粉体圧送グラウチング用改質セメントの開発

The Development of Surface-treated Cements
for Cement Powder Grouting中 村 昭*, 山 口 嘉 一*, 小 沼 栄 一**, 佐 々 木 豊***
Akira NAKAMURA*, Yoshikazu YAMAGUCHI*, Eiichi ONUMA**, Yutaka SASAKI***

Surface-treated microfine cements were prepared as a grouting material for use in a cement powder grouting method. This method is used in dam foundations that are hardly permeable to cement slurry. Laboratory test results revealed that decrease in the amount of size fractions coarser than $10\mu\text{m}$ and finer than $1\mu\text{m}$ in surface-treated cements remarkably improves the permeability of sand specimens. By using the cement powder grouting method with such a cement, a remarkable improvement in the water tightness of dam foundations with minute pores that are hardly permeable to cement slurry can be achieved.

Key Words : Surface-treated Cement, Grouting Material, Cement Powder Grouting, Permeability, Particle Size Distribution

1. 緒 言

ダム基礎地盤の浸透注入による遮水性の改良という観点から、マサ、未固結砂岩のように、地盤間隙が比較的小さく、セメントミルクを注入する湿式グラウチングでは媒体である水の中のセメント粒子の凝集などの原因から地盤間隙に対する浸透性に難があり、遮水性の改良が困難であるような基礎地盤に適用可能な新しい工法として、粉体圧送グラウチング工法¹⁾が提案され、実用化に向けての研究が進められている。本論文では、本工法用の注入材料の開発について報告する。

2. 粉体圧送グラウチング用改質セメントの開発

粉体圧送グラウチング用材料には、以下の条件が必要とされる。

- (1) 構成する粒子の大部分が、地盤間隙に比し十分に小さい。
- (2) 圧送空気中で粒子が均等に分散し、付着・凝集しにくい。
- (3) 粒子表面の形状・粗さが適度で、地盤中での浸透性に優れている。
- (4) 水和固結後は所要の強度を発現し、水圧に長期間抵抗しうる。
- (5) 浸透水との化学反応に対して安定であり、有害成分を溶出しない。

湿式グラウチング用の超微粒セメントを粉体圧送グラウチングに用いた場合、付着・凝集性が強いいため、圧送空気中でセメント粒子が均等に分散せず、地盤中で十分に浸透しないうちに閉塞を起こしてしまう。そこで、上述の条件を考慮して、市販の湿式グラウチング用超微粒セメントに水溶性シリコーン樹脂を用いた湿式攪拌法による表面コーティングを行うことによって、後述のように空気中における表面物性を変化させ、Table 1に示す3種類の表面改質超微粒セメントを調製し、試験に用いることにした。

1996年 3月 4日受付

第33回粉体に関する討論会(1995年 10月、福岡)にて発表

* 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室
(〒305 つくば市大字旭1) TEL.0298-64-2211
Fill Dam Division, Dam Dept., Public Works Res. Inst.,
Ministry of Construction(1, Asahi, Tsukuba City 305)

** 秩父小野田(株)中央研究所
(〒285 千葉県佐倉市大作2-4-2) TEL.043-498-3824
Central Res. Lab., Chichibu Onoda Cement Corp.
(2-4-2, Osaku, Sakura City, Chiba 285)

*** 秩父小野田(株)環境技術開発センター
(〒756 山口県小野田市大字小野田6276) TEL.
0836-83-2941
Resources and Environment Tech. Dept.,
Chichibu Onoda Cement Corp.
(6276 Onoda, Onoda-City, Yamaguchi 756)

Table 1 Particle size characteristics of cement samples*

Samples	Mean diameter (μm)	Percent passing (%)		U_c^{**} (-)	n^{***} (-)
		10.55 μm	1.01 μm		
Non-surface-treated cement	4.9	89.3	8.9	5.5	1.34
Surface-treated cement 'Standard'	5.5	88.5	7.3	4.6	1.41
'HG I'	5.6	94.3	4.5	2.5	1.70
'HG II'	5.3	95.1	5.0	2.7	1.71

* Measured by laser diffraction method(Microtrac).

** D_{60}/D_{10} .

*** Distribution constant in Rosin-Rammler distribution.

Table 1に示す試料のうち、'Standard'は、本工法開発の初期において使用された材料で、未改質品に比べ空気中における分散性・凝集性について格段の差異が認められたものの、試験砂層への浸透性についてさらに一層の改良が要望されていた²⁾。'HG I'および'HG II'は、これに関して改良を加えたものである。

'Standard'の浸透性を規制している要因としては、以下のことが考えられた。

(1)砂層間隙に対し、充分には小さくない粒径の粒子がなお少量含まれている。

(2)少量含まれる超微粉分(例えば1 μm 以下)の凝集力が強いため、全体の浸透性を阻害する。

(3)水溶性シリコン樹脂による表面改質が部分的に不完全であるため、未改質部分が露出し凝集する可能性がある。

これらの要因を除去するため、セメントの粗粒分・超微粉分カット多段分級による粒径分布の均等化及びコーティング状況の均質化を目指したコーティング条件の適正化を行い、'HG I'および'HG II'を得た。ここで、HG IIは、HG Iよりも粗粒分である10 μm 以上の粒群の除去率を増加させたものである。**Fig. 1**に、このようにして得られた改質セメントの粒径分布曲線を未改質品と対比して示す。

3. 空気圧送浸透性

3.1 試験方法

空気圧送浸透性試験は、**Fig. 2**の試験装置を用い、**Fig. 1**の粒径分布を有する注入砂層に対し、**Table 2**の試験条件に示すように、一定速度で供給されるセメントを定められた注入圧で圧縮空気とともに注入することにより行った。注入圧、注入粉体濃度などの試験条件が砂層の種類によって異なるのは、注入材料による空気圧送浸透性の相互の差異が砂層通過時間としてもっとも明瞭にあらわれる条件を、松本ら³⁾の実験

Fig. 1 Particle size distribution of cement samples and test sands

Fig. 2 Permeability measurement apparatus

結果にもとづき、砂層ごとに選択したためである。松本ら³⁾によれば、空気圧送浸透性は、改質セメントの種類にかかわらず注入圧の増加とともに増加し、ま

Table 2 Testing conditions of permeability measurement

Type of sand	Test specimen			Injection pressure* (10 ⁵ Pa)	Feed-rate of cement (10 ⁻³ kg/min)
	Diameter (mm)	Height (mm)	Apparent density (kg/m ³)		
Toyoura sand	98.5	360	1630	3.7	3.5
#7 silica sand	74.2	150	1480	2.0	30~50
White beads #007	49.4	102	1480	2.3	2
White beads #005	49.7	97	1540	6.5	2

* measured at the upper end of sand specimens

た、粉体供給速度を変化させても、改質セメントの種類別の空気圧送浸透性の順位が逆転することはない。従って、Table 2のように注入圧、注入粉体濃度が砂層の種類によって異なっても、試験結果から、改質セメントの種類別の空気圧送浸透性の順位は判定可能と考える。なお、砂層通過時間は、目視及び砂層下端におけるフェノールフタレイン浸漬紙の変色により判定した。セメント粒子の砂層通過が確認される前にセメント粒子の砂層内における動きが目視で全く認められなくなり、しかも送気流量が1.0m³/h(設定流量の10~15%)以下に低下した場合、「不通」と判定した。

3. 2 試験結果

空気圧送浸透性実験の結果を、Table 3に示す。Table 3により、未改質品から改質セメント 'Standard', 'HG I', 'HG II' と進むに従い、セメント粒子が不通だった砂層が通過可能となり、砂層通過時間が順次短縮していく状況が示されている。

Fig 3に、改質セメントの10.55 μ m通過分(%), 1.01 μ m通過分(%), Rosin-Rammler分布の指数 n および粒径分布の均等係数 U_c と空気圧送浸透性の関係を示す。ここで、改質セメントの10.55 μ m通過分(%)および1.01 μ m通過分(%)は、いずれもレーザ回折法(マイクロトラック社製)で測定したものである。なお、

Table 3 Results of permeability measurement

Samples	Passage time through sand specimen(min)			
	Toyoura sand	#7 silica sand	White beads	
			#007	#005
Non-surface-treated cement	Impermeable	Impermeable	—	—
Surface-treated cement 'Standard'	41	Impermeable	—	—
'HG I'	23	—	—	—
'HG II'	18	3~7	40~55	Impermeable

'Impermeable' shows the test in which the permeation of cement particles in the sand specimen has completely stopped and the flow rate of injected air decreases beyond a certain limit.

'—' shows that the permeability measurement was not carried out.

Fig. 3 Effect of particle size characteristics of cement on permeation

空気圧送浸透性は、豊浦砂層に対するセメント粒子の通過時間で表現している。改質セメントの10.55 μm 通過分(%)の増加, 1.01 μm 通過分(%)の減少, 及びこれらによってもたらされた粒径分布の均等化に従い, 空気圧送浸透性が改良されていく状況が読みとれる。

Fig. 3に示した改質セメントの粒径分布特性値のうち, 10.55 μm 通過分(%)は, 注入砂層の間隙径と次のように関係づけられる。いま, Kingら⁴⁾の実験結果に従い, 砂層間隙径 $d=0.2D$ とし, 砂層代表粒子径 D として D_{50} を用いるとすれば, Fig. 1の砂層の粒径分布曲線より, 今回の試験で浸透限界付近の砂層であったホワイトピーズ007で $d=14\mu\text{m}$, ホワイトピーズ005で $d=9.4\mu\text{m}$ となり, 10.55 μm とほぼ一致する。このことから, 約10 μm における通過分(%)は, 注入砂層間隙径に比し, 注入材料の粒径が全般的に十分に小さいことを示す指標と考えられる。一方, 1.01 μm 通過分(%)も空気圧送浸透性との相関は大きい, このことから, 約1 μm における通過分(%)は, Rumpfの式⁵⁾から導かれるように, 超微粉分の増加により注入中に形成される注入材料微小粉体層の引張り強さが増加し, それからの再飛散による砂層内への浸透⁶⁾が抑制されることの指標と一般的に考えられる。

なお, Table 3によれば, 'HG II'($D_{85}=8.7\mu\text{m}$)は, ホワイトピーズ005($D_{15}=40\mu\text{m}$)についてほとんど浸透不能であるが, ホワイトピーズ007($D_{15}=65\mu\text{m}$)について浸透可能である。これからグラウタビリティー比 N (砂の D_{15} /セメントの D_{85})を求めてみると, $N=7.5$ では浸透可能, $N=4.6$ では浸透不能となり, ミルク注入について一般にいわれている浸透可能領域 $N>15\sim 25$ ^{4,7,8)}よりも細粒側に浸透可能領域が広がっていることがわかる。

4. 粉体物性

4.1 測定方法

注入材料の粉体物性として安息角をパウダーテスター(ホソカワミクロン(株)製)により, またせん断試験値をパウダーベッドテスター(三協パイオテック(株)製)により測定した。

4.2 測定結果

Table 4に測定結果を示す。また, Fig. 4は, 安息角と粒径分布の均等係数, および安息角と空気圧送浸透性の関係を示したものである。セメントの表面改質と粒径分布の均等化により, 安息角, 崩壊関数 FF , 単軸崩壊応力 f_c に代表される粉体物性が易流動性の方向に動き, それが空気圧送浸透性の改良に結びつくことが示されている。

5. 注入硬化材料としての物性

5.1 圧縮強度

表面改質超微粒セメント粒子は, 表面を改質してい

Fig. 4 Effect of angle of repose of cement on permeation

Table 4 Flow characteristics of cement samples

Samples	Angle of repose (degree)	Shear test results		
		ta^* (kPa)	FF^{**} (—)	f_c^{***} (kPa)
Non-surface-treated cement	50	0.188	—	—
Surface-treated cement 'Standard'	37	0.104	1.4	0.82
'HG I'	28	—	—	—
'HG II'	26	0.099	1.7	0.57

* Steady shear stress measured at preconsolidation stress 2.91kPa and normal stress 0.13kPa

** Flow function by Jenike⁹⁾

*** Unconfined yield stress

‘—’ shows that the shear test was not carried out.

Fig. 5 Compressive strength of cement(9%) / sand (91%)specimen

るため、水和反応の遅延が予想される。Fig. 5は、'HG II'と豊浦砂の混合硬化体(20℃, 80%湿空養生：水、セメント、砂の割合以外は「JISセメントの物理試験方法」¹⁰⁾10.4.3(1)機械練りによる方法」に準じる)の圧縮強度試験結果であるが、未改質品に比して、7d圧縮強度で約50%の強度発現となり、相当程度の初期水和の遅れを示す。しかし、28d圧縮強度では水和遅延のかなりの部分は回復し、未改質品の80%の強度を発現しており、グラウト材料としては大きな問題はないと考える。

5. 2 透水試験

7号珪砂砂層に対し、Table 5の条件と、Fig. 2の装置による'HG II'の粉体圧送注入およびFig. 6の装置による未改質超微粒セメントのミルク注入を行い、透水試験用の供試体を調製した。Fig. 7に、所定日数水浸養生後の透水試験結果(試験方法は、JIS 土の透水試験方法¹¹⁾3. 変水位透水試験に準じる)を示す。Fig. 7により、水浸養生3~28日の各材令において、'HG II'による粉体圧送注入は、未改質セメントミルク注入とほぼ同等の遮水効果を示すと判断される。

Fig. 6 Cement slurry injection test apparatus

Fig. 7 Water permeability test results

6. 結 言

改質セメント'HG II'を用いた粉体圧送グラウチング工法により、セメントミルク注入では浸透困難な微細な間隙を有するダム基礎地盤の遮水性改良が効果的に行われうる可能性が見出された。

[付記]本研究は建設省土木研究所共同研究「粉体圧送グラウチングによる基礎岩盤の遮水性改良に関する研究」(建設省土木研究所、川崎地質(株)、(株)熊谷組、清水建設(株)、秩父小野田(株)、戸田建設(株)、日特建設(株))における研究成果の一部であることを付記する。

Table 5 Injection conditions for the preparation of test specimens for water permeability test

Method of injection	Test specimen				Injection pressure* (10 ⁵ Pa)	Feed-rate (10 ⁻³ kg /min)	Water /cement
	Type of sand	Diameter (mm)	Height (mm)	Apparent density (kg /m ³)			
Cement powder grouting	#7	74	540	1480	4.0	3	—
Cement slurry injection	#7	74	540	1480	4.0	—	10

* measured at the upper end of sand specimens

Nomenclature

D	: representative particle size of sands in packed bed specimen (μm)	N	: groutability ratio (—)
D_{85}, D_{50}, D_{15}	: grain size of 85%, 50%, 15% as percentage finer by weight (μm)	n	: distribution constant in Rosin-Rammler distribution (—)
d	: representative pore size of packed sand specimen (μm)	t_a	: steady shear stress measured at preconsolidation stress 2.91kPa and normal stress 0.13kPa (kPa)
FF	: flow function (—)	Uc	: Uniformity coefficient (—)
f_c	: unconfined yield stress (kPa)		

References

- 1) Takebayashi, S., K. Takahi, S. Yokotsuka, S. Horiya and K. Kita : 17th Int. Congress on Large Dams, C-5(1991)
- 2) The Public Works Research Institute, the Ministry of Construction : Proc. of Joint Research with the Public Works Research Institute, 129, 106(1995)
- 3) Matsumoto, N., A. Nakamura, Y. Yamaguchi, H. Yamagata, T. Hashimoto, K. Mori and N. Tahara : Proc. 50th Annual Conf. of the Japan Society of Civil Engineers, 1458(1995)
- 4) King, J. C. and E. W. Bush : *Journal, SMFE Div. ASCE, SM 2*, 87(1961)
- 5) Rumpf, H. : *Chem.-Ing.-Techn.*, 42, 538(1970)
- 6) Mori, K., : *J. Soc. Powder Technology, Japan*, 30, 162(1993)
- 7) Mori, A., M. Tamura and K. Aoki : *Proc. of the Japan Society of Civil Engineers*, 426/ V-14, 237 (1991)
- 8) Yoneda, S. and K. Nakagawa : *ibid.*, 462/ VI-18, 101(1993)
- 9) Jenike, A. W. : *Utah Engng. Exper. Station, Univ. of Utah, Bull.*(1964)
- 10) JIS R5201-1992
- 11) JIS A1218-1961