セメント吹込みによる砂質土の透水抵抗性改善 に関する基礎実験[†]

徳 田 弘* 加賀谷 誠** 杉 本 光***

Fundamental Experiments on Watertightness Improvement of Sandy Soil by Cement Blowing

by

Hiroshi TOKUDA*, Makoto KAGAYA** and Hikaru SUGIMOTO***

Blowing cement particles into voids in sandy soil by air pressure was made to improve the watertightness. The ranges of sand particle size used in this study were 0~5 mm, 2.5~5 mm and 5~10 mm. The blowing experimented on 0~5 mm sand was more effective than those done on other sands from viewpoint of watertightness improvement in spite of the fact that the set layer thickness of 0~5 mm sand was less than those of the others. This method had noticeable effects with increasing air pressure and density of sand. The amount of cement supply and blowing cycles were another important factors to bring the method in success, and it was recognized that the optimum combination of the factors was in existence. The watertightness of sand treated by cement only and cured for 7 days was almost the same as that of the one treated by cement admixed with set accelerating admixture and cured for 1 day.

Key words : Watertightness, Blowing nozzle, Cement blowing, Sandy soil, Admixture

1 緒 言¹⁾

地盤改良工法には数々の種類がある。その一つは表層処理工法であって、これは表層の土質を力学的に安定化するために実施される施工方法である。この工法では、地盤中にスラリー状にしたセメントを注入したり、表層土と粉末状のセメント系結合材をかく拌・混合するなどの処理方法が用いられている。これらの処理工法を適用する場合、かなり大型の施工機械が必要であり、その上、セメントミルクの製造・注入、表層土と結合材のかく拌・混合など煩雑かつ手間のかかる工程を経なければならないので、施工の簡略化に向けて改善すべき多くの問題点が指摘されている。本研究は、このような表層処理工法をより簡略化しようとして著者の一人が考案した圧縮空気によるセメントの吹込み工法を砂質土に適用した場合、その表層部の透水抵抗性がどのように改善されるかを明らかにするための基礎資料を得る目的で行われた。この目的のため、膨張材あるいは急結剤を添加したセメントおよびセメント単味をそれぞれ結合材とし、これを試作した実験室用ノズルにより砂質土供試体に吹込んだ。そしてセメントの供給量、吹込み圧力、吹込み回数および砂質土の締固め密度が透水抵抗性の改善程度に及ぼす影響

を明らかにした。本論文はこれらの実験結果をとりまとめたものである。なお、この工法を適用することにより、たとえば砂質土からなる切取りのり面表層部の透水抵抗性を改善できるし、路床あるいは路盤を浸透する地下水の上昇流を抑止することができると考えられる。

2 実験概要

2・1 使用材料および供試体

普通ポルトランドセメント、CSA系の膨張材、急結性セメント鉱物を主成分とする急結剤、連続粒度の川砂(SC)、単粒度の川砂(SS)および単粒度の川砂利(GS)を使用した。吹込みに用いたセメントは、セメント単味、セメントと膨張材の組合せならびにセメントと急結剤の組合せの3種類であった。膨張材および急結剤の添加量をセメント重量の内割りそれぞれ10%および8%とした。なお、土木学会規準に準じ、急結剤の添加量を8%としたときの凝結時間は、始発50秒、終結3分10秒であった。

川砂および川砂利を使用したのは、本実験で対象とする地山を砂質土としたからである。SC、SSおよびGSを使用したのは、本工法の有効性を砂質土の粒子寸法の観点から検討するためであって、SCが最

[†] 原稿受理 平成2年12月3日 Received Dec. 3, 1990

* 正 会 員 秋田大学鉱山学部 秋田市手形学園町, Mining College, Akita University, Tegatagakuen-cho, Akita

** 秋田大学鉱山学部 秋田市手形学園町, Mining College, Akita University, Tegatagakuen-cho, Akita

*** 東京地下工事(株) 東京都葛飾区東新小岩, Tokyo Underground Construction Co. Ltd., Higashi Shinkoiwa, Katsushika-ku, Tokyo

Table I. Physical properties of sand.

	Range of particle size (mm)	Specific gravity	Water absorption (%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m ³)	
					Compacted state	Uncompacted state
SC	~ 5	2.54	2.82	2.55	1834	1568
SS	2.5~ 5	2.54	2.75	5.00	1703	1433
GS	5~10	2.56	2.69	6.00	1578	1471

も細かく、SS、SGの順に粗い粒子を多く含んでいる。SC、SSおよびGSの表面水率をそれぞれ20%、10%、および4%とした。なお、JIS A 1109および1110に準じて表面乾燥飽水状態の試料を作製し、これに水を加えて所要の表面水率とした。このように設定した理由は、地山は湿潤状態であると仮定したこと、吹込んだセメントの水和反応を活発に進行させようとしたことである。このため実験室において川砂や川砂利を型わくに詰めて供試体を作製するとき、試料と水が分離しない範囲でできるだけ多量の水を含んだ状態となるよう配慮した。供試体の形状・寸法は $\phi 10 \times 20$ cmで、成型方法は試料をJIS A 1104（骨材の単位容積質量および実積率試験方法）に準じて突き棒により締固める場合とこれを行わない場合の2種類とした。Table Iに試料の粒径範囲、比重、吸水率、粗粒率および単位容積質量を示す。

2・2 セメントの吹込み方法

Fig. 1はセメントの吹込み装置であって、試作したノズルとエアコンプレッサから構成されている。ノズ

ルは内径5 cm、高さ17 cmの円筒で、この円筒は上半部と下半部が組合わされた構造になっている。セメントの吹込みを以下の手順で行った。まず、下半部先端の刃先を供試体表層に約1 cm貫入させて設置した後、逆流防止弁の上面に所定量のセメントを供給し、上半部を下半部に接続した。つぎに、エアコンプレッサの圧力弁を開放してノズル内に圧縮空気を送り込むと逆流防止弁が押し開かれて供試体の内部にセメントが吹込まれた。以上で一回の吹込み作業を終るが、一回あたりのセメント供給量を5、10、20および30 gr、吹込み圧力を2、4および6 kgf/cm²に変化させた。また、同一供試体に対する吹込み回数を2、4、6および8回とした。なお、1回あたりの吹込み時間は15~20秒であった。これらの回数に対応させて、供試体の表面を2、4、6および8個の扇形に等分割し、その重心を含む型わくの半径上にノズル断面中心がおおよそ位置するようにして吹込んだ。なお、このときノズルの側面は型わくの内面と接する位置関係にある。

セメントの吹込み開始前と終了後に供試体の質量を測定し、両者の差から吹込まれたセメント量を求め、これと供給したセメント量を比較した。

2・3 透水試験

供試体の型わくを取りはずさず、セメント吹込み面に多数の細かい穴のあいたプラスチック製の円板を取り付けた後、供試体を倒置し、型わく底板を取りはずした。それから上面の中央部にロート（上部内径18 cm、流出口内径1.5 cm、高さ14.5 cm）を挿入し、この中に500 ccの水を注ぎ入れた。水が底面すなわちセメント吹込み面から滴下し始める時間を測定し、この流出開始時間を透水抵抗性の目安とした。この試験方法によって固結層の透水係数を求めることはできないが、セメント吹込みを行わない場合とこれを行った場合の滴下開始時間を比較することによって、透水抵抗性の改善程度を判断できると思われる。

試験材令は、混和材料を用いない場合と膨張材を用いた場合、1、3および7日、急結剤を用いた場合、1/4、1/2、1および3日とし、それまで実験室内で型わく養生を行った。なお、透水試験用供試体の個数は同一条件について3個とした。

Fig. 1. Installation of cement blowing.

透水試験終了後型わくを取りはずし、セメント吹込みによって形成された固結層を採取してその平均厚さを測定した。

3 実験結果および考察

3・1 透水抵抗性に及ぼす試料種別の影響

Fig. 2 は、試料種別と透水抵抗性および固結層の厚さの関係の一例であって、締固めた供試体に対し吹込み圧力 6 kgf/cm^2 で合計 40 gr （一回あたりのセメント供給量： 10 gr ，吹込み回数：4 回）のセメントを吹込み、材令 7 日で透水試験を行った結果である。上図から、試料 SC の流出開始時間は、セメントを吹込まない場合 45 秒であるが、吹込んだ場合 95 秒に増加しており、透水抵抗性は大幅に改善されたと判断される。しかし、試料 SS および GS の場合、その改善程度はごくわずかであることがわかる。また下図から、固結層の厚さは試料 SC で 2.5 cm ，SS で 3.2 cm ，GS で 3.5 cm であって、粒径が大きいほどその厚さは大きくなる傾向にあることが認められる。これ

Fig. 2. Type of sand versus starting period of outflow and set layer thickness (Air pressure: 6 kgf/cm^2 , Cement amount at a time: 10 gr , Blowing cycles: 4, Compacted state).

Fig. 3. Appearance of set layer pieces of SC, SS and GS from left side (Air pressure: 6 kgf/cm^2 , Cement amount at a time: 10 gr , Blowing cycles: 4, Compacted state).

らの傾向は、吹込み圧力とセメント供給量を変えた場合にも同様に認められた。Fig. 3 にこれらの固結層の写真を示す。

透水抵抗性が固結層厚の小さい試料 SC で著しく改善され、層厚の大きい SS と GS でごくわずしか改善されなかった理由は次のようであると思われる。すなわち、セメントの吹込み過程を観察すると、初めにセメント粒子は骨材粒子の表面に付着するが、時間とともにその被覆厚は増大するので、次第に骨材周囲の空げきが充てんされ、やがてち密な層が形成される。試料の粒径が小さいほど空げき寸法は小さいので、空げきは早期に充てんされてち密な層が形成されるが、セメント粒子はこのち密層を通過してさらに深部まで達することができないため、この層はよりち密化する。このために固結層厚が小さいにもかかわらず透水抵抗性が增大するのである。一方、粒径の大きい試料ほど空げき寸法が大きく、セメント粒子は容易にこの空げきを通過して深部まで吹込まれる。しかし、空げきが大きいためこれを十分に充てんするまでにはいたらず、このために固結層厚は大きい、その組織は透水性の小さいポーラスなものとなるのである。このような状態は Fig. 3 から認められる。

なお、供試体内部に吹込まれたセメント量に対する供給したセメント量の比率は、粒径が大きい試料ほど大きく、試料 GS および SC でそれぞれおよそ 75% および 65% であった。

3・2 透水抵抗性に及ぼす吹込み条件の影響

Fig. 4 は、吹込み圧力と透水抵抗性および固結層の厚さの関係の一例であって、試料 SC を締固めた場合と締固めなかった場合について、合計 40 gr （一回あたりのセメント供給量： 10 gr ，吹込み回数：4 回）のセメントを吹込み、材令 7 日で透水試験を行った結果である。上図から、透水抵抗性は吹込み圧力が高いほど改善されること、改善の程度は締固めなかった場合より締固めた場合の方が著しく大きいことが認めら

Fig. 4. Air pressure versus starting periods of outflow and set layer thickness (Type of sand : SC, Cement amount at a time : 10 gr, Blowing cycles : 4, Compacted state).

れる。また下図から、固結層の厚さは吹込み圧力が高いほど大きくなること、層厚はいずれの吹込み圧力においても締固めなかった場合の方が締固めた場合より大きいことが認められる。これらの傾向は、セメント

Fig. 5. Appearance of set layer pieces of SC in compacted and uncompacted states on left and right side, respectively (Air pressure : 6 kgf/cm², Cement amount at a time : 10 gr, Blowing cycles : 4).

供給量を変えた場合ならびに他の砂質土を用いた場合にも同様に認められた。Fig. 5 にこれらの固結層の写真の一例を示す。

締固めなかった場合の方が締固めた場合より固結層の厚さが大きいにもかかわらず透水抵抗性の改善程度が著しく小さかったのは、前者の組織の方が後者よりルーズであるため吹込まれたセメントはより深部まで達するが、空げきの充てん程度は低いためであろうと考えられる。Fig. 5 からわかるように、締固めなかった場合の固結層はその形をとどめることができないほどろい。このように砂質土が密な状態にあるほどセメントの吹込みによる透水抵抗性の改善程度は著しく大きくなることがわかる。

Fig. 6 は、セメントの供給量と透水抵抗性および固結層の厚さの関係の一例であって、締固めた試料 SC に対して吹込み圧力 6 kgf/cm² で合計 20, 40, 80 および 120 gr のセメントを吹込み、材令 7 日で透水試験を行った結果である。ただし、一回あたりのセメント供給量を 5, 10, 20 および 30 gr, 吹込み回数を

Fig. 6. Amount of cement supply versus starting period of outflow and set layer thickness (Type of sand : SC, Air pressure : 6 kgf/cm², Cement amount at a time : 5, 10, 20 and 30 gr, Blowing cycles : 4, Compacted state).

Fig. 7. Blowing cycles versus starting period of outflow and set layer thickness (Type of sand: SC, Air pressure: 6 kgf/cm², Cement amount at a time: 10 gr, Blowing cycles: 2, 4, 6 and 8, Compacted state).

4回とした。上図から、透水抵抗性の改善程度はセメント吹込み量 40 gr のとき最も大きく、これより多くなるにつれて徐々に減少する傾向が認められる。また下図から、固結層の厚さはセメント吹込み量 40～80 gr のとき最大になることがわかる。

セメント吹込み量の増加とともに透水抵抗性が増大して最大値に達し、その後減少傾向に転じるのは、一回あたりのセメント供給量がある値以上になるとセメント粒子が互いに干渉合って深部まで吹込まれないからであろうと考えられる。吹込み面の観察によれば、一回あたりのセメント供給量が 10 gr 以上になると、試料の内部に吹込まれないで残ったセメント粉末の薄層が認められた。この薄層がセメント粒子のより深部への到達を妨げるために固結層厚は成長できず、したがって透水抵抗性が改善されないのである。

Fig. 7 はセメントの吹込み回数と透水抵抗性および固結層の厚さの関係の一例であって、締固めた試料 SC に対して吹込み圧力 6 kgf/cm² で合計 20, 40, 60 および 80 gr のセメントを吹込み、材令 7 日で透水試験を行った結果である。ただし、一回あたりのセメント供給量を 10 gr, 吹込み回数を 2, 4, 6 および 8 回とした。上図から、透水抵抗性の改善程度はセ

メント吹込み量 40 gr のとき最も大きく、これより多くなるにつれて徐々に減少する傾向が認められる。また下図から、固結層の厚さはセメント吹込み量 40 gr 以上のときはほぼ等しい最大値に達することがわかる。

一回あたりのセメント供給量が一定のとき、吹込み回数の増加とともに透水抵抗性が増大して最大値に達し、その後減少傾向に転じるのは、ある吹込み回数以上になると、既に空気を充てんしているセメント粒子が新たに吹込まれた粒子の侵入を妨げるからであろうと考えられる。このことは、ある回数以上の吹込みを行っても固結層厚は増加しないという実験結果と一致する。Fig. 6 および 7 にそれぞれ示した結果と吹込み圧力を変えた場合の結果ならびに他の砂質土を用いて同じ実験を行って得られた結果は、傾向的に同様であると判断された。

3.3 透水抵抗性に及ぼす混和材料の影響

Fig. 8 は、混和材料種別と透水抵抗性および固結層の厚さの関係の一例であって、締固めた試料 SC に対して吹込み圧力 6 kgf/cm² で合計 40 gr (一回あたりのセメント供給量: 10 gr, 吹込み回数: 4 回) のセメントを吹込み、透水試験を行った結果である。透水試験は、セメント単味の場合 (P) と膨張材を添加した場合 (E) 材令 7 日、急結剤を添加した場合 (Q) 材令 1 日で行った。上図から、P, E および Q

Fig. 8. Type of admixture versus starting period of outflow and set layer thickness (Type of sand: SC, Air pressure 6 kgf/cm², Cement amount at a time: 10 gr, Blowing cycles: 4, Compacted state).

Fig. 9. Age versus starting period of outflow
(Type of sand : SC, Air pressure : 6 kgf/cm²,
Cement amount at a time : 10 gr, Blowing cycles : 4, Compacted state).

における透水性の改善程度はほぼ同程度であり、また下図から、形成された固結層厚もほぼ同程度であることがわかる。

Fig. 9は、P、EおよびQについて行った透水試験の材令と透水抵抗性の関係であって、締固めた試料SCに対して吹込み圧力6 kgf/cm²で合計40 gr（一回あたりのセメント供給量：10 gr，吹込み回数：4回）のセメントを吹込んだ場合である。図から、P、EおよびQのいずれも材令とともに透水抵抗性改善の程度は大きくなるが、その値は一定値に近づく傾向にあること、PおよびEの材令7日における透水抵抗性の改善程度とQの材令1日における改善程度はほぼ等しいことが認められる。このことから、セメントに急結剤を添加して吹込みを行えば、早期にかなりの程度の透水抵抗性改善を達成することが可能である

と判断される。Fig. 8およびFig. 9にそれぞれ示した結果と吹込み圧力およびセメント供給量を変えた場合の結果ならびに他の砂質土を用いて同じ実験を行って得られた結果は、傾向的に同様であると判断された。

4 結 言

砂質土の透水抵抗性の改善を図る目的で圧縮空気によるセメントの吹込み実験を試みた。試料は粒径範囲0～5 mm (SC), 2.5～5 mm (SS) および5～10 mm (GS)の3種類であった。実験から次の事項が明らかになった。

- (1) セメント吹込みによって形成される固結層の厚さは、SCにおける方がSSおよびGSにおけるより小さいが、その組織はより緻密である。このため透水抵抗性の改善程度はSCにおける方が著しく大きい。
- (2) SCにおける透水抵抗性の改善程度は、セメントの吹込み圧力が高く、かつ締固め密度が高いほど大きい。
- (3) SCにおいてセメントの吹込み回数を一定とし、各回のセメント供給量を変えた場合、あるいは各回のセメント供給量を一定とし、吹込み回数を変えた場合、いずれの場合にも透水抵抗性の改善程度が最大となる両要因の組合せが存在する。
- (4) SCに対して急結剤を添加したセメントを吹込んだときの材令1日における透水抵抗性の改善程度は、セメント単味あるいは膨張材を添加して用いたときの材令7日における改善程度とほぼ等しい。

参 考 文 献

- 1) 柴崎光弘, 基礎工, 8, 9 (1989).