

地盤中への粉体注入現象の解析

森 邦夫*・柴田 徹**・堀家茂一***

粉体注入工法は表面改質したセメント粉体を圧縮空気によって地盤中に注入する工法であり、軟岩盤に対して良好な浸透注入長を確保することができる。本論文では、セメント粒子一個の付着力と空気の流体力との比較から注入性を判定する注入理論を提案し、この注入理論の簡易解析、および個別要素法によるシミュレーション解析を用いて良好な注入性を確保するための基準を示した。

Key Words : grouting, analysis, DEM

1. 緒 論

軟岩盤の浸透流抑制の基礎処理工法として、セメントミルクを用いたグラウチングが知られているが、従来の注入工法では軟岩盤を破壊する限界圧が存在すること、セメントミルクが脈状注入されることなどにより、十分な浸透注入長が得られないという問題があった¹⁾。

著者らは、従来のセメントミルクでは浸透注入がほとんど不可能であった10ルジオンオーダーの軟岩盤に対して、微粒セメント表面を改質処理して凝集性・付着性を低下させた「表面改質セメント粉体」を圧縮空気とともに注入する粉体注入工法により、半径約0.8mという実用的な浸透注入長を確保し、このセメント注入端での地盤空隙内の実空気流速が0.1~0.4m/sであることを明らかにした^{2),3)}。

ついで、地盤・岩盤中への表面改質セメント粉体の注入現象の解明と、注入基準の確立を目的として、理論的検討を行ってきた。本論文では、まず表面改質セメントの粒子一個の付着力を求め、この付着力とセメント粒子への空気流による流体力を比較することで、セメント粒子の注入性（飛散の有無）を判定する注入理論を提案する。つぎに、この注入理論の解析解、および個別要素法を用いたシミュレーション解から、注入現象が①空気流によるセメント粒子の飛散過程、②地盤空隙内を局所的に閉塞したセメント層の崩壊過程、③浮遊セメント粒子の堆積セメント層への衝突による崩壊過程の3種に分類できることを明らかにし、良好な注入性を確保するための管理基準を示した。

また、注入理論を個別要素法でモデル化し、付着・凝

集性を有する改質セメントの注入現象のシミュレーション解析を行うとともに、付着力のない微粒子挙動との比較・検討も行っている。

2. 表面改質セメントの特性

(1) 力学特性

地盤中へのセメント粉体の注入性に影響する材料の物性として、セメントの粒度や付着力が考えられる。

表面改質セメントの粒度分布はコールターカウンター法による測定結果から、母材の微粒セメントと同じであることがわかっている³⁾。

またセメント粉体層のせん断試験より、無処理の微粒セメントの粘着力は4.61gf/cm² (0.4kPa)、引っ張り破断強さは94.1N/m²、摩擦角は41.5度であり、表面改質セメントの粘着力は1.53, 1.73gf/cm² (0.15, 0.17kPa)、引っ張り破断強さは50.0, 58.8N/m²、摩擦角は39.2, 41.8度である³⁾。

ここで、セメント粒子一個の付着力は、セメント粉体層の引張り破断強さから、以下のRumpfの式を用いて求めることができる⁴⁾。

$$F = \sigma_z \frac{n}{1-n} d_p^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで

F : 粒子一個の付着力 σ_z : 粉体層の引張り破断強さ
 n : 粉体層の空隙率 d_p : 粉体粒子径

である。

式(1)に、セメントの粒子径(平均粒子径4 μ m)、引っ張り破断強さ、および粉体層のせん断試験時の空隙率を代入して求めたセメント粒子一個の付着力 F を **Table 1** に示す。

Table 1 より、表面改質セメント粒子一個の付着力は約 1.3×10^{-9} N であることがわかる。

* 正会員 工博 熊谷組技術開発本部土木技術第二部
(〒162 新宿区津久戸町2-1)

** 正会員 工博 京都大学工学部土木工学科教授

*** 正会員 工博 熊谷組技術開発本部土木技術第二部部长

Table 1 adhesion of fine grained cement

measured item material	rupture strength (N/m^2)	porosity n (-)	adhesion of cement particle ($\times 10^{-3}N$)
fine cement	94.4	0.660	2.93
surface treated cement	①	0.606	1.23
	②	0.593	1.37

Table 2 result of injection experiment³⁾

	non-treated fine cement injection	surface treated cement injection
material	toyoura sand	
specimen	diameter 10cm, length 36cm	
pressure	3kgf/cm ² (0.29MPa)	
initial velocity	131cm/s	97cm/s
injection length	4.5cm	>36cm

(2) 表面改質セメントの注入特性⁴⁾

豊浦標準砂に対する無処理の微粒セメントと表面改質セメントの粉体注入実験結果を Table 2 に示す。表面改質粉体は無処理の微粒セメントに比べて8倍以上の注入長が得られ、実用的な注入性が得られている³⁾。

3. 粉体注入理論

セメントミルクを用いた注入工法の注入性を判定する場合、室内試験や現場実績を基にした注入基準を適用する方法やゲル強さと注入圧の関係から浸透範囲を計算する方法⁵⁾がある。さらに注入理論としては、濾過・集塵理論などの応用が報告されている^{6),7)}。

しかし、粉体注入工法では、①空気を媒体とするため、セメントミルク注入のようにゲル強さを用いた注入範囲推定式が利用できないこと、②表面改質セメントは付着力が小さく、飛散性に優れているため濾過・集塵理論のみでは説明できないことなどの問題があるため、セメント粒子の飛散現象を取り込んだ解析が必要であった。

そこで本論文では、セメント粒子一個の付着力と、セメント粒子にかかる流体力の大きさを比較して、セメント粒子または堆積層の飛散・崩壊の有無から注入性を判定する注入理論を提案する。

はじめに、地盤空隙を微細円管路とみなして、注入されたセメントは管内下部に堆積している場合を考える。

管路内でのセメント堆積状況と、空気の流れの概念図を Fig.1 に示す。図に示すように、管路断面はセメント堆積部 A_d と空気単相部 A_e にわかれる。

長さ Δz 区間の空気単相部 A_e の圧力損失 ΔP_e は、管摩擦損失と同様に

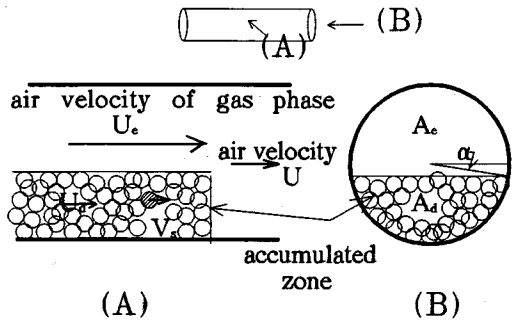


Fig.1 flow in pipe with particles accumulating

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

で得られる⁸⁾。

ここで、

λ : 管摩擦係数 ρ : 空気密度

U_e : 空気単相部の流体の平均速度

D_h : 水力直径

であり、水力直径 D_h は空気単相部 A_e の周長であるぬれ縁長さ L_w を用いて次式のように得られる⁹⁾。

$$D_h = 4A_e / L_w \dots \dots \dots (3)$$

セメント堆積層内の圧力損失 ΔP_d は、圧力損失係数 f を用いて次のように与えられる¹⁰⁾。

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

ここで、

d_p : セメント粉体の粒径 U_d : セメント粉体堆積層内の空塔流速

V_s : 区間 Δz 内の堆積層に含まれるセメント粒子の平均移動速度

である。

圧力損失係数 f は Ergun の式より式 (5) で得られる¹⁰⁾。

$$f = \frac{1-n_p}{2n_p^3} \left(150 \frac{1-n_p}{R_{es}} + 1.75 \right) \dots \dots \dots (5)$$

ここで

n_p : セメント粉体堆積層の空隙率

R_{es} : レイノルズ数 $R_{es} = d_p(U_d - V_s) / \nu$

ν : 動粘性係数

である。

管内でセメントが堆積していない区間の空気流速である空塔流速を U 、管断全面積を A とすると、空気の連続式より

$$AU = A_e U_e + A_d U_d \dots \dots \dots (6)$$

となる。

ここで、

A_e : 区間 Δz における空気単相部の断面積

Table 3 drag coefficient in eq. (9)

R _e	c ₀	c ₁	c ₂
<0.1	0	24	0
0.1~1.0	3.69	22.73	0.00903
1.0~10	1.222	29.1667	-3.889
10~10 ²	0.6167	46.5	-116.67
10 ² ~10 ³	0.3644	98.33	-2778.0
10 ³ ~5×10 ³	0.3571	148.62	-47500.0

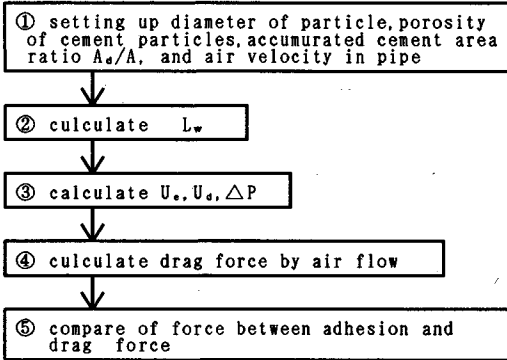


Fig.2 flow sheet of simplified prediction method

A_d: 区間 Δz におけるセメント粒子堆積部の断面積である。

管路方向の流れが卓越し空気単相部とセメント堆積部との間の流れが無視でき、それぞれの部分の空気圧は等しいと仮定すると、圧力損失は等しくなる (ΔP_e=ΔP_d)。

次に、Δz 区間に含まれる粒子数を N とすると、セメント堆積層内の粒子一個に働く流体力 F_D は、セメント堆積層にかかる力 (A_dΔP) をセメント粒子で除することで求められる。

$$F_D = A_d \Delta P / N \dots\dots\dots (7)$$

この粒子に働く流体力が、堆積層内の粒子の付着力より大きければ粒子は飛散する。

また、空気単相部を浮遊するセメント粒子に働く流体力

$$F_f = C_D \pi \rho / 8 d_p^2 u_e^2 \dots\dots\dots (8)$$

がセメント粒子の付着力より大きければ、このセメント粒子は堆積層表面で慣性力を失ったとしても堆積層に捕らわれずに移動する。式 (8) の抵抗係数 C_D と R_e の関係を表す経験式は数多く提案されているが、ここでは Moris と Alexander の式による式 (9) を用いて抵抗係数を与える¹¹⁾。

$$C_D = c_0 + c_1 / R_e + c_2 / R_e^2 \dots\dots\dots (9)$$

係数 c₀, c₁, c₂ は Table 3 より得られる¹¹⁾。

4. 簡易法による注入性の検討

本論文で提案したセメント粉体注入理論は、いくつか

の仮定を導入すれば、解析解が得られる。この解析解の計算手順を Fig.2 に示し、以下にその概要を述べる。

①セメント粒子径、セメント堆積層の空隙率、セメント堆積部の面積 A_d、管路径 D、空気流速 U を設定する。

②ぬれ縁長さ L_w を計算する。

セメント堆積面積 A_d から、空気単相部の面積 A_e が次式で得られる。

$$A_e = \pi (D/2)^2 - A_d \dots\dots\dots (10)$$

ここで、Fig.1 の堆積状況図より

$$A_e = (D/2)^2 / 2 \times (\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha) \dots\dots\dots (11)$$

である。Fig.1 に示すように α は管路中心の水平軸からセメント堆積層と管路の境界までの角度を示し、反時計回りを正とする。式 (10) を式 (11) に代入して

$$A_d = (D/2)^2 / 2 \times (\pi + 2\alpha + \sin 2\alpha) \dots\dots\dots (12)$$

が得られる。A_d は既知であることから α を求め、次式よりセメント堆積層が管路内壁と接している長さであるぬれ縁長さ L_w が得られる。

$$L_w = (D/2) (\pi + 2\alpha + 2 \times \cos \alpha) \dots\dots\dots (13)$$

③空気流速 U_e, U_d を計算する。

空気単相部とセメント堆積部の圧力損失は等しいと仮定したことから、式 (2), (3) は同等となり次式が得られる。

$$\rho U_e^2 \frac{\lambda}{D} \frac{1}{2} = \rho (U_d - V_s)^2 \frac{4f}{d_p} \frac{1}{2} \dots\dots\dots (14)$$

空気単相部の空気流速 U_e は式 (6) より、

$$U_e = (AU - A_d U_d) / A_e \dots\dots\dots (15)$$

となる。

このとき、静止状態のセメント粒子群 (V_s=0) を想定し、セメント堆積層の空隙率 n_p を仮定して、式 (12), (13), (15) を式 (14) に代入すると、式 (16) に示すセメント堆積層内の空気流速 U_d に関する二次の方程式が得られ、U_d を求めることができる。

$$A_1 U_d^2 + A_2 U_d + A_3 = 0 \dots\dots\dots (16)$$

ここで

$$A_1 = d_p \lambda L_w A_d^2 - 8 A_e^3 \frac{1 - n_p}{n_p^3} \times 1.75$$

$$A_2 = - \left(16 A_e^3 \frac{1 - n_p}{2 n_p^3} \times 150 \nu \frac{(1 - n_p)}{d_p} + 2 d_p L_w \lambda A A_d U \right)$$

$$A_3 = d_p L_w \lambda A^2 U^2$$

である。

式 (16) で管路径は左右辺から除され、空気流速 U、空隙率、粒子径、空気の物理特性、管摩擦係数を設定することで空気単相部、セメント堆積部の空気流速、圧力損失 ΔP を得ることができる。

④セメント粒子に働く流体力を計算する。

式 (5), (6) より求めた圧力損失量が生じる単位区間 Δz 内のセメント粒子の実体積は、セメント堆積層の

Table 4 data of calculation

item	value
air velocity u (m/s)	0.05 ~ 1.0
air density ρ (kg/m ³)	1.205
air viscosity ν (m ² /s)	1.501×10^{-6}
cement particle diameter d_p (m)	4×10^{-6}
porosity of particles aggregate n_p (-)	0.6
accumulated cement area ratio A_d/A (-)	0 ~ 1.0
friction factor λ (-)	0.04
adhesion of a particle F (N)	1.3×10^{-9}

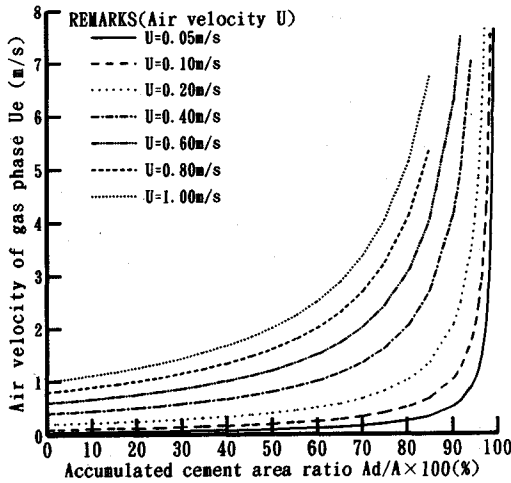


Fig.3 effect of accumulation on air velocity

空隙率 n_p が既知であれば

$$A_d \times (1 - n_p) \times \Delta z \dots \dots \dots (17)$$

となる。堆積層中のセメント粒子数 (N 個) は

$$N = A_d (1 - n_p) \Delta z / [(4/3)\pi (d_p/2)^3] \dots \dots \dots (18)$$

である。式 (7) より粒子一個に働く流体力 F_d を求めることができる。

また、空気単相部のセメント粒子一個に働く流体力 F_f は式 (8) より得られる。ここで、層流を想定すると、

$$C_D = 24/R_e \dots \dots \dots (19)$$

であり、流体力 F_f は次式のように簡略化できる。

$$F_f = 3\nu\rho d_p u_e \dots \dots \dots (20)$$

⑤セメント粒子の飛散の有無を判定する。

セメント堆積層内、および空気単相部のセメント粒子に働く流体力とセメント粒子一個の付着力とを比較し、粒子の飛散の有無を判定する。流体力がセメント粒子の付着力より大きい場合にセメント粒子は崩壊・飛散して深部まで注入されると考える。

この計算手順に従って、Table 4 の計算条件のもとでセメント堆積率が 0 のときの空気流速 U を 0.05 ~ 1

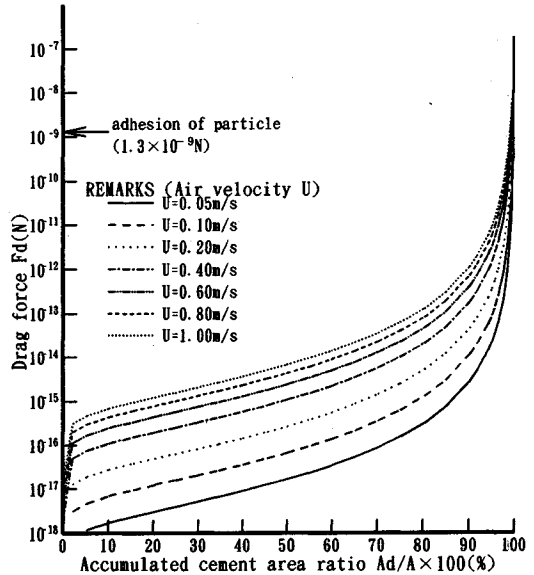


Fig.4 effect of accumulation on drag force

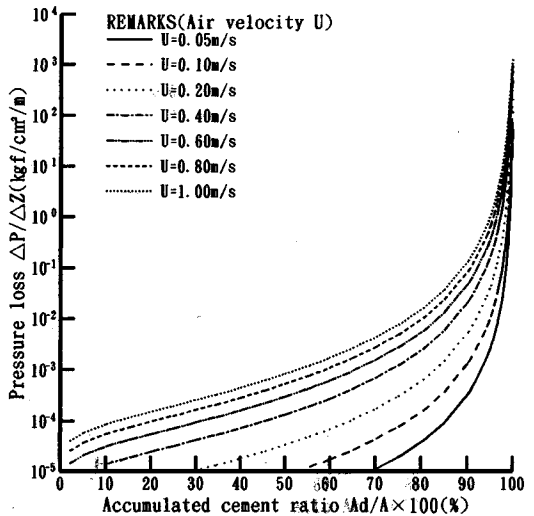


Fig.5 effect of accumulation on pressure drop

m/s まで変化させたときの、空気流速、圧力損失量の計算を行う。

表中、改質セメント粒子一個の付着力、セメント堆積層の空隙率は Table 1 の値を用いた。また、空気密度、動粘性係数は大気圧下の値とした。

セメント堆積による空気単相部の空気流速を Fig.3 に示す。図中、横軸は管路断面に占める堆積セメント断面の比率であり、空気流速 U に対応して 7 本の曲線群が得られている。

この図の空気流速 $U = 1$ m/s の曲線を例にとると、セメント堆積率が 50% (空気単相部の面積が管路断面の 1/2) になると空気流速は $U_e = 2$ m/s に、80% (空気

単相部の面積が1/5)になれば $U_c=5$ m/s になることから、セメント堆積率が変わっても空気単相部を流れる空気流量は変わらず、セメント堆積層内にはほとんど空気が流れないことがわかる。

つぎに、セメント堆積層内の粒子一個にかかる流体力を Fig.4 に示す。図中に、引張り試験結果から推定した表面改質セメントの粒子一個の付着力を矢印で示す。図によれば、堆積層内の改質セメント粒子一個への流体力が付着力より大きくなるのは、セメント粉体が微細管路をほぼ完全に閉塞した状況 ($A_d/A=1$) においてである。そしてこの状況では、空気流速の大小に関係なく流体力が付着力より大きくなるのがわかる。

また Fig.5 は、セメント堆積による 1 m 長さ当たりの圧力損失量の変化を示す。図よりセメント堆積層が管路を閉塞すると、圧力損失量は 1 m 長さ当たり 10 kgf/cm² 以上に急増することがわかる。しかし、空気流速が 1 m/s 以下で、かつセメント堆積率が 90% 以下の場合、圧力損失量は 1 kgf/cm²/m 以下であり、堆積が進行している間の圧力損失の増加は小さいことがわかる。

以上より、注入理論の解析解からセメント注入過程を、つぎの2つに分類できる。

①再飛散による注入過程

式 (20) より、改質セメント粒子一個の付着力 1.3×10^{-9} N に相当する流体力を与える空気流速を求めると約 0.8 m/s となる。このことから改質セメントは、地盤内の限界飛散流速 ($U_c=0.8$ m/s) になる範囲まで注入された後、限界飛散流速以下の範囲では堆積する。しかし、堆積が進むと、再び空気単相部の空気流速が限界飛散流速を超えて、堆積部分の成長が止まり、セメント粒子が飛散しはじめる。このときの、圧力損失は小さい。

②地盤空隙内を局所閉塞した堆積セメント層の崩壊

地盤空隙を閉塞したセメント堆積層を崩壊させるには、大きな圧力損失が必要である。セメント堆積率が大きくなると、局所的に完全閉塞が生じる可能性が高くなるが、この区間が長くない限り、小さな圧力で崩壊させることができる。地盤空隙内にセメントが多く注入・堆積した時点で、局所的な崩壊が進行してセメント粒子は深部まで注入される。セメント堆積層が崩壊した時点で、圧力損失は急減する。

このことから、粉体注入工法では、注入範囲の端部で限界飛散流速となる空気流量を確保すること、注入ポイント近傍でセメントが地盤空隙を完全閉塞しないように、注入圧力・空気流量が急減しないようにセメント粉体濃度を管理することが重要であることがわかる。

5. 粉体注入現象への個別要素法の適用

(1) 個別要素法の概要

グラウチング現象の解析は、これまで濾過理論や拡散理論を応用して広域的な浸透モデルが主に検討されてきたが^(5),6)、注入現象をセメントの一個に注目して微視的にとらえるコンピュータ解析の試みはほとんど行われてこなかった。本論文で著者らは、付着力を考慮したセメント粉体の注入理論を展開し、簡便式により注入特性を検討してきた。本章では、辻らの水平管内での付着力がない粒状体のプラグ流の数値シミュレーション⁽¹²⁾を参考に、付着力のあるセメント粉体の注入理論を個別要素法を用いてモデル化し、付着力の有無による注入特性の違い、簡便式での考察との対比などを行う。以下に、個別要素法の概要を述べる。

粒子の回転に接触力のみが影響するとすれば、並進および回転に対する運動方程式は次式が得られる。

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{1}{m}(\vec{f}_c + \vec{f}_d) + \mathbf{g} \dots \dots \dots (21)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\vec{T}_c}{I} \dots \dots \dots (22)$$

ここで

- r : 粒子の重心の位置, m : 粒子質量, f_c : 接触力の総和
- f_d : 流体抵抗力, g : 重力加速度, ω : 粒子の角速度
- T_c : 接触力のトルクの総和, I : 粒子の慣性モーメント

である。また変数の上の矢印はベクトルを、ドットは時間 t に関する微分を表しその個数は微分回数を表す。

粒子のある時刻の位置 r 、速度 v_s および角速度 ω は、接触力、流体力を用いて次式により与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{v}_s &= \dot{v}_{s0} + \ddot{v}_0 \Delta t \\ \dot{r} &= \dot{r}_0 + \dot{v}_s \Delta t \\ \dot{\omega} &= \dot{\omega}_0 + \dot{\omega}_0 \Delta t \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (23)$$

ここで、一様な等方性弾性体でできた2つの接触した球同士、球と壁面の間に働く法線方向の弾性変形による反発力 P_n と接近量 δ_n の関係は、Hertz の式により次のように与えられる。

$$P_n = k_n \delta_n^{3/2} \dots \dots \dots (24)$$

上式で法線方向の反発係数 k_n は、半径が d_p の等しい球同士の場合

$$k_n = \frac{(2d_p)^{1/2} E_s}{3(1-\sigma_s)^2} \dots \dots \dots (25)$$

となり、球と壁面では次式で与えられる。

$$k_n = \frac{4(d_p)^{1/2} E_s}{3} \left[\frac{(1-\sigma_s)^2}{E_s} + \frac{(1-\sigma_w)^2}{E_w} \right] \dots \dots \dots (26)$$

ここで

- E_s, E_w : 縦弾性係数, σ_s, σ_w : ポアッソン比

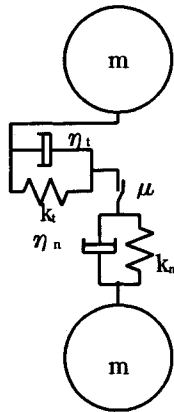


Fig.6 distinct element model

であり、添字 s, w は球および壁面を示す。

接線方向の弾性変形による力と変形量の関係は Mindlin により次式のように与えられる。

$$P_t = k_t \delta_t \dots \dots \dots (27)$$

上式で接線方向の反発係数 k_t は、半径 d_p の等球同士の場合

$$k_t = \frac{2(2d_p)^{1/2} G_s \delta_n^{1/2}}{2 - \sigma_s} \dots \dots \dots (28)$$

となり、壁面が球に比べて剛体とみなせる球と壁面間では

$$k_t = \frac{8(r_p)^{1/2} G_s \delta_n^{1/2}}{2 - \sigma_s} \dots \dots \dots (29)$$

となる。ここで、 G_s は球の横弾性係数であり

$$G = E/[2(1 + \sigma)] \dots \dots \dots (30)$$

となる。粒子の接触判定は、粒子 i と他の粒子または壁面などの物体 j との接近量 δ_{nij} を

$$(\text{粒子の場合}) \quad \delta_{nij} = 2d_p - |\vec{r}_j - \vec{r}_i| \dots \dots \dots (31)$$

$$(\text{壁面の場合}) \quad \delta_{nij} = d_p - d_{iw} \dots \dots \dots (32)$$

により定義する。ここで

d_{iw} : 粒子 i の中心から壁面までの距離

である。

接触点において粒子 i が物体 j から受ける法線方向の反発力 \vec{f}_{cnij} はばね、粘性減衰力、付着力の和として

$$\vec{f}_{cnij} = (-k_{nj} \delta_{nij}^3 - \eta_{nj} \vec{v}_{rij}) \vec{n}_{ij} \dots \dots \dots (33)$$

のように与える。ここで

$$\eta_{nj} = \alpha (mk_{nj})^{1/2} \delta_{nij}^{1/4} \dots \dots \dots (34)$$

α : 粘性減衰力の大きさを与える無次元定数

\vec{v}_{rij} : 粒子 i の物体 j に対する相対速度

\vec{n}_{ij} : 粒子 i から物体 j に向かう法線方向単位ベクトルである。

反発係数 e は α により一意的に決定される。

接線方向の作用力も法線方向の場合と同様に、粒子 i の物体 j に対する接触点における接線方向相対ベクトル

Table 5 data of simulation

item	value
pipe diameter	20 μm
pipe length	100 μm
particle diameter	4 μm
young's modulas	$5 \times 10^9 \text{Pa}$
poisson ratio	0.20
friction coefficient	0.3
particle density	3000kg/m^3
particle adhesion	1.3×10^{-5}
coefficient of restitution	0.1
friction factor	0.04
air density	1.205kg/m^3
air viscosity	$1.501 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$
time step	10^{-6}s
output time step	$4 \times 10^{-5} \text{s}$

$\vec{\delta}_{tij}$ を用いて次式のように与えられる。

$$\vec{f}_{ctij} = -k_{ij} \vec{\delta}_{tij} - \eta_{ij} \vec{v}_{sij} \dots \dots \dots (35)$$

ここで

\vec{v}_{sij} : 接触点での粒子 i の物体 j に対する滑り速度ベクトル

であり、次式より得られる。

$$\vec{v}_{sij} = \vec{v}_{rij} - (\vec{v}_{rij} \cdot \vec{n}_{ij}) \vec{n}_{ij} + \vec{r}_p (\vec{\omega}_i + \vec{\omega}_j) \times \vec{n}_{ij} \dots \dots \dots (36)$$

物体 j が壁面のとき

$$|\vec{v}_j| = |\vec{\omega}_j| = 0 \dots \dots \dots (37)$$

である。

粘性減衰係数 η_i は法線方向の値と等しいと仮定し、 $\eta_t = \eta_n$ とする。接触点における接線方向相対ベクトル $\vec{\delta}_{tij}$ は Δt 時間前の $\vec{\delta}_{tij0}$ から、次式により求められる。

$$\vec{\delta}_{tij} = |\vec{\delta}_{tij0}| \frac{\vec{n}_{ij} \times \vec{\delta}_{tij0} \times \vec{n}_{ij}}{|\vec{n}_{ij} \times \vec{\delta}_{tij0} \times \vec{n}_{ij}|} + \vec{v}_{sij} \Delta t \dots \dots \dots (38)$$

これらの力の関係をモデル化すると Fig.6 のようになる。本論文では、粒子間、または粒子と壁面との反発による力に、式 (20) から得られる流体力を考慮し、浮遊する粒子については流体抵抗、回転による揚力を考慮した。

各粒子について上記の力が働くとき、摩擦力、付着力は各粒子を以下のように拘束すると考えた。

① 摩擦力

簡略化のため粒子の接線方向と法線方向の付着力が等しいと仮定すると、接線方向の反発力が摩擦力より大きいとき、次式が成立する。

$$|\vec{f}_{ctij}| > F + \mu_f |\vec{f}_{cnij}| \dots \dots \dots (39)$$

ここで、

μ_f : 動摩擦係数 F : 粒子 1 個の付着力

である。

このとき、接触点で滑りが生じたと判定し

$$\vec{f}_{ctij} = -\mu_f |\vec{f}_{cnij}| \vec{t}_{ij} \dots \dots \dots (40)$$

$$\vec{\delta}_{tij} = (1/k_{ij}) \vec{f}_{ctij} \dots \dots \dots (41)$$

となる。ただし、

$$\vec{t}_{ij} = \vec{v}_{sij} / |\vec{v}_{sij}| \dots \dots \dots (42)$$

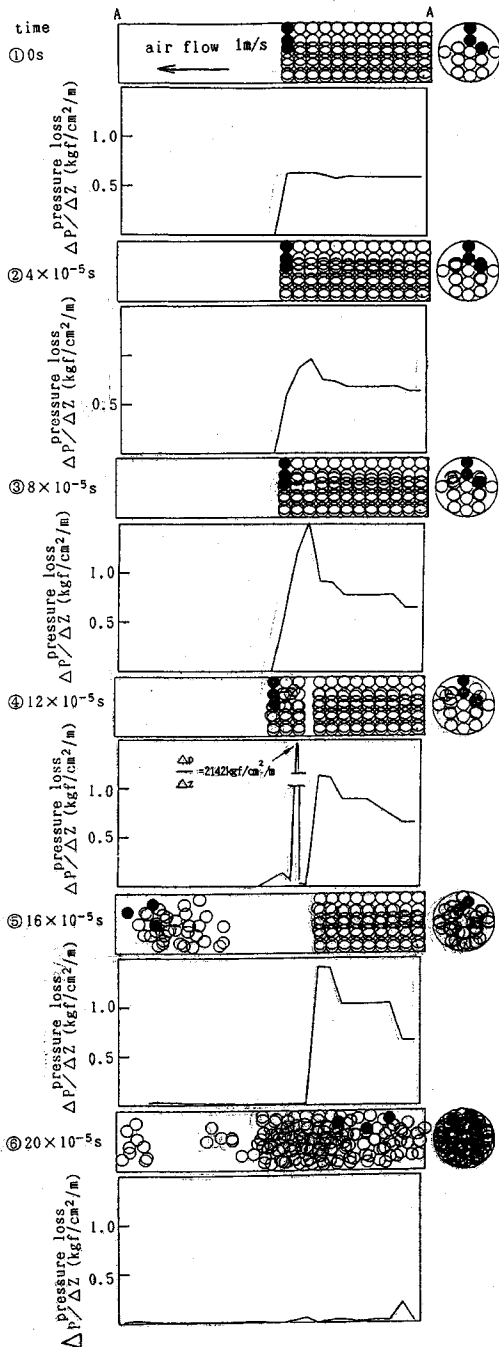


Fig.7 calculation of behaviour of adhesive particles packing in a pipe (air velocity 1.0m/s, particles number 156)

である。

② 付着力

法線方向の反発力 \vec{f}_{cni} が、粒子同士の付着力 F より小さいとき、

$$|\vec{f}_{cni}| < F \dots \dots \dots (43)$$

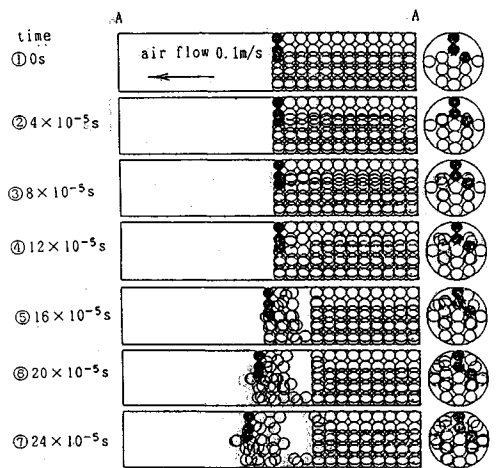


Fig.8 calculation of behaviour of adhesive particles packing in a pipe (air velocity 0.1m/s, particles number 156)

となり、粒子は付着していると考え、2粒子の平均速度を等しく与えた。また、計算の簡略化のため、付着した粒子の回転運動を拘束した。

以上の式より得られる粒子 i に働く接触力による力およびトルクは、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \vec{f}_{ci} &= \sum_j (\vec{f}_{cni} + \vec{f}_{cji}) \\ \vec{T}_{ci} &= \sum_j (r\vec{n}_{ij} \times \vec{f}_{cji}) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (44)$$

(2) シミュレーション結果

シミュレーションは、付着力のある凝集性粒子と付着力0の仮想粒子を想定した。セメントの初期状態は、①セメント粉体が水平管路の上部一部分を残して閉塞している場合、②管路面積のほぼ半分にはセメント堆積している場合について行った。シミュレーション条件を Table 5 に示す。空気抵抗係数は、Table 3 の係数を用いた。解析は3次元で行った。

セメント粒子は、粒子間、粒子-壁面間に反力が働かないように管路内全部に規則正しく一列に並べた付着力の無い粒子が、重力により安定した状態、およびこの状態から上半分の粒子群を除いた状態を初期状態とした。

以下にシミュレーション結果を示す。

① 微細管路を大部分閉塞している場合

Fig.7 に空気流速を 1 m/s のときの付着力のあるセメント粒子の崩壊の状況と、それぞれの位置での単位長さあたりの圧力損失量の時間変化を示す。

空気流は管路内を右から左に向かって流れており、管の左端は右端につながっている。シミュレーション結果は、流れに沿って粒子群の挙動を示したものと、管路の粒子配列・分布状況を断面図で示したものの二方向から表示した。さらに、3個のセメント粒子を黒く塗りつぶし、移動状況をとらえ易くした。

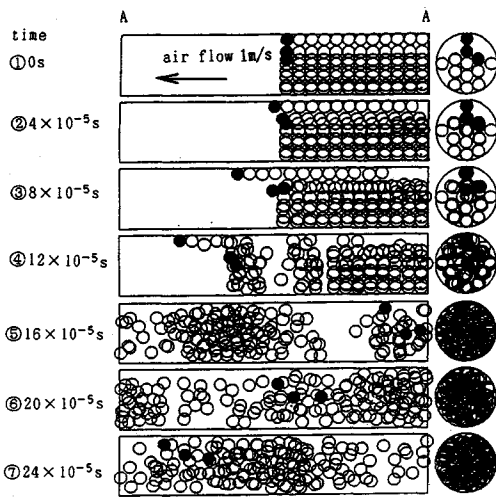


Fig.9 calculation of behaviour of adhesionless particles packing in a pipe (air velocity 1.0m/s, particles number 156)

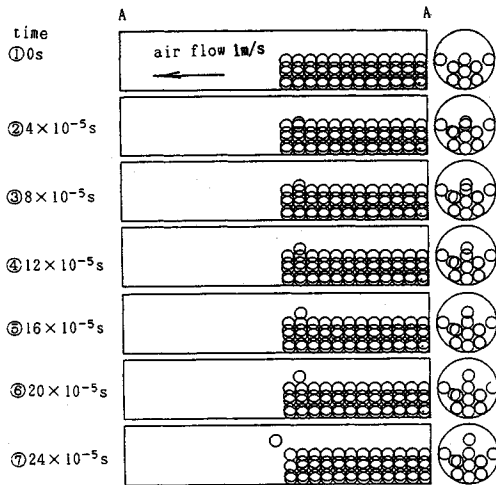


Fig.10 calculation of behaviour of adhesive particles accumulating in a pipe (air velocity 1.0m/s, particles number 106)

Fig.7の断面図に示すように、初期のセメント堆積層は管路を大部分閉塞しているものの、上半分近くは空気単相部であることがわかる。このため、シミュレーション開始直後には空気は管路上部の空気単相部に多く流れ、堆積層内の単位長さ当たり圧力損失は0.6 kgf/cm²/m程度と小さい。しかし、セメント粒子が僅かに移動することにより、セメント堆積層の先端部の圧力損失が徐々に増加し(①, ②)、セメント粒子が管路をほぼ閉塞した時点で、この位置の圧力損失が急増し、粒子群が塊として分離している様子(④)がとらえられている。

このように、付着力を有するセメント堆積層が管路断面をほぼ閉塞している場合、初めは流れに逆らって停止

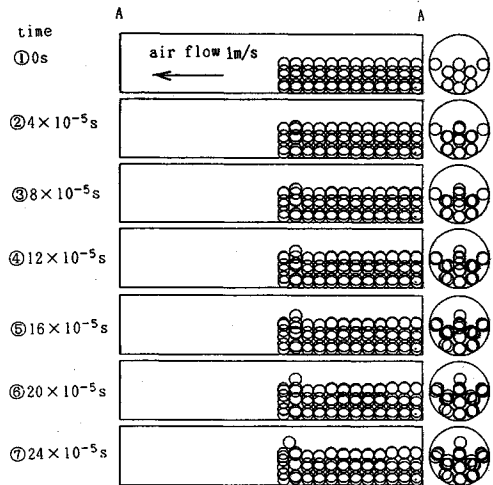


Fig.11 calculation of behaviour of adhesionless particles accumulating in a pipe (air velocity v=1.0m/s, particles number 108)

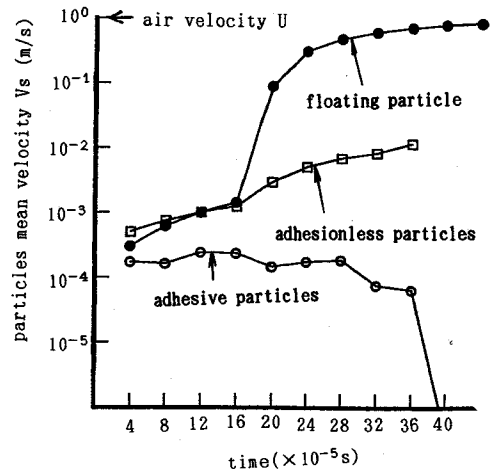


Fig.12 comparison of particle velocity

しているが、ある時点で下流側の堆積セメント層の一部が凝集した塊として分離・飛散する。

さらに、図中の黒く塗りつぶした粒子を追跡すると、このセメント粒子が堆積層から分離し、管路の左端に達した後、管路がつながっている堆積層の右端に粒子が衝突して層全体を崩壊・流動させる様子(⑥)がわかる。

また、Fig.8は空気流速0.1 m/sのときの付着力のあるセメント粒子の崩壊の状況である。

図より空気流速が0.1 m/sと小さい場合にも、セメント粒子が空気流路を閉塞による圧力損失の急増が生じ、セメント堆積層が崩壊することがわかる。崩壊形態は空気流速1.0 m/sの場合と同じく、堆積層先端部の粒子群が分離することがわかる。

次に、付着力の無いセメント粒子を想定し、付着力の

有無による堆積層の崩壊形態との対比を行った。

空気流速 1.0 m/s のときの付着力の無いセメント堆積層の崩壊状況を Fig.9 に示す。

Fig.9 より、付着力が無い粒子の場合、空気の流路に当たっている管路上部のセメント粒子が移動するとともに、堆積層先端部や堆積層全体の崩壊が生じ、粒子単位に分散する様子が得られている。また、管路上部や堆積層の先端部から、分離・流出した粒子が管路左端に達し、管路がつながっている堆積層右端に粒子が衝突する前に、層全体が粒子単位に崩壊していく。

このように、付着力が無い場合の堆積層の崩壊挙動は、付着力を有するセメント堆積層から、セメントが塊として分離する場合とは異なる崩壊状況が得られている。

② 管路面積のほぼ半分にセメントが堆積している場合

空気流速を 1 m/s としたときの付着力のあるセメント粒子の堆積層の状況を、Fig.10 に示す。

Fig.10 より、シミュレーション開始後には初期に不安定状態にあった粒子が一個堆積層より分離して浮遊するが、他の粒子は重力により微動した後は静止し、崩壊しないことがわかる。

付着力の有無による堆積層の挙動の対比を行うために、付着力の無いセメント粒子を想定してシミュレーションを行った。

結果を、Fig.11 に示す。

付着力が無い場合には、断面図の粒子配列が徐々に重なりはじめ、セメント層内の粒子が移動するとともに、堆積層の先端部から粒子が分離している様子がわかる。

Fig.12 に、セメント粒子の付着力の有無による管路内の堆積層の挙動への影響を対比するため、①付着力の有るセメント堆積層から分離した浮遊粒子一個の流速、②付着力のない場合の堆積層の粒子の平均速度、③付着力の有る場合の堆積層の粒子の平均速度（浮遊粒子を除く）を求め、それぞれの時間変化を示した。

付着力の無いセメント堆積層からは、粒子が単独で流出することは無く全体が崩壊・移動したため、すべての粒子の平均移動速度を求めている。このとき、空気流速は 1 m/s である。

Fig.12 より、浮遊粒子は加速されて空気流速とほぼ等しくなり、付着力のない粒子の堆積層も徐々に加速され移動速度が増加していることから、崩壊しつつあることが確認できる。しかし、付着力のあるセメント堆積層内の粒子は初期に微動するものの、安定後の平均移動速度はほぼ0となり、静止することがわかる。

(3) まとめ

セメント粒子は付着力を有していることから、気相中では単独粒子としてではなく凝集体として存在していると考えられる。このように付着性のある凝集体に対し粒

子一個一個の運動方程式を解いて全体の挙動を解析する個別要素法を適用する場合、凝集性をどのように考慮するかが大きな問題となる。

本論文では、セメント粒子の付着力を考慮したシミュレーションモデルにより、付着力を有するセメント堆積層の管路内での注入現象を解析し、あわせて付着力の有無による挙動の違いを比較することで凝集体の挙動の特徴をとらえた。

その結果、付着力のある場合、管路内の堆積層からのセメント粒子が一塊の粒子群として分離・移動する様子をとらえることができた。また、管路内に占めるセメント堆積層の面積が小さい場合には堆積層の崩壊は生じないが、管路内を閉塞するまで堆積した場合には空気流による閉塞セメント層の崩壊が生じる結果が得られ、付着力が注入性に大きな影響を及ぼすことがわかった。また、流体力の他にセメント粒子の衝突により、局所的に堆積したセメント層が崩壊する可能性もとらえることができた。

6. 結 論

本論文では、地盤中への粉体注入現象の解析を目的として、流体力に基づく注入理論を提案し、解析解や個別要素シミュレーションから、以下の結果を得た。

(1) せん断・引張り試験結果から、表面改質セメント粒子一個の付着力を、 $1.3 \times 10^{-9} \text{ N}$ と推定した。

(2) 一個のセメント粒子の付着力と、この粒子を付着している面から引き離そうとする流体力を比較し、流体力が付着力より大きい場合には粒子群は飛散・崩壊するが、流体力が付着力より小さい場合には粒子はその場に留まると考えて、注入限界の空気流速を求める注入理論を提案した。

(3) 注入理論の解析解より注入過程を、①浮遊セメント粒子、および土粒子・セメント堆積層表面に付着したセメント粒子の飛散、②堆積セメントの局所的崩壊の二過程で説明した。

後者の飛散過程でセメント粒子の飛散を説明する場合、表面改質セメントの付着力 $1.3 \times 10^{-9} \text{ N}$ から求められるセメント粒子一個の飛散流速の理論値は 0.8 m/s である。現場実験から得られる注入先端部での地盤空隙内の空気流速（実流速）は $0.1 \sim 0.4 \text{ m/s}$ であるが、地盤空隙内のセメント堆積率を $50 \sim 90\%$ と仮定すると、空気単相部の空気流速は $2 \sim 10$ 倍 ($0.2 \sim 4 \text{ m/s}$) となり、表面改質セメントの飛散流速の理論値と比較的よい一致が見られることを示した。

(4) 個別要素法を用いて、粉体注入現象のシミュレーションを行い、地盤空隙内に堆積した表面改質セメントが空気の流路をほとんど閉塞した場合に、はじめて空気流によるセメント層の崩壊が生じる結果を得た。こ

の結果は、解析解での局所的崩壊に対応している。また、空気流により局所的に崩壊・流動したセメント粒子群が次の堆積層に衝突して崩壊させることもシミュレーション結果から予測された。

今後の課題として、本論文で提案した注入理論を、凝集性セメント粉体、および従来のセメントミルクの注入現象などに適用するとともに、土粒子充填層内でのセメント粒子の注入シミュレーションを行うことが残っている。また、凝集性が大きいセメント粉体の粒度・付着力を空气中・液中で正確に測定し、モデル化することが必要である。

本論文では、セメント粒子の回りの流れ場が粒子表面や亀裂壁面の影響を受ける「壁効果 (Wall effect)」を考慮しなかったが、今後、微細空隙中への注入現象を検討するには壁効果を組み込んだ解析が必要である。

本論文をまとめるにあたって、大阪大学工学部辻裕教授に多くの助言を頂戴した。本論文のシミュレーションは、辻教授が開発されたプログラムを基にしている。ここに付記して、謝意を表す次第である。

参 考 文 献

1) 土木学会岩盤力学委員会編：軟岩一調査・設計・施工の

基本と事例一，土木学会，pp.1～22，1984年。

- 2) 堀家茂一・森邦夫・市川慧・柴田徹：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，pp.51～58，1988年。
- 3) 森邦夫・柴田徹・堀家茂一：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，pp.27～35，1992年。
- 4) 久保輝一郎・神保元二・水渡英二・高橋浩・早川宋八郎編：粉体理論と応用改訂二版，丸善（株），pp.329～340，1985年。
- 5) 島田俊介・佐藤武・多久実：最先端技術の薬液注入工法，理工図書（株），pp.129～191，1989年。
- 6) 佐藤邦明・伊藤洋：岩盤内浸透流の時間依存と目詰まり機構，土と基礎，36-4，pp.21～25，1988年。
- 7) 堀家茂一：地盤材料に対する空気式グラウト工法の研究，京都大学学位論文，1989年。
- 8) 狩野武：粉体輸送技術，日刊工業新聞社，pp.53～62，1991年。
- 9) たとえば J.K.Vennard：Elementary Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., pp.301～303, 1961年。
- 10) 井伊谷綱一・三輪茂雄：化学工学通論Ⅱ，朝倉書店，pp.131～144，1982年。
- 11) 辻裕：空気輸送の基礎，養賢堂，pp.32～44，1984年。
- 12) 田中敏嗣・石田俊哉・辻裕：水平管内粒状体プラグ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，pp.60～67，1991年。

(1992.8.4 受付)

ANALYTICAL STUDY ON FINE PARTICLE INJECTION TO THE GROUND

Kunio MORI, Toru SHIBATA and Shigekazu HORIYA

Powder grouting method, by which surface improved cement particles are injected to the ground by means of compressed air, can ensure the injection length required for soft rocks. In this paper, a model of powder grouting mechanism is presented by considering the interaction between adhesion of a cement particle and drag force by air. A criterion for ensuring the satisfactory injection is also presented by the use of simplified analysis based on the model and a simulation analysis in which DEM is employed.