極超微粒子セメント注入材による砂質土地盤への注入工法の開発[†]

小 泉 悠* 田 中 俊 行* 竹 内 仁 哉**
金 沢 智 彦*** 西 垣 誠****

Development of Grouting Method of Fine Sand with Ultrafine Cement Grout

by

Yu KOIZUMI*, Toshiyuki TANAKA*, Jinya TAKEUCHI**,
Tomohiro KANAZAWA*** and Makoto NISHIGAKI****

Grouting is an important part of construction in rock and soil for such as controlling the flow of water, filling voids in the ground and strengthening grounds. Grouting method has advantages over other soil improvement methods of not discharging slimes and requiring large spaces. However, conventional cement grout was difficult to permeate into fine sand. Chemical solution grout shows high permeability; on the other hand, the solidified ground is not strong and durable enough. The purpose of our work is to develop grouting methods with ultrafine cement (the average particle size 1.5 μ m) grout. The authors conducted both laboratory and field grouting tests. As a result, the grout permeated into a one-meter long artificial ground composed of fine sand, where conventional superfine cement grout was not able to permeate. Furthermore, unconfined compressive strength of the solidified ground was 10 times as large as that of solidified ground with chemical solution grout. As for the field test, the ball-shaped solidified ground was observed in the grouted area, and its diameter was 190cm as designed. It is concluded from the tests that ultrafine cement grout showed a great permeability and high solidified strength.

Key words : Ultrafine cement, Grout, Grouting method, Permeability, Solidified strength, Lowered permeability coefficient

1 緒 言

注入工法とは、ミキサーで練り混ぜた注入材を地盤の間隙や岩盤のき裂等に注入充填して、止水性や強度の増加を図る地盤改良工法であり、土質地盤を対象とした地盤注入と、岩盤中のき裂を充填する岩盤注入に大別される。このうち地盤注入は、薬液を注入して、地盤中の間隙水を追い出し、充填・固化して地盤を改良するものである。従来、薬液注入は、耐久性に劣る水ガラス系材料が用いられ、仮設工に使用されることが多かった。近年、耐久性の高い薬液注入材が開発され、耐震補強や液状化対策にも用いられているものの、Fig. 1に示す水ガラスを主剤とする溶液型薬液注入材は、浸透性に優れるが改良強度は小さい。また、セメント系固化材を主体とする懸濁型薬液注入材は、強度発現性に優れるものの、シルト分を含む細砂地盤への浸透は困難であるとされている。一方、岩盤注入は、永久的で信頼性の高い止水を目的とする場合が多いため、Fig. 1で極超微粒子注入材～普通セメントグラウトに示される強度と耐久性に優れたセメント系材料が用いられる。しかし、セメント系材料は、Fig. 1に示すように、粒径の大きさにより注入可能な地盤が限定される。

そこで筆者らは、高い浸透性、高い強度発現性を有する新しい注入材である“極超微粒子セメント注入材”による砂質土地盤への注入工法の開発を進めている。^{2)~4)}極超微粒子注入材は、従来のセメント系注入材よりもさらに粒径が小さいことから、溶液型薬液注入材と同等の浸透性を有し、従来のセメント系注入材と同等の強度発現性および耐久性を有するものと期待できる。また、本工法は、高圧噴射攪拌工法等の地盤改良工法に比べて、スライム等の建設副産物の発生が無く、環境負荷を低減す

Permeability coefficient (cm/s)	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴		Solidified strength
Particle size (mm)	2.0	0.42	0.075	0.005			
Soil	Gravel		Sand		Silt	Clay	
			coarse	fine			
Ultrafine cement grout							High
Superfine cement grout							High
Normal cement grout							High
Chemical suspension grout							High
Chemical solution grout							Low

Fig. 1 Ground coverage of grouts¹⁾ (retouched by authors).

[†] 原稿受理 平成 23 年 4 月 28 日 Received Apr. 28, 2011 ©2012 The Society of Materials Science, Japan

* 鹿島建設(株)技術研究所 〒182-0036 調布市飛田給, Kajima Corporation, Tobitakyu, Chofu, 182-0036

** 日特建設(株)技術本部 〒104-0044 東京都中央区明石町, Nittoc Construction Co., LTD., Chuo-ku, Tokyo, 104-0044

*** 日鐵セメント(株)技術本部 〒050-8510 室蘭市仲町, Nittetsu Cement Co., Ltd., Nakamachi, Muroran, 050-8510

**** 岡山大学大学院環境学専攻科 〒700-8530 岡山市北区津島中, Okayama Univ., Kita-ku, Okayama, 700-8530

ることができる。さらに、施工設備が小規模であり、大きなスペースが必要無いため、構造物が隣接し合う都市現場の狭隘部での施工にも有効であると考えられる。

本論文では、はじめに極超微粒子注入材の材料特性について述べる。次に、室内1次元注入試験を実施し、極超微粒子注入材の浸透性能を従来の注入材と比較した。そして、室内3次元注入試験を実施することで、極超微粒子注入材の改良効果を評価した。さらに、現場施工性の検証を目的とした現場注入試験の結果を報告する。

2 極超微粒子注入材の材料特性²⁾

極超微粒子注入材では、浸透性を向上させるために粒径を小さくするとともに、粗大な水和物の生成を抑制するため、主原料として高炉スラグを使用する。また、ポリカルボン酸系分散剤を用い、高速攪拌することで凝集粒子を分散させた。Fig. 2に極超微粒子注入材と超微粒子注入材の電子顕微鏡写真(5000倍)を示すが、両者の粒径の差異は明瞭である。Fig. 3にレーザー散乱・回折法により測定した極超微粒子注入材の粒度分布を示す。図中には、市販の超微粒子注入材、普通セメントの粒度分布を併記した。極超微粒子注入材の平均粒径(D_{50})は $1.5\mu\text{m}$ であり、超微粒子注入材の $4\mu\text{m}$ に比べて約1/3、普通セメントの $20\mu\text{m}$ に比べて約1/13と極めて微細な材料である。

Fig. 2 Electron micrograph of cement.

Fig. 3 Particle size distribution of cement.

3 極超微粒子注入材の浸透性能の比較³⁾

極超微粒子注入材の浸透性能を評価するために、室内1次元注入試験を実施した。本章では、同一地盤に対する極超微粒子注入材の浸透長を、従来の注入材と比較した結果について示す。

3.1 試験方法

室内1次元注入試験の概略図をFig. 4に示す。試験地盤は、東北ケイ砂7号と8号を1:1で混合した試料(細粒分含有率21%)からなり、その物性をTable 1に示す。試験地盤は内径50mm、長さ1025mmの亚克力円筒に、所定の間隙率43%となるよう層厚25mmずつ試料を投入し、ランマーを用いて突き固めることで作製した。亚克力円筒の上下にフィルター層を25mmずつ設けて、試験地盤の長さは975mmとした。極超微粒子注入材の配合は、水セメント比(以下W/C)400%, 600%, 800%, 1200%, 1600%の5ケースとし、試験地盤を完全に飽和させた後、高速ミキサーで3分間攪拌して作液したグラウトを試験地盤の限界圧力0.50MPaで筒底部より注入した。また、比較のため市販の超微粒子注入材(W/C = 800%)および懸濁型薬液注入材、溶液型薬液注入材についても同様に試験した。注入量は間隙体積に相当する823mlとし、上部から排出される間隙水量が注入量に達したときに試験を終了した。注入より7日後、触手により固化部分を確認し、浸透長を測定した。

3.2 試験結果

各注入材の浸透長をFig. 5に示す。同図に示されるように、従来の懸濁型薬液注入材は試験地盤に浸透せず、超微粒子注入材でも約27cmの浸透長しか得られなかった。一方、極超微粒子注入材W/C = 400 ~ 800%のケースでは、設計通りの浸透長が得られ、溶液型注入材と同等の高い浸透特性が示された。W/C = 1200%および1600%のケースでは、浸透長はそれぞれ81.3cm、50.5cmと全長に達しなかった。

Fig. 4 Laboratory grouting test.

Table 1 Properties of artificial ground.

Material sand		Porosity (%)	Content of fines (%)	Relative density (%)	Permeability coefficient (cm/s)	Critical pressure (MPa)
Silica sand	Mixture of #7 and #8 (1:1)	43	21	87	$1.5 \sim 2.5 \times 10^{-3}$	0.50

Fig. 5 Length of solidified ground of various grouts.

4 室内3次元注入試験による改良効果の評価

現場注入試験を実施するにあたり、その注入仕様を検討するために、室内3次元注入試験を実施した。同試験は、室内1次元注入試験と現場注入試験の中間規模の試験として位置付けられ、注入材の配合ごとに、改良体の形状も含めた浸透特性の評価が可能である。また、改良体から採取したコアの一軸圧縮強さや透水係数を求めることで、改良効果を評価することができる。本章では、その試験方法および結果について示す。

4・1 試験方法

室内3次元注入試験の概要図を Fig. 6 に示す。試験地盤は、既述した室内1次元注入試験と同様に東北ケイ砂7号と8号を1:1で混合した試料（細粒分含有率21%）を用いて作製した。内径533mm、高さ690mmのドラム缶に、層厚50mm分に相当する試料を順に投入し、ドラム缶の周囲を打撃し振動を与えながら水締めすることで、間隙率を43%に調整した。ドラム缶の上下には粗砂からなるフィルター層を50mmずつ設け、排水用の塩ビ管を同層に上下各2本挿入した。極超微粒子注入材の配合はW/C = 400%, 600%, 800%, 1000%, 1200%, 1600%の6ケースとし、試験地盤を完全に飽和させて透水係数を求めた後、中央の注入管（φ20mm）より設計注入量12ℓを注入した。注入は流量一定条件で行い、注入速度は現場相当の8ℓ/minとした。なお、設計注入量12ℓおよび間

隙率43%より、改良体の設計改良直径は37.6cmと算定される。

注入の約1週間後、試験地盤から改良体を掘り出し、XYZ方向の改良径および重量を測定した。そして、コアサンプリングによる供試体（直径約43mm、高さ約86mm）を用いて、材齢28日で一軸圧縮試験および透水試験を実施した。

4・2 試験結果および考察

試験条件および試験結果を Table 2 に示す。また、改良体の形状を Fig. 7 に例示する。改良体の形状については、極超微粒子注入材（W/C = 800%）が設計通りの球状となったのに対し、超微粒子注入材（W/C = 800%）は扁平で球形をなさなかった。そこで、改良体の大きさを同一の指標で比較評価するために、式(1)および式(2)により、改良体を球状と仮定したときの球相当直径を求め、Table 2 中に記載した。また、設計改良直径37.6cmに対する球相当直径の割合を改良率と定義し、試験ケースごとの改良率を算出した。

$$\rho_{impr.} = \rho_s \times (1 - n) + \rho_g \times n \quad (1)$$

$$r_{equiv.} = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{W}{\rho_{impr.}}\right)} \quad (2)$$

ここで、 ρ_s : 地盤の土粒子密度 (g/cm^3)、 ρ_g : グラウト密度 (g/cm^3)、 $\rho_{impr.}$: 改良体の湿潤密度 (g/cm^3)、 n : 間隙率 (%), $r_{equiv.}$: 球相当直径 (cm), W : 改良体の質量 (g) である。

4・2・1 改良率 各試験ケースの改良率とW/Cの関係を Fig. 8 に示す。極超微粒子注入材で、W/Cの増加、すなわちセメント量の減少に伴い改良率が低下する関係が認められた。W/C = 400% ~ 800%の改良率が約90%以上であるのに対し、W/C = 1000%は83.0%, W/C = 1200%は80.7%となり、室内1次元注入試験結果と同様に、W/C = 800% ~ 1200%で改良率が顕著に低下する傾向が認められた。次に、超微粒子注入材であるが、設計注入量12ℓを全量注入できたものの、改良体の形状は扁平で球形をなさず、改良率は約60%と小さかった。

以上、室内3次元注入試験を実施した結果、極超微粒

Fig. 6 Laboratory grouting test (three-dimensional).

Fig. 7 Shape of solidified ground.

Fig. 8 Relationship between improved rate and W/C.

子注入材の改良率は約 90% が得られており、その形状は設計通りの球状であった。従来の超微粒子注入材に比較して、極超微粒子注入材の高い浸透特性が示された。

4・2・2 改良強度 極超微粒子注入材 (W/C = 400%~1600%) の改良体から得た供試体の一軸圧縮試験結果 σ_{28} を Fig. 9 に示す。同図の横軸である注入管からの離隔とは、注入管からコアの中心までの距離を示す。Fig. 9 から、一軸圧縮強さは注入孔からの離隔にほとんど依存せず、各試験ケースでほぼ一定の値を取ることが分かる。つまり、注入材は均質に浸透し、全体的に改良されたものと考えられる。Table 2 に示す極超微粒子注入材の改良強度を、文献⁵⁾に基づく一般的な溶液型薬液注入材の改良強度 250kN/m^2 と比較すると、W/C = 400% で溶液

型薬液注入材の約 30 倍、W/C = 600%, 1000% で約 16 倍、W/C = 800%, 1200% で約 10 倍の高い改良強度が示された。なお、W/C = 800% の改良強度は W/C = 1000% の改良強度を下回った。これは W/C = 800% の改良率が 90.6% と高く、W/C = 800% の改良体は、体積に換算して W/C = 1000% の 1.3 倍あることから、改良体の単位体積当たりのセメント量が W/C = 1000% よりも小さくなったためと考えられる。ただし、W/C = 800% の改良強度 (約 2500kN/m^2) でも、液状化はもとより地盤強化が目的とされる場合にも通常十分な改良強度が確保されている。本試験結果において、W/C = 800% のケースは、W/C が中程度であるのに対して改良率が 2 番目に高いことから、グラウトの材料単価および注入工事の数量が低減可能となる最も経済的な配合であると考えられる。

4・2・3 改良透水係数 改良透水係数も、一軸圧縮強さと同様に、注入中心からの離隔にほとんど依存せず、Table 2 に示すような結果となった。試験地盤の透水係数と比較すると、注入後、極超微粒子注入材 W/C = 400%, 600%, 1000% で 3 オーダー、その他の W/C で 2 オーダー透水係数が低下した。また、原位置地盤の透水性を表す指標であるルジオン値に換算すると ($1\text{Lu} \approx 1.3 \times$

Fig. 9 Relationship between unconfined compressive strength and distance from injection pipe.

Table 2 Conditions and results of experiments.

Grout		Ground properties		Size and weight of solidified ground						Properties of solidified ground			
Material	W/C (%)	Material and porosity	Permeability coefficient (cm/s)	Length (cm)			Equivalent diameter (cm)	Improved rate (%)	Weight (kg)	Unconfined compressive strength (kN/m^2)		Permeability coefficient (cm/s)	
				X	Y	Z				Range	Ave.	Range	Ave.
Ultrafine cement	400	Silica sand #7 (50) and #8 (50) n 43%	$2.0 \sim 4.0 \times 10^{-3}$	34.0	34.0	35.0	35.1	93.4	45.4	5700~8600	7370	$5.5 \times 10^{-7} \sim 1.1 \times 10^{-6}$	7.3×10^{-7}
	600			34.0	35.0	35.0	33.8	89.8	40.0	3800~4800	4180	$2.8 \sim 6.5 \times 10^{-6}$	4.3×10^{-6}
	800			34.0	33.5	37.0	34.1	90.6	40.8	2200~3000	2580	$2.4 \sim 4.0 \times 10^{-5}$	3.1×10^{-5}
	1000			29.5	29.5	31.5	31.2	83.0	31.2	3400~4600	4000	$3.4 \sim 5.6 \times 10^{-6}$	4.4×10^{-6}
	1200			30.0	30.0	30.5	30.3	80.7	28.6	2100~2900	2550	$3.9 \sim 4.1 \times 10^{-5}$	3.9×10^{-5}
	1600			27.5	27.0	34.0	30.0	79.8	27.6	1700~2800	2140	$2.5 \sim 3.3 \times 10^{-5}$	2.8×10^{-5}
Superfine cement	800			40.0	39.0	15.0	23.6	62.7	13.5	—	—	—	—

10^{-5}cm/s), $W/C = 400\%, 600\%, 1000\%$ でルジオン値 1Lu を下回り, ダム基礎地盤の一般的な改良目標値 $2\text{Lu}^{(9)}$ を満たす高い止水性が示された.

5 現場注入試験による施工性の検証⁴⁾

室内1次元注入試験および3次元注入試験の実施結果を踏まえ, 本注入工法の施工性を検証するために, 砂質土を対象とした極超微粒子注入材の現場注入試験を実施した. 本章では, その試験方法および結果について示す.

5.1 地盤条件

現場注入試験は千葉県富津市で実施した. 事前の地盤調査の結果から, GL-2.0m までは埋戻土(粘性土)で, その下部に地下水位 GL-1.5m 以下の注入対象となる砂質土が分布することを確認した. 砂質土は砂州性堆積物であり, N 値 17 ~ 27 の礫混じり中砂~細砂からなる. 細粒分含有率は 2 ~ 3% で, 室内3次元注入実験で注入対象地盤としたケイ砂7号と8号の混合砂(混合比 1:1)よりも粒径が粗かった. 一方で間隙率は 36% と小さく, 相対密度は 100% 以上, 透水係数は $4.7 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ であった.

5.2 注入方法

極超微粒子注入材の配合は, $W/C = 400\%, 800\%, 1200\%$ の 3 配合とし, 注入速度は 15 l/min とした. 設計改良直径 $\phi 2.0\text{m}$ の球体を想定し, 充填率を 125% と設定して, 次式により注入量を算出した.

$$Q = V \times n \times \alpha = \left(\frac{4 \times \pi \times 1.0^3}{3} \right) \times 0.36 \times 1.25 = 1880 \text{ (l)} \quad (3)$$

ここで, Q : 注入量 (l), V : 改良体体積 (m^3), n : 対象地盤の間隙率 (%), α : 充填率 (%) である.

注入方法の概略図を Fig. 10 に示す. 削孔径 90mm でボーリングを行い, 孔内に注入区間長として $L = 1.0\text{m}$ のストレーナ加工した $\phi 40\text{mm}$ 塩化ビニル製パイプ(注入パイプ)を設置した. 注入パイプには $L = 1.0\text{m}$ の布製パッカーを注入区間の上部に取り付け, 地表部への注入材漏出防止とした.

練混ぜは, 水 → (分散剤 + 消泡剤) → 極超微粒子注入材料の順でミキサーに投入し, 3 分間高速攪拌を行った. 注入は, 所定の速度で定量注入し, 注入量が計画注入量に達した時点で注入完了とした. 流量と圧力は循環式流量計で測定し, データ処理装置で収録した.

Fig. 10 Grouting method.

5.3 試験結果

5.3.1 有効注入圧力 各試験ケースとも計画量を注入でき, 地表部へのリークはなかった. 有効注入圧力は時間の経過とともに上昇し, W/C が小さい富配合のケースほど有効注入圧力は高くなった. なお, 最大有効注入圧力は $W/C = 400\%$ で 0.52MPa であった.

5.3.2 改良強度, 透水係数および S 波速度 注入孔からそれぞれ 0.25m, 0.50m, 0.75m 離れた位置でチェックボーリングを行い, 改良コアを採取, 成形して材齢 28 日で一軸圧縮強度試験に供した. 室内3次元注入試験と同様に, 改良体の内部 (0.25m) と側部 (0.5m または 0.75m) で大きな強度差は無く, 改良体が均質に形成されていることが確認できた. $W/C = 400\%$ の改良強度は 7000kN/m^2 以上と高強度で, またその他の配合でも 3000kN/m^2 以上の強度を有し, 室内試験結果とよく整合した.

改良後のコアの透水係数は, $W/C = 400\%$ で $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$, $W/C = 800\%$ で $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}\text{cm/s}$ の高い止水性が得られており, 原地盤と比較して透水係数を 2 ~ 5 オーダー低減できた.

5.3.3 改良出来形 注入完了後, 約 1 ヶ月の養生期間を経て地盤を掘削し, 改良体の出来形を確認した. 掘削は改良体の頭部付近まで行い, 改良体頭部の出来形を計測した. Fig. 11 に $W/C = 400\%$ の改良体出来形を例示する. いずれも注入材の割裂脈は無く球状を呈しており, 土粒子間を均質に浸透注入できたことが確認された. また, 頭部改良径 ϕ は, $W/C = 400\%$ で $\phi 1.9 \sim 2.0\text{m}$, $W/C = 800\%$ で $\phi 1.8 \sim 1.9\text{m}$, $W/C = 1200\%$ で $\phi 1.5 \sim 1.6\text{m}$ であった. 室内試験の結果と同様に W/C が小さいほど改良径は大きく, $W/C = 400\%, 800\%$ のケースで概ね計画通りの出来形を得ることができた.

6 結 言

得られた知見を以下に示す.

(1) 室内1次元注入試験を実施し, 細粒分含有率 21%, 透水係数 $1.5 \sim 2.5 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ の試験地盤に対する極超微粒子注入材の浸透性能を従来の注入材と比較した. その結果, 超微粒子注入材および懸濁型薬液注入材が目詰

Fig. 11 Observed solidified ground ($W/C = 400\%, Q = 15\text{ l/min}$).

まりした地盤に対し、極超微粒子注入材（W/C = 800% 以下）は、溶液型薬液注入材と同様に設計改良長が得られ、高い浸透性能が示された。

(2) 室内3次元注入試験を実施し、細粒分含有率 21%、透水係数 $2.0 \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ の試験地盤に対する極超微粒子注入材の3次元的な浸透特性および改良効果を調査した。その結果、超微粒子注入材では改良体の形状が扁平となったのに対し、極超微粒子注入材では球状の改良体を得られた。W/C = 400 ~ 800% での改良率は概ね 90% 以上で、W/C = 1200% では約 80% であった。改良体の材齢 28 日の一軸圧縮強さは W/C = 400% で 7000kN/m^2 程度、W/C = 800% で 2500kN/m^2 程度あり、溶液型薬液注入材と比較して 10 倍以上の高い改良強度が示された。また、改良体の透水係数は W/C = 400% で 10^{-7}cm/s オーダー、W/C = 600%, 1000% で 10^{-6}cm/s オーダー、W/C = 800%, 1200% で 10^{-5}cm/s オーダーが得られた。

(3) 現場注入試験を実施し、本注入工法の施工性を検証した。その結果、細粒分含有率 2 ~ 3% のよく締まった砂地盤に対し、注入速度 15 l/min で良好に注入することができた。改良体の一軸圧縮強さは W/C = 400% で 7000kN/m^2 程度、W/C = 800%, 1200% でも 3000kN/m^2 以上と高強度で、W/C = 400%, 800% のケースではほぼ設計通りの球状改良体が確認できた。

以上、本注入工法は細砂地盤に対して十分な浸透性を有し、地盤を高強度に改良することができる。また、設備は比較的小規模で済み、都市現場の狭隘部での施工にも適用可能である。このような地盤改良効果と注入工法の特長により、大型の土木構造物のみならず、住宅や災

害発生時に避難所となる学校等重要施設の液状化防止や耐震補強にも有効である。今後は地盤条件に応じた最適な注入の設計施工法について更なる検討を進めるとともに、現場での施工実績を積み上げられるよう努力していく所存である。

参 考 文 献

- 1) R. Yonekura, S. Shimada and Y. Kinoshita, "Permanent grout", p.130 (2000) Sankaido.
- 2) T. Kanazawa, S. Wakasugi, M. Nishigaki, T. Yamamoto and Y. Abe, "Development of grouting method with ultra fine cement grout -Material characteristics-", Proceedings of the 65th JSCE 2010 Annual Conference, CD-ROM, III-479, pp.957-958 (2010) JSCE.
- 3) Y. Koizumi, T. Tanaka, M. Nishigaki, J. Takeuchi and T. Kanazawa, "Development of grouting method with ultra fine cement grout -Laboratory grouting test-", Proceedings of the 65th JSCE 2010 Annual Conference, CD-ROM, III-480, pp.959-960 (2010) JSCE.
- 4) J. Takeuchi, T. Hamago, M. Nishigaki, T. Tanaka, Y. Koizumi and T. Kanazawa, "Development of grouting method with ultrafine cement grout -Field grouting test-", Proceedings of the 65th JSCE 2010 Annual Conference, CD-ROM, III-481, pp.961-962 (2010) JSCE.
- 5) R. Yonekura and S. Shimada, "Characteristics of permanent grout", Journal of Civil Engineering, Vol.40, No.8, pp.104-109 (1999).
- 6) Japan Institute of Construction Engineering, "Grouting technical guide", pp.32-35 (2003) Taisei shuppan.