

# 地盤中への粉体注入現象の研究

森 邦夫\*・柴田 徹\*\*・堀家茂一\*\*\*

微粒セメント粉体を圧縮空気で地盤中に注入する「粉体注入工法」は、従来のセメントミルクでは改良が困難な地盤の改良を目的に開発された。本論文では、地盤中空隙へのセメント粉体の付着により空隙内空気流速が増加し、一旦付着したセメント粉体を飛散させる「再飛散」が粉体注入の主機構であることを室内実験より見だし、現場実験から表面改質したセメント粉体の再飛散流速を0.1~0.4 m/sと予測した。

**Keywords** : aerosol, powder grouting, permeability

## 1. 概 要

近年、良好な岩盤を基礎とするダム建設の適地が少なくなり、岩質の悪い軟岩地盤に対してもダムサイトの建設を余儀なくされてきている。軟岩地盤においては、浸透流抑制のため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重要となるが、従来の注入工法には軟岩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、十分な注入長が得られず、計画通りの注入効果が上げられないという問題があった。

このように、セメントミルクは懸濁液の浸透性が低く軟岩に対して注入効果を上げられないため、注入性の優れた工法として、「粉体注入工法」が最近になって開発された<sup>1)~3)</sup>。これは、セメント粉体を圧縮空気とともに地盤中に注入する工法であるが、著者らは多孔質軟岩に対する微粒セメント粉体の注入実験に基づいて、粉体注入は浸透性に優れ、透水性の低減効果が大きいことを既に報告した<sup>2)</sup>。ついで、セメント粉体の表面を改質処理として凝集性・付着性を低下させた「表面改質セメント」に着眼し、これを注入材として活用したときの有用性について検討してきた。

本論文では、まず、表面改質しない微粒セメント粉体の室内注入実験と理論的考察から、粉体注入機構の考察を行う。ついで改質セメント粉体の物性を、引張り・せん断試験によって調べた後、この改質セメントを用いた現場実験より、粉体注入工法が優れた浸透注入性を示すことを明らかにする。また粉体が注入される限界空気流速についても実験と考察を行っている。

## 2. 微粒セメント注入

### (1) 実験方法

微粒セメントを、圧縮空気中で一定濃度の粉塵状にして砂充填層に注入し、空気量と充填層内圧力の経時変化、セメント注入面の移動状況、充填層内密度変化を測定・観察し、注入現象の討を行った。実験は図-1に示すように、セメント粉体のホッパーの下端の管路との接続部にノズルを設け、ノズル周辺に生じる負圧場により、ホッパー中の微粒セメントを吸い込み気中に均一に分散させて、下降空気流として砂充填層に注入した。空気中に分散させたセメント粉体は、管路で砂充填層とフィルター式濃度計に分岐しており、一定時間毎に空気流を濃度計に通して濃度を確認することができる。濃度が設定条件をはずれる場合には、ノズル位置とホッパーからの粉体供給バルブを調整した。また、エアーチャンバーの手に積算型流量計と圧力計を設置し、大気圧換算空気流量を求めた。

砂充填用モールドは、直径10 cm、長さ50 cmの亚克力製で、セメント粉体の注入状況を目視観察できる。モールドの上端より5, 25, 45 cmの位置で上部圧、中間圧、下部圧を、また充填層上端の管路部で注入圧を測定した。注入中には、砂充填層内の密度変化をRI(ラジオアイソトープ)密度計により測定した。RI密度計の測定誤差は、0.014 g/cm<sup>3</sup>である。

充填層の砂試料、および注入に用いた微粒セメントの粒度分布を図-2に示す。図中、微粒セメントの粒度は、試料を電解液中で分散させた状態で測定するコールターカウンター法で得られたものであり<sup>4)</sup>、注入実験の空気中では、凝集して測定値(平均粒径 $D_{50}=4\mu\text{m}$ )より大きくなっていると考えられる。砂粒子の平均粒径は1200  $\mu\text{m}$ 、砂充填層密度は1.617 g/cm<sup>3</sup>、空隙率は0.39である。砂は気乾状態のものを用いた。

\* 正会員 (株)熊谷組技術開発本部土木技術第2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 (株)熊谷組技術開発本部土木技術第2部部長

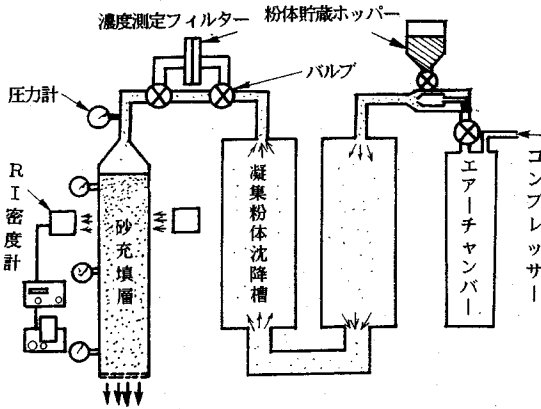


図-1 粉体注入試験装置

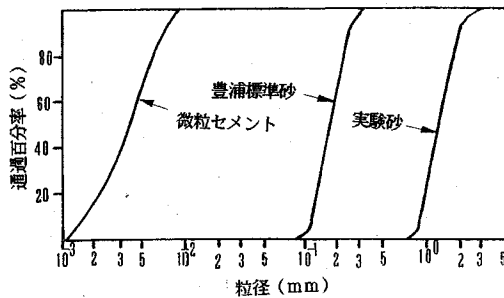


図-2 砂およびセメント粉体粒分布

(2) 実験結果

平均粒径 1200 μm の砂充填層に、平均粒径 4 μm の微粒セメント粉体を粉塵状で3時間注入したときの注入圧力、充填層内圧力および空気流量の経時変化を図-3に示す。この試験では、期間中を通じて注入濃度を一定に保つことができず、大気圧換算空気量 1 m<sup>3</sup> [Normal] 当たり 10~100 g の範囲を維持した。また空気流量は、一定に保持する実験条件のもとで注入を行ったが実際には約2時間の注入後に透気性が低下したため一定値を維持することができなかった。

図-3より、注入圧力は注入開始後に徐々に増加し、60分まで充填層内の上部圧との差が大きくなること、60分間注入以後は、上部圧と中間圧の差が大きくなることわかる。これは注入開始直後は上部圧力測定位置(試料表面から5 cmの深度)までに多く注入され、その後中間圧測定位置(試料表面から25 cmの深度)まで注入浸透面が進行するためと考えられる。

図-4に目視観察から得られた注入先端面位置と、RI密度計による充填層内部の密度増加量の経時変化とを対比させて示す。これらの図から、粉体注入面が徐々に深部に進行していく様子ををうかがうことができる。

(3) 注入現象の考察

セメント粉体が砂充填層中に注入していく現象は、微

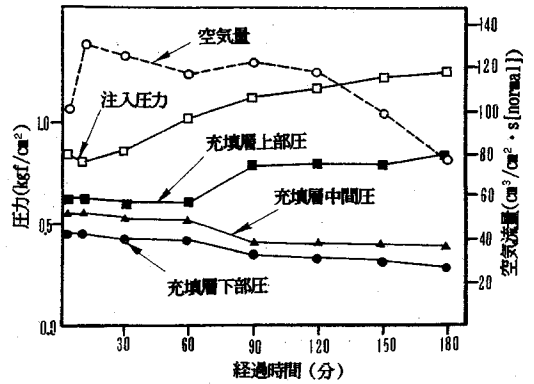


図-3 圧力と空気量の経時変化

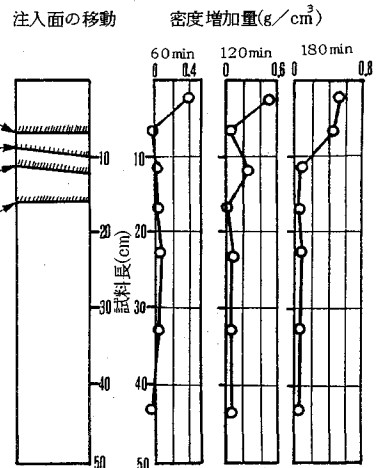


図-4 注入境界面の移動と密度の経時変化

細粉塵の付着現象であり集塵理論が適用できるものと仮定する。集塵理論によれば、砂充填層への注入効率として、層捕集効率 ( $E$ ) が次式で定義される<sup>5),6)</sup>。

$$E = 1 - C_e / C_i \dots \dots \dots (1)$$

ここに

$C_i$  : 入口部での注入粉体濃度

$C_e$  : 出口部での流出粉体濃度

である。

そしてこの層捕集効率は、定常物質収支モデルを用いた1次元流の場合には

$$E = 1 - \exp \left[ -\frac{3}{2} \frac{1-n}{n} \eta_0 \frac{L}{d_s} \right] \dots \dots \dots (2)$$

となる。

ここに

$d_s$  : 砂粒子径,  $n$  : 空隙率,  $L$  : 注入深度

$\eta_0$  : 単一粒子捕集効率

である。

層捕集効率 ( $E$ ) は、深度  $L$  までの間に注入粉体が捕集される比率であり、 $E = 100\%$  に達したときが注入限

界長となる。

式(2)中、単一粒子捕集効率  $\eta_0$  は、粉体が砂1個に捕集される確率

$$\eta_0 = \frac{\text{1個の砂粒子の上流で、粉体がある領域に入れば必ず捕集される領域の断面積}}{\text{流れに対する砂粒子1個の断面積}} \dots\dots\dots (3)$$

であり、種々の式が提案されている<sup>5)~7)</sup>。

大谷らは、0.02~2.02  $\mu\text{m}$  の NaCl 粒子と PSL (ポリスチレンラテックス) 粒子を流速 0.4~120 cm/s で粒子径 0.5~2.0 mm 充填層に注入した実験結果より、単一粒子捕集効率として次式を提案した<sup>7)</sup>。

$$\eta_0 = A(Re) S_c^{f1(Re)} Re^{f2(Re)} + G / (1+G) + S_{ske}^3 / (1.4 \times 10^{-2} + S_{ske}^2) + 16R^{2-Re/(Re^{1/3}+1)^3} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$f1(Re) = -2/3 + Re^3 / [6(Re^3 + 2.0 \times 10^5)]$$

$$Re < 30 \text{ のとき } A(Re) = 8.0, f2(Re) = -2/3$$

$$G = C_m \rho_p d_p^2 g / 18 \mu u_i$$

$$S_{ske} = [1.0 + 1.75 Re(1-\alpha)] / (150\alpha)$$

$$R = d_p / d_s$$

$Re$ : レイノルズ数  $C_m$ : 補正係数  $\rho_p$ : 粉体密度  
 $d_p$ : 粉体径  $g$ : 重力加速度  $\mu$ : 粘性係数  
 $u_i$ : 間隙内平均流速  $\alpha$ : 充填率 (1-n)  
 $S_c$ : シュミット数

である。式(4)は、単一粒子捕集効率が各種の付着力の和で得られるものとして、それぞれの要因にかかる常数を式(2)を基に回帰式から求めたものである。式(4)は充填層内粒子に捕集された NaCl 粒子、および PSL 粒子は捕集された所で留まることを前提としている。

今回の実験では、セメント粉体の粒子径を 4  $\mu\text{m}$  (50% 径) として注入圧 1 kgf/cm<sup>2</sup>、空気流速 132 cm/s、砂充填層空隙率 0.4、砂粒子径 1200  $\mu\text{m}$  である。これらを用いて式(4)より単一粒子捕集効率  $\eta_0$  を求め、式(2)に代入すれば各深度における層捕集効率  $E$ 、すなわち理論式による注入限界を推定することができる。

ここで、図-4で説明した RI 密度計による密度増加量はセメント注入量とみなせるので、この密度増加量から実験層捕集効率の実験値  $Er$  を次式により求めることができる。

$$Er(n) = \sum_{i=1}^n \Delta \rho_i \times Li / \rho_{sum} \dots\dots\dots (5)$$

$$\rho_{sum} = \sum_{i=1}^N \Delta \rho_i \times Li \dots\dots\dots (6)$$

ここに

$Er(n)$ : 測点  $n$  までの層捕集効率の実験値、  
 $\Delta \rho_i$ : 測点  $i$  での密度増加量、  
 $Li$ : 測点  $i$  の測定区間長 ( $L = \sum_{i=1}^N Li, L = 50 \text{ cm}$ )  
 $N$ : 総測定番号、 $n$ : 測定点番号

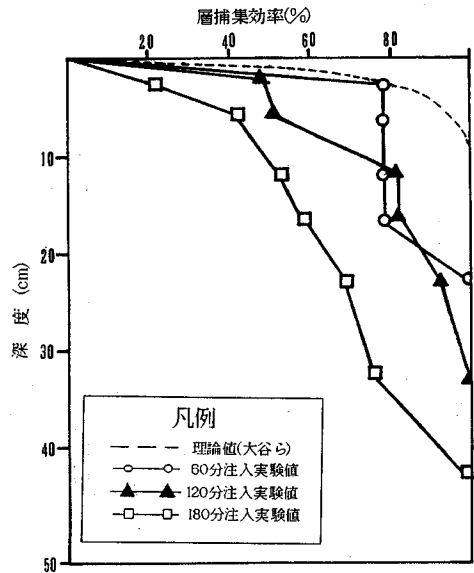


図-5 層捕集効率の推定値と実験との比較

$\rho_{sum}$ : 総注入セメント量

である。

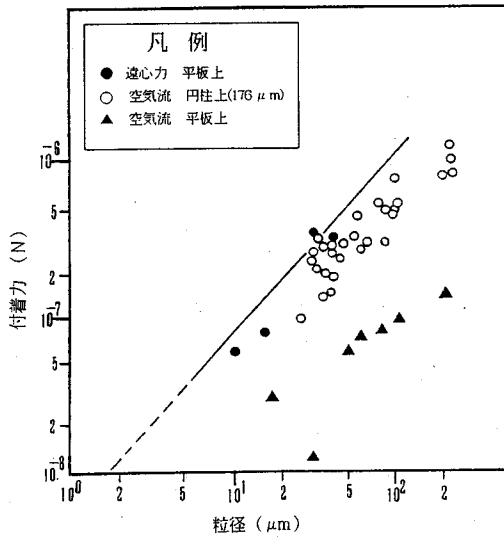
以上の手順で求めた 60, 120, 180 分間注入後の時間毎の層捕集効率の実験値 ( $Er$ ) と、式(2)、式(4)に上記の注入試験条件(砂粒子径、セメント粉体粒子径、充填層内流速、空気圧など)を代入して理論的に得られた層捕集効率推定値 ( $E$ ) を図-5に示す。図中、実線は実験結果、破線は理論式による推定値である。

図によれば、60分間注入の場合にはセメントの実測層捕集効率は、充填層上部では推定値と比較的によく一致している。しかし注入時間が120分間以上になると、実測値は推定値に比較して深部まで注入されていることがわかる。

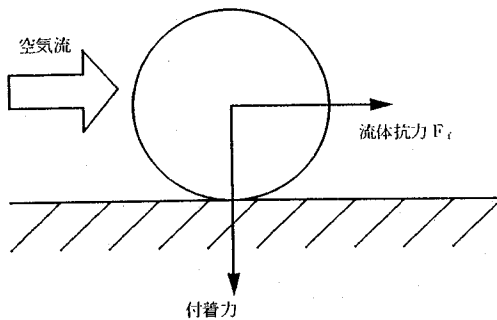
以上より、粉体注入過程の初期は集塵理論で説明されるものの、時間とともに粉体注入面が深部に進む状況は集塵理論では説明できないと結論される。その原因はいくつか考えらるが、著者らは注入が進むに従って集塵過程とは異なる注入機構が寄与しているものと考えた。このような別の注入機構とは、実験中に粉体注入境界面が崩壊しながら深部に注入されていく現象が観察されていたことから、付着したセメント粉体粒子が空気の流体抗力により再び飛散する現象、すなわち「再飛散」であると推測した。

(4) 粒子の再飛散流速

微粒セメントのような微粒粉体の場合、その結合力には Van der Waals 力、静電気力、液架橋力などがあり、一方、砂粒子に付着したセメント粉体を再飛散させる外力としては、空気流による流体抗力、他粒子の衝突などが考えられる。



図—6 微細ガラス粒子の粒径と付着力の関係<sup>8)</sup>



図—7 平板上の粒子に働く力<sup>8)</sup>

金岡ら<sup>7)</sup>は平板と円柱に付着した微細ガラス粒子に対して、空気流、または遠心力により飛散させる実験を行い、付着力と粒子径との関係を図—6のように求めている。

図—6は直径 10 μm 以上の粒子に対する実験結果であるが、図中で金岡らが理論解より付着力と粒径との関係を求めた実線を外挿して、径 4 μm のガラス粒子の結合力を推定すると約 10<sup>-8</sup> N が得られる。ここで結合力 10<sup>-8</sup> N に相当する流体抗力を与える飛散流速を求めてみる。

粒子に働く流体抗力  $F_f$  は、図—7のように平板上にあると考えると、式 (7) で与えられる。

$$F_f = C_D \pi \rho_f / 8 d_p^2 u^2 \dots \dots \dots (7)$$

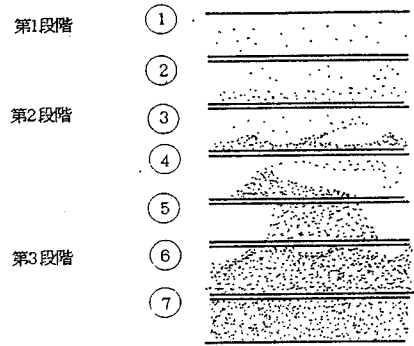
ここに

$C_D$  : 抗力係数  $Re < 1$  のとき  $C_D = 24/Re$

$\rho_f$  : 空気密度 (大気圧, 27°C では 1.16 kg/m<sup>3</sup>)

$u$  : 空気流速

である。



図—8 注入過程の分類<sup>9)</sup>

上式より、ガラス粒子の結合力 10<sup>-8</sup> N に対する飛散流速は、約 7 m/s となる。ガラス粒子が結合して、20 μm 程度の団塊を形成した場合を想定すると、図—6より粒子結合力は 10<sup>-7</sup> N であり、飛散流速は約 3 m/s となる。この実験で求められる流速は間隙内平均流速に対応すると考えられる。

セメント粉体では、図—3、図—4の実験より充填層内空気流速約 1.23 m/s (空隙率  $n=0.4$  より間隙内平均流速は約 3 m/s) で注入を開始して、60 分間注入後より再飛散現象が見られた。これは、充填層空隙がセメントで満たされた空隙率が小さくなるため間隙内平均再飛散流速 (流速/空隙率) が大きくなったためと考えられ、微粒セメント粉体の間隙内平均再飛散流速は 3 m/s 以上であると推定される。

(5) 粉体注入過程の分類

以上、粉体注入現象を付着 (集塵) と再飛散の過程を併せたものとしてみてきたが、この現象には、粉体輸送の分野で行われている管内輸送状態の分類が当てはめられるようである。

すなわち図—8において、第1段階 (①, ②) は、粉体が分散して粉塵状で移動する初期の注入過程。第2段階 (③, ④, ⑤) は、空気流速の遅い領域に粉体が密に存在して飛散・跳躍・流動する状態で、粉体は群になり始める。第3段階 (⑥, ⑦) は、プラグ状でしゅう動する状態で、最終的には粉体が密に充填され注入が完了する過程である。

以上の分類において、第1段階の注入現象は集塵理論により、また第2段階は再飛散流速により説明が可能である。なお粉体注入の対象とする地盤では、空隙が小さいため第3段階の状態になれば、注入面はすぐに停止すると考えられる。

さて粉体注入工法は、注入した微粒セメントが砂充填層 (亀裂空隙) で集塵捕集され、再飛散して深部まで注入していく現象を利用する工法である。しかし、実際の注入では、数 m/s 以上の間隙内平均再飛散流速を地盤中で確保することは困難である。また連続した亀裂など

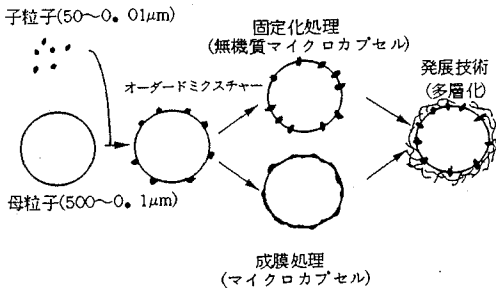


図-9 粉体の表面改質の概念<sup>10)</sup>

に対しては、粉塵状態で粉体は遠くまで注入されることが集塵理論から予測されるが、幅 10 μm 程度の微細亀裂が連続した地盤では、実用的な注入長は得られないと考えられる。したがって、粉体注入工法を実用化するには、付着力を小さくして、小さな流速で再飛散を可能とすることが必要となる。

### 3. 表面改質粉体注入実験

#### (1) 表面改質の特性

粉体注入工法を実用化するためには、粉体の付着力を低下させて、再飛散性の向上をはかる必要がある。このことに関して、著者らは最近の粉体表面処理技術によって開発した「表面改質」セメントに注目し、この粉体材料の注入性を検討してきた。

「表面改質」とは、粉体表面を化学的・物理的に処理して粉体の付着力を低下させ、粉体材料に新しい機能を生じさせるもの、その概念モデルは図-9のように示される<sup>10)</sup>。まず芯物質となる母粒子（セメント粉体）、まわりにつける微粒子の子粒子を適当な配合比で混合し、粉体の帯電現象を利用して母粒子の周囲に子粒子を付着させたオーダードミクスチャー（ordered mixture）を形成した後、固定化処理、あるいは成膜処理して改質粒子が作られる。またこれらを組み合わせさせた多層化処理も行われている。

表面改質によって付着力は大きく低下するが、これは Van der Waals 力、静電気力、液架橋力などが低下するためである。この場合、表面形状、改質材料、方法などの違いで物理・化学的挙動が複雑に異なるので、付着力の低下量を詳細に求めることは困難であるが、Van der Waals 力、液架橋力、静電気力が 2 オーダー低下すれば、式 (7) より間隙内平均再飛散流速は 1/10 (数 10 cm/s) となるから、注入性は明らかに向上することになる。

さて表面改質処理の方法・材料は多種多様であるが、本研究で用いた粉体は、改質処理法の中の乾式処理法で改質したものである。次に表面改質粉体と無処理粉体の違いを把握することを目的に実地したせん断・引張り試験の結果を述べる。表-1 に試験条件を、図-10、図-

表-1 せん断・引張り試験条件

項目	試験条件
空隙率	0.593~0.660
予圧密応力	50g/cm <sup>2</sup>
垂直応力 (せん断試験)	1.1g/cm <sup>2</sup> , 3.2g/cm <sup>2</sup>

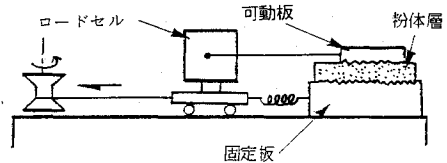


図-10 せん断試験装置図

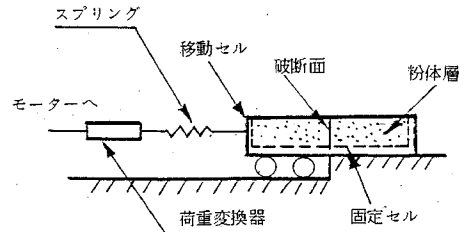


図-11 引張り試験装置図

11 に試験装置を示す。

せん断実験は、固定板上に粉体層面が平らになるようにセットし、その上に可動板と予圧密荷重を載せた後、予圧密荷重を除荷してモーターでロードセルと可動板を引張り、ロードセルにかかるせん断力を測定する。粉体層の側面には壁がなく、側方フリーの状態である。

引張り試験では、予圧密後、予圧密荷重を除荷して成形して移動セル水平方向にモーターにより低速で引張り、固定セルとの間で粉体層を破断させて、その時の力をスプリングを介して荷重変換器で測定する。

この装置を用いて、微粒セメント粉体と改質処理をしたものの試験結果を図-12 に示す。なお両者の粒径に関しては、液相中での測定結果（コールターカウンター法<sup>11)</sup>によると、改質セメントの粒度分布は微粒セメントと同じであり、改質処理による違いは生じていない。

図より、表面改質処理による内部摩擦角の変化はほとんど無いとみられるが、粘着力は約 1/3 に低下している。この表面改質による粉体層としての粘着力の低下量から、粒子 1 個の付着力の低下量、すなわち再飛散性の変化を推定することは困難である。そこで改質セメントの注入実験を行い再飛散流速を推定することにする。

#### (2) 表面改質セメントの室内注入実験

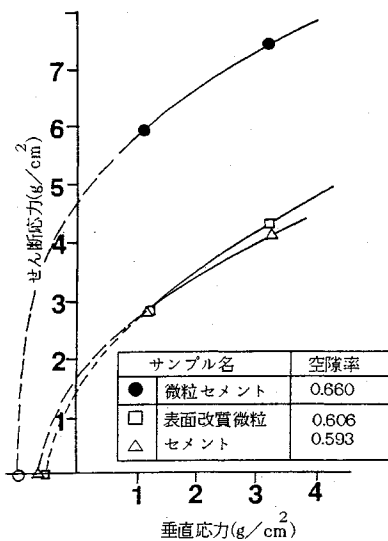


図-12 セン断・引張り試験結果

表-2 注入実験条件と結果<sup>1)</sup>

項目	無処理微粒セメント	表面改質処理セメント
充填層材料	豊浦標準砂	
φ-挿入寸法	φ 10cm長さ36cm	
注入圧	3kgf/cm <sup>2</sup>	3kgf/cm <sup>2</sup>
初期流速	131cm/s	97cm/s
注入長	4.5cm	36cm以上

セメント粉体に対して、表面改質の有無による比較注入実験を行い、表面改質による注入性の改善効果について検討した。

表面改質粉体の注入実験条件と結果を表-2に示す。

注入試験装置は、図-1に示したのと同じであるが、粉体供給装置はテーブル式フィーダーを用いて粉体濃度を安定した条件のもとで注入した。このとき、凝集粉体沈降槽、濃度測定フィルターは取り外した。

対象砂は豊浦標準砂である。

表-2の最下段に示すように、表面処理により注入長は8倍以上の値となり実用的な注入性が得られたが、このように注入性が大きく改良されたのは、再飛散が生じたためと考えられる。因みに間隙内平均流速を空隙率0.3のもとで計算すると約3m/sとなり、この流速のもとでは活発な再飛散が生じていたと推定できる。

(3) マサ土地盤の注入実験

再飛散が生じる限界流速を求めることは、粉体注入工

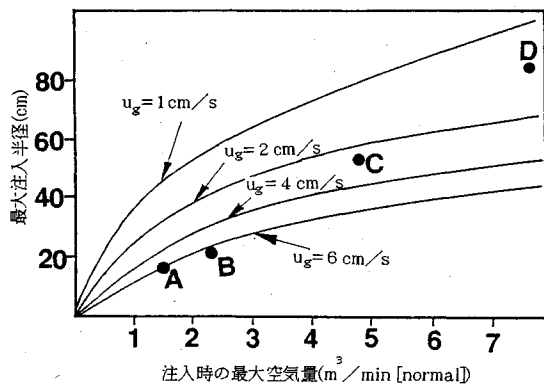


図-13 粉体注入最大空気量と注入半径の関係

法の浸透範囲を推定する上で重要である。そこで表面改質粉体の再飛散が生じる限界流速を、マサ土に対する現場実験から推定することを試みた。対象マサ地盤は不飽和地盤である。注入前に、この地盤を乾燥することを目的として、一定時間空気のみを地盤中に送気して空気量が安定したことを確認した。

図-13は、マサ土地盤への粉体注入実験から得た注入中の最大空気流量と注入半径の関係を示す図である。ここで注入半径は注入後に掘削し、観察から得られた値である。

図中ABはGL-1.0 mにおいて、また、CDはGL-5.0 mでの注入試験結果である。なおGL-5.0 m深度での採取試料より、マサの空隙率は約0.15~0.25、現場透水試験より透水性は約10ルジオンオーダーであった。

いま空気は注入ポイントを中心として球状に広がるのみなし、かつ最大注入半径での空気圧は大気圧に等しいとして、このときの流速を再飛散流速と仮定すれば、

$$Q_{normal} = 4\pi r^2 u_g \dots \dots \dots (8)$$

が成立する。

ここに

$Q_{normal}$  : 注入時の大気圧換算最大注入空気流量

$r$  : 最大注入半径

$u_g$  : 再飛散流速 ( $u_g = u \times n$ )

$u$  : 間隙内平均再飛散流速

$n$  : 空隙率

である。

上式より、再飛散流速  $u_g$  をパラメータとして注入空気量と最大注入半径の関係を求めると、図-13中の実線曲線群が描かれる。そしてこれら曲線群との対比から、CDポイントでは式(8)の  $u_g = 2 \sim 3$  cm/s (間隙内平均再飛散流速  $u = 10 \sim 20$  cm/s)、ABポイントでは  $u_g = 6$  cm/s (間隙内平均再飛散流速  $u = 20 \sim 40$  cm/s) が得られる。ただしABでは地表面に近いために、空気が地表面に流出して側方への浸透半径が小さくなったこ



(a) Bポイントにおける状況



(b) Dポイントにおける状況

写真-1 マサ土地盤への注入状況

と、風化が進み空隙率は大きくなっていることなどから、間隙内平均再飛散流速は上記の値より小さいと考えられる。いずれにしても、空気流量は注入中に一定でなく、また再飛散開始時の空隙率が不明であることなどから、間隙内平均再飛散流速を特定することは困難であるが、およそ10~40 cm/sと推定される。

写真-1に、BDポイントへのセメント注入状況を示し、これに対応するスケッチを図-14に示す。

写真は注入後掘削・観察してフェノールフタレイン溶液が赤く反応するセメント注入部分を残して撮影した。Dポイントでは、セメント粉体は高さ約1m、最大半径約80cmで風化の進んだ部分を中心にいびつな形で注入されており表面を目視観察した結果、全体に浸透注入されていることが確認された。また亀裂の大きい部分では空隙を閉塞するように脈状に注入していることが認められた。

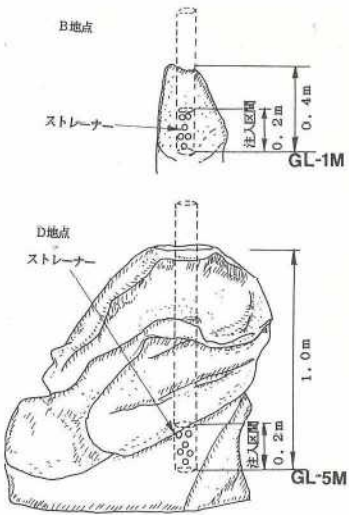


図-13 注入状況のスケッチ



写真-2 粉体注入したマサ土の顕微鏡写真

この団塊から採取した岩片の顕微鏡写真を写真-2に示す。写真中、土粒子間に白く充填されているのがセメントであり、マサ土粒子間の孔隙に均質に浸透注入されている様子が認められる。

写真-3に偏光顕微鏡写真を示す。

この写真は、フェノールフタレイン溶液によって赤く反応したセメント注入部分から薄片を作成して得られたものである。写真より、マサ土は風化して数10~数100 μmのブロックに分割され、このブロックの間の亀裂は数10 μm以下の幅で不連続な分布をしていることが読み取れる。セメント注入部分は、線状の黒い部分であって、従来のセメントミルク注入では浸透が不可能といわれてきた幅約10 μmの微細亀裂にまで、セメント粉体が注入できている。未注入の微細亀裂部も少し残っているが、注入部分にくらべると僅かである。

なお従来のセメントミルクは分散剤の分散効果が時間とともに低下し次第に凝集しはじめるため、難透水性地



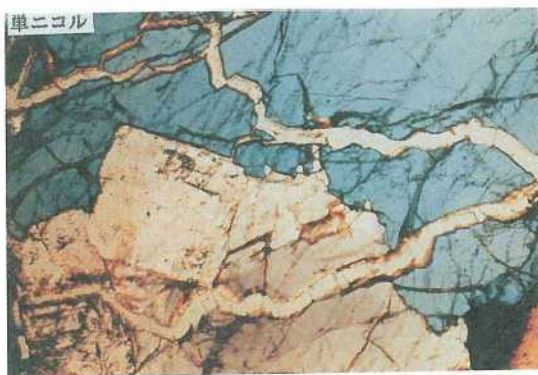


写真-2 粉体注入したマサ土の偏光顕微鏡写真

盤、特に微細亀裂に対する浸透注入は困難であった。これに対して粉体注入では、粉体が再飛散し、また粉体の付着力も小さいことから、優れた注入性が得られるものと考えられる。

#### 4. 結 論

粉体注入工法における注入過程について、実験と理論的検討を行い、以下の結果を得た。

(1) 粉体の注入現象は、集塵過程と再飛散過程とに分けることができる。

(2) 粉体注入工法において、注入長を決定する要因は再飛散現象であり、表面無処理の微粒セメントの場合、空隙内平均再飛散流速（実流速）は10数 cm/s～数 m/s と推定される。

(3) 表面改質により、粉体の付着力が低下して再飛散性が大きくなる。このことが、注入性を大きく向上させた原因と考えられる。

(4) 粉体注入工法では、注入時の時間経過による再飛散性の低下はない。このため、従来のセメントミルク注入のように時間とともに注入性が低下する工法より優

れた特性を有するものと考えられる。

(5) 表面改質セメントを用いた注入工法では、透水性が10ルジオンオーダーの軟岩に対して注入半径約0.8 mという実用的な注入長を確保した。このときの空隙内平均再飛散流速は10～40 cm/sと推定された。

(6) 従来のセメントミルク注入で、浸透がほとんど不可能であった10ルジオンオーダーの軟岩では、表面改質セメントは、風化の進んだ部分にいびつな形で浸透注入される。またこの場合、偏光顕微鏡写真より直径10 μm程度の亀裂にまで注入できていることが確認された。

本論文をもとめるにあたって、金沢大学物質化学工学科江見準教授に多くの助言を頂戴した。また（財）ダム技術センター、三協バイオテック（株）の各位、ならびに（株）熊谷組北健二氏に数々の協力を賜った。ここに付記して、謝意を表する次第である。

#### 参 考 文 献

- 堀家茂一・北健二・森邦夫：粉体注入工法の開発，第7回エアロゾル科学・技術研究討論会，1989。
- 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-9，1988。
- 高橋堅太郎：ドライグラウト工法による原位置注入試験，ダム技術，No.27，1989。
- 遠藤邦彦：諸環境における堆積物の粒度測定法，地学雑誌，Vol.98，No.6，1989。
- 高橋幹二編：応用エアロゾル学，第3章（江見準），養賢堂，1984。
- 吉岡直哉・江見準・安並正雄・佐藤英之：充填層に粉塵負荷を伴う場合のエアロゾルのろ過，化学工学，Vol.33，No.10，1969。
- Yoshio Otani, Chikao Kanaoka and Hitoshi Emi: Experimental Study on Aerosol Filtration by Granular Bed over a Wide Range of Reynolds Numbers, Aerosol Science and Technology, No.10, 1989。
- 金岡千嘉男・江見準・菊川範夫・明星敏彦：壁面からの微小粒子の飛散，粉体工学会誌，Vol.24，No.4 1987。
- 辻裕：空気輸送の基礎，第5章，第8章，養賢堂，1984。
- 小野滋次：粉体の表面改質装置，粉体と工業，Vol.19，No.11，1987。
- 奥山喜久夫：エアロゾル粒子の沈着と凝集現象，第3回基礎エアロゾル講座，1986。
- 江見準：気中微粒子の動力学的挙動と捕集，混相流シンポジウム実行委員会（混相流のモデリングとシミュレーション），1986。
- 堀家茂一：地盤材料に対する空気式グラウト工法の研究，京都大学博士申請論文，1989。

(1990. 11. 6受付)



---

## STUDY ON MECHANISM OF FINE PARTICLE INJECTION TO THE GROUND

Kunio MORI, Toru SHIBATA and Shigekazu HORIYA

Fine cement particle injection method was invented for the purpose of grouting the ground with low permeability where had not been improved by conventional cement milk grouting. This method aims at injecting fine cement particles into the ground or bedrock together with air in an aerosol state.

In this paper, we describe that the powder grouting method is based mainly on the phenomenon of reentrainment of the fine particles caused by increase of actual air velocity due to narrow space of pores in the ground which is filled up with them, and show that the reentrainment velocity of surface improved cement is about 0.1 to 0.4 meters per second.

---