に移動速度が増加し、崩壊することがわかる。以上より、付着力を有するセメント粉体は地盤空隙内を充填するまで堆積・管路閉塞した後、局所的な閉塞・崩壊を繰り返し注入されると考えられる。

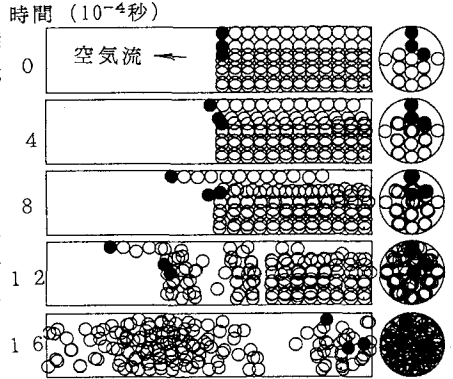


図-3 シミュレーション結果(付着力の無い場合)

4. おわりに

本研究は、辻らが行った付着力のない粒状体シミュレーションを微粒セメント粒子の解析に応用したものである³⁾。セメント粉体のような付着性のある凝集体を粒子一個に着目した個別要素法で解析する場合には、凝集性をどのように考慮するかが大きな問題である。本研究では粒子に付着力を与え、付着力の有無による挙動の違いの解析を行ったが、今後ミクロンオーダーのセメント粒子の付着力を正確に測定しモデル化することで注入現象の詳細な解明を行いたいと考えている。

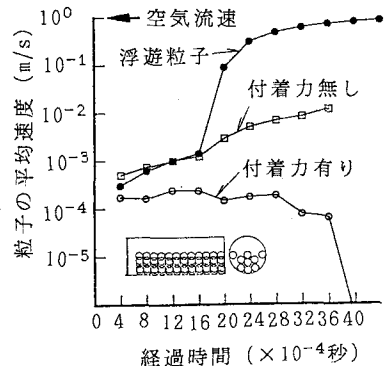


図-4 粒子の移動速度の比較(半充填)

参考文献(1)堀家,森,市川,柴田;多孔質岩盤の透気特性と粉体グラウト効果に関する研究,土木学会論文集,第397号/VI-9,1988年,(2)森,柴田,堀家;地盤中への粉体注入現象の研究,土木学会論文集,第445号,III-18/1992年,(3)田中,石田,辻;水平管内粒状体プラク流の直接数値シミュレーション(付着力のない場合),日本機械学会論文集(B編),57巻,534号,1991年