微粒セメント粉体の地盤中への注入現象の解析

森 邦 夫*

The Analysis of Fine Cement Particle Injection into the Ground

by

Kunio MORI†

In this paper, a model of cement particle injection into the ground is proposed by considering the interaction between the adhesion of a cement particle and the drag force caused by air.

Pressure loss by accumulated of packed cement particles in a pipe is simulated by the Distinct Element Method (DEM), and a criteria for ensuring the satisfactory injection is presented.

Key Words : Fine Cement Injection, Distinct Element Method

1. はじめに

浸透流抑制・地盤補強を目的として、セメントの懸濁液(ミルク)を地盤中に注入する工法がダムやトンネル、橋梁などの基礎処理法として採用されている。しかし、これまでのセメントミルクを主体とした注入工法では、構成鉱物間の固結力が小さい軟岩盤や透水係数が 10^{-4} m/s以下の小さい地盤に対しては十分な浸透注入長(一般には0.3m以上)が得られないという問題があった。

著者は、微粒セメント粒子の表面を改質処理して付着力を低下させた「改質セメント」を、圧縮空気とともに注入する「粉体注入工法」を開発し、この工法により透水係数 10^{-5} m/sオーダーの地盤材料に浸透注入長0.36m以上(試料を透過)、軟岩盤に浸透注入半径約0.8mという実用的な注入性を得た¹⁾。さらに粉体注入

工法の現場実験から、浸透注入半径と空気量が相関関係にあることに注目して、注入端の地盤空隙内の空気流速が $0.1\sim 0.4$ m/sであることを明らかにしてきた¹⁾。

本報では、改質セメント粒子に働く空気の流体力と改質セメント粒子の付着力との対比から注入性を判断する注入モデルを提案し、この注入モデルのシミュレーション結果より、地盤空隙内に堆積した付着力を有するセメント粒子が移動する際の圧力損失の変動特性と、セメント注入時の管理基準を明らかにする。

2. 微粒セメントの力学特性

セメント粒子1個の付着力 F は、セメント粒子の粒径 d_p 、セメント粉体層の引張り破断強さ σ_z と、せん断試験時の空隙率 ε から、次のRumpfの式を用いて求めることができる。

$$F = \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \cdot \sigma_z \cdot d_p^2 \quad (1)$$

微粒セメント粒子径を平均径($4\mu\text{m}$)として、セメント粉体層のせん断試験結果の引っ張り破断強さ、空隙率をEq. (1)に代入して得られたセメント粒子1個の付着力 F をTable 1に示す。Table 1より、改質セメント粒子1個の付着力は約 1.3×10^{-9} Nである。

平成4年8月26日 受付

粉体工学会第28回夏期シンポジウム(1992年7月、函南)にて発表
* (株)熊谷組技術開発部土木技術第2部(〒162 東京都新宿区津久戸町2-1)

TEL 03-3260-2111 内線 3783
Dept. 2, Civil Eng. Technology,
† KUMAGAI GUMI CO., LTD
Techn. Development Division,
(Tsukuto-cho Shinjuku-ku 162)

Table. 1 Adhesion of fine grained cement

Measured item	Shear strength σ_s	Porosity ε	Adhesion of cement particle $F(\times 10^{-9}\text{N})$
Material	(Pa)	(-)	
Fine cement	94.1	0.660	2.93
Surface treated cement	① 50.0	0.606	1.23
	② 58.8	0.593	1.37

3. シミュレーションモデル

微粒セメントの注入モデルは、田中らの付着力のない場合のプラグ流シミュレーション²⁾を参考に、粒子1個の弾性変形による法線方向の力と接近量の関係をHertzの式より、接線方向の力と変形量の関係をMindlinの式より求め、個別要素法を用いて粒子群の挙動を求めた。田中らは付着力のない粒子を対象としているが、本報では水平管路とみなした地盤空隙中に注入するセメント粒子に付着力を考慮した。シミュレーションでは粒子1個の付着力をTable 1の値を用いて、2粒子間の反発力が付着力より小さい場合にセメント粒子は付着しているとして2粒子にその平均流速を与え、付着した粒子は角速度を0として回転運動を拘束した。

シミュレーションに用いた定数は、セメント粒子の粒子径 $4\mu\text{m}$ 、密度 $3000\text{kg}/\text{m}^3$ 、ヤング係数 $5\times 10^9\text{Pa}$ 、ポアソン比0.20、摩擦係数0.3、反発係数0.1、粒子1個の付着力 $1.3\times 10^{-9}\text{N}$ 、セメント堆積層の空隙率0.6、空気の密度 $1.205\text{kg}/\text{m}^3$ 、地盤空隙を水平管路とみなした場合の空塔空気流速 $1.0\text{m}/\text{s}$ 、水平管路は直径 $20\mu\text{m}$ 、長さ $100\mu\text{m}$ 、管摩擦係数0.05である。

ここで地盤空隙を管路径 $20\mu\text{m}$ の水平管路とみなしたが、土粒子充填層が等粒子径で2次元配列のとき、密充填では土粒子径と空隙径の比が1/6.4、粗充填では1/2.4となり約 $40\sim 130\mu\text{m}$ の土粒子径に対応する。この粒子径の充填層の透水係数は $10^{-4}\text{m}/\text{s}$ 以下であり、粉体注入工法が対象としている地盤相当する。

4. 細細管路内での注入シミュレーション

軟岩盤や地盤の空隙を微細な水平管路とみなし、一定の空塔流速のもとでの管路内の堆積セメント層のシミュレーションから、付着力の有無による粒子群の挙動の相違、粒子が移動する際の圧力損失の変動特性を検討した。空気単相部とセメント堆積層部の空気流速は、田中らの論文²⁾と同一の方法で求めた。

セメント粒子の初期配置は、セメント堆積層の両端

に板をおいて規則正しく並べた粒子が重力安定した状態とした。

4.1 管路にセメントが堆積している場合

付着力のあるセメントが、管路内に堆積している場合の空気流に沿った断面図と、空気流に直交する管路正面図での粒子群の挙動の時間変化をFig. 1に示す。断面図中、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。

図より、初期状態の堆積層の先端付近の粒子が、堆積層を固定していた板がなくなり、重力と空気流により粒子は微動するものの安定しており、堆積層は崩壊しないことがわかる。また、先端付近のセメント粒子が微動することにより、堆積層表面から粒子が1個飛び出す結果が得られている。

ここで、セメント粒子の付着力の有無による堆積層挙動の違いを対比するため、①付着力があるセメント堆積層から飛び出した粒子1個の流速、②付着力の無い仮想セメント粒子の平均速度、③付着力のある改質セメント粒子の平均速度(飛び出した1個の粒子を除く)の時間変化をFig. 2に示した。

Fig. 1 Calculation of behaviour of adhesive particles accumulating in a pipe

Fig. 2 Comparison of particle velocity

Fig. 2より、付着力の無い堆積層の仮想セメント粒子は加速され移動速度が増加していることから、堆積層は崩壊しつつあることが確認できる。しかし、付着力のある堆積層のセメント粒子は初期に微動するものの、粒子同士が付着し安定した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。

4.2 管路にセメントが閉塞している場合

空塔空気流速1m/sで流量制御したときの付着力のある改質セメント粒子の挙動と、水平管路の各位置での単位長さあたりの圧力損失量の時間変化をFig. 3に示す。

図より、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60kPa/m程度と比較的小さいことがわかる。しかし、堆積層先端部では固定していた板がなくなりセメント粒子が重力と空気流により微動するため、圧力損失は堆積層のすべての地点で一定ではない。このように堆積層先端部で粒子が微動することにより、セメント粒子が管路を閉塞して、閉塞部の圧力損失が急増し、粒子群が塊として分離する様子がFig. 3④でとらえられている。粒子群が分離するときの長さ1m当たりの圧力損失は約200MPaとなるが、大きな圧力損失が生じているのは4μm長さであり、この区間での実際の圧力損失は1kPa程度に過ぎない。しかし、管路が数mmにわたり完全に閉塞された場合、圧力損失は数MPaとなり、これまで注入工法で採用されてきた注入圧(通常は1MPa以下)では注入できないことになる。

したがって粉体注入工法では、注入圧と空気量を測定しながら、セメント堆積層が管路を完全閉塞しないように、空気流速、セメント濃度を管理することが重要と考えられる。ところで、堆積層が崩壊してセメント粒子が移動するときの圧力損失が小さいが、これは微粒セメントの粒子径が小さく、かつ本シミュレシ

Fig. 4 Calculation of behaviour of adhesionless particles packing in a pipe

ョンが対象とする微細空隙では粒子数が少ないことによる。

次に、付着力の無い仮想セメント粒子の挙動をFig. 4に示す。図より、付着力が無い場合の仮想粒子は空気の流路であ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で崩壊が生じ、粒子単位に分散する様子が得られ、付着力のある粒子の崩壊形態とは明らかに異なる挙動が認められる。

5. 土粒子充填層内への注入シミュレーション

地盤空隙を水平管路とみなして、空気流による地盤空隙中の堆積セメント層が移動を開始する現象のシミュレーションを行ったが、セメントが堆積する過程は、土粒子充填層内へのセメント粒子の注入現象を考慮しなければならない。しかし、地盤空隙内への注入シミュレーションは、対象粒子数が膨大となることや

Fig. 3 Calculation of behaviour of adhesive particle packing in a pipe

Fig. 5 Track of cement particles ingestion to the gravel bed (Particles No. 50)

三次元での充填層空間の流速計算が必要であることから必ずしも簡単ではない。

そこで本報では、直径 $200\mu\text{m}$ の土粒子を自然充填して、この地盤空隙のどの空間でも空気流速 1m/s を与えた簡単な計算により、直径 $4\mu\text{m}$ のセメント粒子50個の挙動をとらえる試みを行った。シミュレーションに用いたセメント粒子の定数は前節と同じである。

土粒子充填層を上面、側面の2方向から見た場合の付着力の有無によるセメント粒子の軌跡の相違をFig. 5に示す。

図より付着力の無い仮想セメント粒子は土粒子表面に衝突して分散しながら充填層を通過するが、改質セメントの付着力を有するセメント粒子は8個が、改質しない微粒セメントの付着力($3 \times 10^{-9}\text{N}$)を有するセメント粒子は24個が充填層表面で捕捉される様子が得られている。このように、付着力の有無や大小により注入状況の違いが得られるが、付着力を有するセメント粒子が土粒子表面で多く捕集されるのは、空気流速が一樣流であるため、空気流に面した土粒子の中心部で接線方向の流体力が0となるためであり、セメント

粒子の初期位置や粒子数の違いによりシミュレーション結果は異なると考えられる。

このことから、改質セメントの堆積過程をとらえるには地盤空隙内の空気流速分布を考慮しなければならないと考えられる。

6. おわりに

本報では、セメント注入現象をセメント粒子単位でモデル化し、地盤空隙内の堆積セメント堆積層の挙動、圧力変動特性のシミュレーション解析結果について報告した。

この結果、地盤中に堆積したセメント層は地盤空隙をほとんど閉塞した時点で崩壊するが、この時、大きな圧力損失が生じることがわかった。このことから、粉体注入工法の適用に際しては、セメント注入により空気量の急減、もしくは注入圧力の急増が生じないように濃度管理が必要であることを述べた。

本報で用いたシミュレーションは、大阪大学辻教授が開発されたプログラムを基にした。ここに記して謝意を表します。

Nomenclature

d_p	: particle diameter	(m)	ε	: porosity of particles aggregate	(—)
F	: adhesion of cement particle	(N)	σ_s	: shear strength	(Pa)

References

- 1) Mori, K., T. Shibata, and S. Horiya : Proceedings of JSCE, No. 445 / III - 18, pp. 27~35, (1992)
- 2) Tanaka, T., T. Ishida and Y. Tsuji : Journal of JSME(B), 57, No. 534(1991)