



## 地層処分を対象としたグラウト材料の開発

Development of Grout Materials for a Geological Disposal System  
for High-level Radioactive Waste

福岡 奈緒美 新貝 文昭 三浦 律彦 延藤 遼  
山田 勉 内藤 守正

Naomi FUKUOKA, Fumiaki SHINKAI, Norihiko MIURA, Jun NOBUTO  
Tsutomu YAMADA and Morimasa NAITO

地層処分研究開発部門  
地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate

July 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA  
Data/Code

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:[ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:[ird-support@jaea.go.jp](mailto:ird-support@jaea.go.jp)

## 地層処分を対象としたグラウト材料の開発

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

福岡 奈緒美<sup>※</sup>, 新貝 文昭<sup>※</sup>, 三浦 律彦<sup>\*1</sup>, 延藤 遼<sup>\*2</sup>,  
山田 勉<sup>\*3</sup>, 内藤 守正

(2010年3月26日受理)

本事業は経済産業省資源エネルギー庁「平成19年度地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：地下坑道施工技術高度化開発）」および「平成20年度地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：地下坑道施工技術高度化開発）」の一部として実施したものである。

高レベル放射性廃棄物を対象とした地層処分施設では、天然の岩盤（天然バリア）と工学的なバリア（人工バリア）によって構築される多重バリアシステムにより長期的な安全の確保がなされる。しかし、支保工やグラウトに通常用いられている普通ポルトランドセメントなどのセメント系材料は高アルカリ性であり、長期的には岩盤の変質を引き起こし、処分システムの長期性能に影響を及ぼす可能性が指摘されている。さらに、地層処分施設の操業にあたっては、地下深部の高水圧環境や緩衝材の定置作業性などを確保するために、湧水量が厳しく制限されることが想定されることから、従来のグラウトよりも改良目標値（ルジオン値）が低く設定され、微細な亀裂に対しても注入可能なグラウト材料が必要と考えられる。このため、平成19年度より、既存のグラウト材料と同等以上の施工性・止水性を有し、岩盤への影響を最小限に抑える低アルカリ性（pH≤11）のグラウト材料の開発に取り組んでいる。ここでは、グラウト材料の開発状況について室内試験結果および検討内容を整理し、原位置への適用において最適と考えられる配合を提示する。

---

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁受託「地下坑道施工技術高度化開発」の成果を使用して取りまとめたものである。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※ 特定課題推進員

\*1 株式会社大林組

\*2 清水建設株式会社

\*3 戸田建設株式会社

Development of Grout Materials for a Geological Disposal System for High-level Radioactive Waste

Naomi FUKUOKA<sup>\*</sup>, Fumiaki SHINKAI<sup>\*</sup>, Norihiko MIURA<sup>\*1</sup>, Jun NOBUTO<sup>\*2</sup>,  
Tsutomu YAMADA<sup>\*3</sup>and Morimasa NAITO

Geological Isolation Research Unit  
Geological Isolation Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 26 , 2010)

This project was carried out by the Geological Isolation Research and Development Directorate of Japan Atomic Energy Agency with the fund of Agency for Natural Resources and Energy of the Ministry of Economy, Trade and Industry in 2007 and 2008.

High-level radioactive waste (HLW) management in Japan is based on the multi-barrier concept, composed of the engineered barrier system and the surrounding geological formations (natural barrier). Although cementitious materials are commonly used for rock support, lining, and grouting, their pH plume are considered to have an adverse effect on long-term safety of a geological disposal system. In addition, during the emplacement of waste package with buffer material, it is required to limit amount of groundwater inflow into a disposal pit or tunnel to a certain level by grouting because the bentonite clay buffer is easy to swell in time by contact with the groundwater. Therefore, it is necessary to develop new grout materials with penetrability for smaller fractures.

We have developed new grout materials, which have better penetrability and are environmentally more friendly than existing cementitious grout materials since FY 2007. This report shows the most appropriate composition of new grout materials to be suitable for the in-situ experiment based on the result of indoor test.

Keywords: Grout Material, Low Alkaline Cement, Colloidal Silica, Superfine Spherical Silica,  
Geoogical Disposal System

---

This work was carried out by JAEA under the contract with the Natural Resources and Energy Agency, Ministry of Economy, the Trade and Industry

<sup>\*</sup> Special Topic Researcher

<sup>\*1</sup> Obayashi Corporation

<sup>\*2</sup> Shimizu Corporation

<sup>\*3</sup> Toda Corporation

## 目 次

1. はじめに .....	1
1.1 背景と目的.....	1
1.2 本報告書の構成 .....	1
2. グラウト材料の開発 .....	2
2.1 グラウト材料の種類および適用範囲.....	2
2.1.1 グラウト材料の種類 .....	2
2.1.2 低アルカリ性セメント系グラウト材料.....	2
2.1.3 溶液型グラウト材料 .....	2
2.1.4 超微粒子球状シリカグラウト材料 .....	2
2.1.5 グラウト材料の適用範囲 .....	3
2.2 低アルカリ性セメント系グラウト材料.....	4
2.2.1 試験の概要.....	4
2.2.2 試験材料 .....	9
2.2.3 試験方法 .....	13
2.2.4 試験結果 .....	26
2.2.5 まとめ .....	39
2.3 溶液型グラウト材料 .....	41
2.3.1 試験の概要.....	41
2.3.2 試験材料 .....	46
2.3.3 試験方法 .....	48
2.3.4 試験結果 .....	61
2.3.5 まとめ .....	79
2.4 超微粒子球状シリカグラウト材料 .....	80
2.4.1 試験の概要.....	80
2.4.2 試験材料 .....	82
2.4.3 試験方法 .....	84
2.4.4 試験結果 .....	85
2.4.5 まとめ .....	88
3. まとめと今後の課題.....	89
3.1 低アルカリ性セメント系グラウト材料.....	89

3.2 溶液型グラウト材料 .....	89
3.3 超微粒子球状シリカグラウト材料 .....	89
参考文献 .....	90
付録 1. 基礎物性試験結果一覧表 .....	93
付録 2. 低アルカリ性セメント系グラウト材料の粘性試験結果データ集 .....	103
付録 3. 低アルカリ性セメント系グラウト材料の可視化平行平板試験結果 .....	265
付録 4. 溶液型グラウト材料の基礎物性試験結果（2007 年度実施） .....	303
付録 5. 溶液型グラウト材料の基礎物性試験結果（2008 年度実施） .....	321

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
1.1 Background and purpose.....	1
1.2 Structure of the report.....	1
2. Development of grout materials.....	2
2.1 Kind and Application of grout materials.....	2
2.1.1 Kind of grout materials .....	2
2.1.2 Low alkaline cement.....	2
2.1.3 Colloidal silica .....	2
2.1.4 Superfine Spherical silica.....	2
2.1.5 Application of grout materials.....	3
2.2 Low alkaline cement.....	4
2.2.1 Outline .....	4
2.2.2 Material .....	9
2.2.3 Method .....	13
2.2.4 Result .....	26
2.2.5 Summary .....	39
2.3 Colloidal silica .....	41
2.3.1 Outline .....	41
2.3.2 Material .....	46
2.3.3 Method .....	48
2.3.4 Result .....	61
2.3.5 Summary .....	79
2.4 Superfine Spherical silica .....	80
2.4.1 Outline .....	80
2.4.2 Material .....	82
2.4.3 Method .....	84
2.4.4 Result .....	85
2.4.5 Summary .....	88
3. Summary and Future issues .....	89
3.1 Low alkaline cement.....	89

3.2 Colloidal silica .....	89
3.3 Superfine Spherical silica .....	89
References.....	90
Appendix 1 : Test result table for basic characteristics .....	93
Appendix 2 : Viscosity test result data of low alkaline cement .....	103
Appendix 3 : Injection test result of low alkaline cement using visible parallel plate model .....	265
Appendix 4 : Test result of colloidal silica for basic characteristics(FY2007) .....	303
Appendix 5 : Test result of colloidal silica for basic characteristics(FY2008) .....	321

## 表目次

表 2.2-1 構成材料 .....	4
表 2.2-2 室内試験における材料の要求値.....	5
表 2.2-3 基礎物性試験項目 .....	8
表 2.2-4 2007 年度の基礎物性試験の配合一覧.....	12
表 2.2-5 2008 年度の基礎物性試験の配合一覧.....	13
表 2.2-6 可視化平行平板試験の配合 .....	19
表 2.2-7 静置ブリーディング試験結果 .....	30
表 2.2-8 グラウト材料の pH 測定結果.....	34
表 2.2-9 試験結果一覧表（注入圧 1MPa） .....	36
表 2.2-10 試験結果一覧表（注入圧 2MPa） .....	37
表 2.2-11 基礎物性試験結果のまとめ（2008） .....	40
表 2.3-1 構成材料一覧.....	42
表 2.3-2 室内試験における材料の要求値の目安.....	43
表 2.3-3 基礎物性試験項目一覧 .....	46
表 2.3-4 2007 年度の基礎物性試験の配合一覧表.....	47
表 2.3-5 2008 年度の検討配合一覧表（ゲルタイム調整前） .....	47
表 2.3-6 2008 年度の基礎物性試験の配合一覧表（ゲルタイム調整後，1000mLあたり）	48
表 2.3-7 レオメータの測定治具の概要 .....	51
表 2.3-8 2008 年度の粘性測定試験の仕様 .....	52
表 2.3-9 ろ過試験に用いた溶液型の配合.....	53
表 2.3-10 比較用の超微粒子セメントの配合 .....	53
表 2.3-11 アクアマリンの成分表（製品添付資料より抜粋） .....	55
表 2.3-12 超微粒子セメントの配合 .....	55
表 2.3-13 パイプの諸元 .....	57
表 2.3-14 水圧抵抗性試験の試験条件および検討ケース（2008 年度） .....	59
表 2.3-15 測定項目と試験方法 .....	60
表 2.3-16 ゲルタイム調整試験結果および pH 測定結果（Hi シリカのシリーズ） .....	61
表 2.3-17 ゲルタイム調整試験結果および pH 測定結果（MEYCO MP32OT：海外製品）	62
表 2.3-18 一軸圧縮強度試験結果のまとめ（2007 年度）：一軸圧縮強さ（単位 kN/m <sup>2</sup> ） ..	63
表 2.3-19 一軸圧縮強度試験結果のまとめ（2007 年度）：弾性係数 E <sub>50</sub> （単位 kN/m <sup>2</sup> ） ..	63
表 2.3-20 一軸圧縮強度試験結果のまとめ（2008 年度）：一軸圧縮強さ（単位 kN/m <sup>2</sup> ） ..	65
表 2.3-21 一軸圧縮強度試験結果のまとめ（2008 年度）：弾性係数 E <sub>50</sub> （単位 kN/m <sup>2</sup> ） ..	66
表 2.3-22 各配合における経過時間ごとの流動の種類分け（2007 年度） .....	68
表 2.3-23 実ゲルタイムと予想ゲルタイムの比較（2007 年度） .....	68
表 2.3-24 三軸圧縮強度試験 最大せん断応力のまとめ（2008 年度） .....	72
表 2.3-25 一軸圧縮強度試験結果と三軸圧縮強度試験結果の比較（2008 年度） .....	73
表 2.3-26 地下水の希釀によるゲルタイムの比較一覧（2008 年度） .....	75
表 2.3-27 パイプ押出し試験の結果（2007 年度） .....	76

表 2.3-28 耐久性試験における1ヶ月後の作用水の状況（2008年度）	78
表 2.3-29 基礎物性試験結果のまとめ（2008）	79
表 2.4-1 構成材料	80
表 2.4-2 室内試験における材料の要求値	81
表 2.4-3 基礎物性試験項目	82
表 2.4-4 粒度分布測定結果	82
表 2.4-5 基礎物性試験の配合一覧	84
表 2.4-6 漏斗流下試験結果	85
表 2.4-7 粘性試験結果	86
表 2.4-8 ブリーディング試験結果	86
表 2.4-9 圧縮強度試験結果	87
表 2.4-10 pH測定結果	88

## 図目次

図 2.1-1 グラウト材料の分類例	2
図 2.1-2 適用範囲のイメージ	3
図 2.2-1 配合の選定フロー（2007年度）	6
図 2.2-2 配合の選定フロー（2008年度）	7
図 2.2-3 粉体材料の粒度分布計測の一例(2008年度)	9
図 2.2-4 活性度指数の測定結果	10
図 2.2-5 サンドカラム試験装置の概要 <sup>8)</sup>	15
図 2.2-6 サンドカラム試験に使用した砂の粒度分布	16
図 2.2-7 亀裂を模擬した浸透性能試験装置（左：アクリル板+鉄板、右：アクリル板+花崗岩）	18
図 2.2-8 可視化平行平板試験装置	20
図 2.2-9 スペーサーおよび圧力計設置位置	21
図 2.2-10 JP漏斗とファンネルにおける流下時間の比較	26
図 2.2-11 ファンネル流下時間と塑性粘度の関係	26
図 2.2-12 SP/BをパラメータとしたW/Bと塑性粘度の関係	27
図 2.2-13 SP/BをパラメータとしたW/Bと降伏値の関係	27
図 2.2-14 メッシュ透過試験における透過量とメッシュサイズの関係	28
図 2.2-15 浸透量の経時変化の一例	29
図 2.2-16 ゲルタイム調整試験結果	29
図 2.2-17 加圧ブリーディング試験結果の一例	30
図 2.2-18 凝結始発時間とW/Bの関係	31
図 2.2-19 凝結終結時間とW/Bの関係	31
図 2.2-20 ファールコーン貫入深さとW/Bの関係	32
図 2.2-21 圧縮強度と結合材水比の関係	33
図 2.2-22 流出速度と配合の関係（平行平板モデル）	34

図 2.2-23	充填重量と配合の関係（凹凸亀裂モデル）	35
図 2.2-24	ポンプ回転数と注入圧力の経時変化（平行平板モデル）	35
図 2.2-25	配合と累計注入量の関係（最大注入圧 1.0MPa）	36
図 2.2-26	配合と累計注入量の関係（最大注入圧 2.0MPa）	37
図 2.2-27	注入圧・注入量一時間関係	38
図 2.2-28	間隙圧一時間関係（R=0.1m）	38
図 2.2-29	間隙圧一時間関係（R=0.4m）	39
図 2.2-30	間隙圧一時間関係（R=0.8m）	39
図 2.3-1	シリカ系グラウト材料の分類	41
図 2.3-2	試験フロー（2007 年度）	44
図 2.3-3	配合選定フロー（2008 年度）	45
図 2.3-4	押し出し実験の概要図	57
図 2.3-5	地下水に対する流出抵抗性の試算モデル	57
図 2.3-6	平行平板実験装置の概要図	58
図 2.3-7	水理学的亀裂開口幅の算定モデル	59
図 2.3-8	高水圧抵抗性の試算モデル	59
図 2.3-9	一軸圧縮強度試験における応力一ひずみ関係	63
図 2.3-10	材齢と一軸圧縮強さの関係（2007 年度）	64
図 2.3-11	材齢と弾性係数 $E_{50}$ の関係（2007 年度）	64
図 2.3-12	配合別の平均一軸圧縮強さの比較（2008 年度）	65
図 2.3-13	配合別の弾性係数の比較（2008 年度）	66
図 2.3-14	流動の種類	67
図 2.3-15	ニュートン流体時の粘度の経時変化（2007 年度）	68
図 2.3-16	粘性の動的測定試験結果（2008 年度）	69
図 2.3-17	通過グラウト材料量	70
図 2.3-18	三軸圧縮強度試験におけるせん断応力一ひずみの関係（2007 年度）	71
図 2.3-19	各配合におけるモール円（2008 年度）	73
図 2.3-20	養生水の種類による 28 日後の一軸圧縮強さ（平均値）の比較（2008 年度）	74
図 2.3-21	養生水の種類による 28 日後の弾性係数（平均値）の比較（2008 年度）	74
図 2.3-22	押し出し試験用パイプの内径ごとの平均付着強度（せん断抵抗）の関係（2007 年度）	76
図 2.3-23	想定される平均付着強度ごとの岩盤亀裂開口幅と必要改良範囲の関係（2007 年度）	77
図 2.3-24	平行平板試験結果と試算結果の比較（配合番号 1-2, 100 $\mu\text{m}$ の場合）（2008 年度）	77
図 2.3-25	平行平板試験結果と試算結果の比較（配合番号 3-1, 100 $\mu\text{m}$ の場合）（2008 年度）	78
図 2.3-26	平行平板試験結果と試算結果の比較（配合番号 1-2, 200 $\mu\text{m}$ の場合）（2008 年度）	78
図 2.4-1	SFP の製造工程	80

図 2.4-2 SFP の SEM 写真.....	81
図 2.4-3 SFCa の SEM 写真 .....	81
図 2.4-4 SPF の粒度分布図.....	83
図 2.4-5 SFCa の粒度分布図.....	83
図 2.4-6 漏斗流下時間と SFCa 粉体構成比との関係 .....	85
図 2.4-7 圧縮強度と SFCa 構成比の関係 .....	87
図 2.4-8 圧縮強度の経時変化.....	87

## 写真目次

写真 2.2-1 ファンネル粘度計.....	14
写真 2.2-2 P 漏斗流下試験.....	14
写真 2.2-3 鋼製メッシュ透過試験装置 .....	15
写真 2.2-4 サンドカラム試験の状況.....	16
写真 2.2-5 凝結試験装置 .....	17
写真 2.2-6 フォールコーン試験状況 .....	17
写真 2.2-7 浸透性能試験状況（左：全体，右：鋼製フレーム） .....	19
写真 2.2-8 可視化平行平板試験装置組立状況 .....	21
写真 2.2-9 スペーサー.....	22
写真 2.2-10 圧力計設置状況.....	22
写真 2.2-11 ボルト，止水ワッシャー，O リング .....	22
写真 2.2-12 CCD カメラ設置状況（左：下より，右：上より） .....	23
写真 2.2-13 コロイダルミキサー .....	23
写真 2.2-14 タンク .....	23
写真 2.2-15 流量圧力制御装置.....	24
写真 2.2-16 計測装置 .....	24
写真 2.2-17 組み立て状況（左：シムプレート設置状況，右：ボルト締め状況） .....	24
写真 2.2-18 注入状況（左：ビデオ撮影，右：グラウト採取状況） .....	25
写真 2.2-19 洗浄状況 .....	25
写真 2.2-20 付着強度試験後の供試体の状況(Φ 50mm) .....	33
写真 2.2-21 グラウト注入状況（平行平板モデル） .....	34
写真 2.3-1 一軸圧縮試験の載荷状況（2007 年度，配合 2，材齢 7 日） .....	49
写真 2.3-2 寸法安定性試験の養生状態（左；水中養生，右；恒温恒湿槽） .....	50
写真 2.3-3 Anton Paar 社製レオメータ Physica MCR301 .....	51
写真 2.3-4 ろ過試験装置全体 .....	52
写真 2.3-5 ろ過試験装置とろ過フィルター（見開き量 10μm） .....	53
写真 2.3-6 三軸圧縮試験の載荷状況（2007 年度，配合 1，材齢 7 日，拘束圧 100kPa 時）	54
写真 2.3-7 アクアマリン（左）と養生状態(pH=9.02) .....	55
写真 2.3-8 超微粒子セメントグラウト材料の作製状況と養生状態(pH=13.1).....	56
写真 2.3-9 押出し試験用のパイプと注入装置 .....	56

写真 2.3-10	試料の作製状況.....	60
写真 2.3-11	分析装置.....	60
写真 2.3-12	破壊時の状況（左から 1 日後, 7 日後, 14 日後, 28 日後） .....	62
写真 2.3-13	溶液型（配合番号 4）の透過後にできた堆積物 .....	70
写真 2.3-14	超微粒子セメント透過後の状況（左）と透過したスラリー（右） .....	70
写真 2.3-15	三軸圧縮強度試験後の破壊状況（左より 1 日後, 7 日後, 14 日後, 28 日後）	71
写真 2.3-16	パイプ押し出し試験によるグラウト材料の抜け出し（2007 年度） .....	75

This is a blank page.

## 1. はじめに

### 1.1 背景と目的

本研究は経済産業省資源エネルギー庁「平成19年度地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：地下坑道施工技術高度化開発）」および「平成20年度地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：地下坑道施工技術高度化開発）」の一部として実施したものである。

我が国において原子力エネルギーを継続的に利用していく上で、原子力発電および核燃料サイクルに伴って発生する放射性廃棄物の処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物などの地層処分については、「原子力政策大綱」<sup>1)</sup>などに沿って、国、研究開発機関などが、それぞれの役割分担を踏まえつつ、密接な連携のもとで、基盤研究開発を着実に進めていくこととしている。

高レベル放射性廃棄物を対象とした地層処分施設では、天然の岩盤（天然バリア）と工学的なバリア（人工バリア）によって構築される多重バリアシステムにより長期的な安全の確保がなされる。しかし、従来のグラウトに用いられている普通ポルトランドセメント（Ordinary Portland Cement, 以下、「OPC」という）などのセメント系材料は高アルカリ性であり、長期的には岩盤の変質を引き起こし、処分システムの長期性能に影響を及ぼす可能性が指摘されている。さらに、地層処分施設の操業にあたっては、地下深部の高水圧環境や緩衝材の定置作業性などを確保するために、湧水量が厳しく制限されることが想定されることから、従来のグラウトよりも改良目標値が高く設定され、微細な亀裂に対しても注入可能な材料が必要と考えられる。このため、平成19年度より、既存のグラウト材料と同等以上の施工性・止水性を有し、岩盤への影響を最小限に抑える低アルカリ性（pH≤11）のグラウト材料の開発に取り組んでいる。

ここでは、グラウト材料の開発状況について室内試験結果および検討内容を整理し、原位置への適用において最適と考えられる配合、および今後の方針を提示する。

### 1.2 本報告書の構成

本報告書は、3つの章から構成されている。1章で述べる「背景と目的」に従って、2章で地層処分を対象として開発を行っている3種類のグラウト材料の各試験結果を示す。

3章ではそれぞれの材料の今後の課題および開発方針について述べる。

## 2. グラウト材料の開発

### 2.1 グラウト材料の種類および適用範囲

#### 2.1.1 グラウト材料の種類

「1.1 背景と目的」で示した通り、グラウト材料は地下深部において適切な施工性・止水性を有し、かつバリアシステムの長期性能への影響を最小限に抑える材料が求められる。

従来のグラウト技術は、グラウト材料をセメント系と非セメント系に区分しているダムグラウト工を参考に発展してきた（図 2.1-1）。本研究では、3種類の材料（低アルカリ性セメント系グラウト材料、溶液型グラウト材料、超微粒子球状シリカグラウト材料）に着目して、開発および検討を進めてきた。

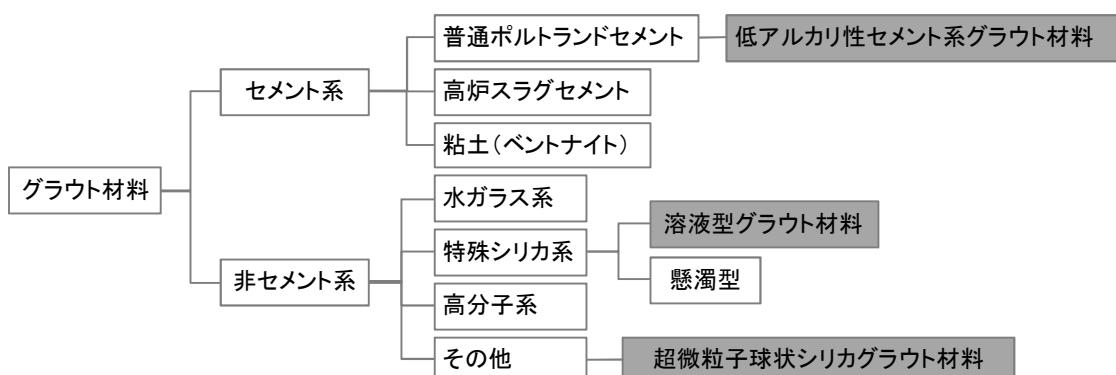


図 2.1-1 グラウト材料の分類例

#### 2.1.2 低アルカリ性セメント系グラウト材料

ダムグラウト工においては、セメント系材料として OPC や高炉セメント B 種が使用されることが多く、亀裂開口幅が微細な岩盤には超微粒子セメントも使用される<sup>2)</sup>。これらの材料は、岩盤への適用実績が豊富であるが、高アルカリ性のため処分システムの長期性能に影響を及ぼす可能性がある。そこで、本研究では、OPC を微粉碎・分級して製造した超微粒子の OPC にシリカフュームなどのポゾラン材料を混和した低アルカリ性セメント系グラウト材料を開発した。詳細は「2.2 低アルカリ性セメント系グラウト材料」で述べる。

#### 2.1.3 溶液型グラウト材料

一般には、非セメント系材料として、水ガラス系、特殊シリカ系、高分子系などが未固結地盤の改良工事に使用される。これらの材料はセメント系材料より浸透性に優れるが、耐久性に問題がある。そこで、本研究では、比較的耐久性が高いとされている特殊シリカ系の溶液型グラウト材料（活性シリカ）について、岩盤を対象とした場合の適用性を調査した。詳細は「2.3 溶液型グラウト材料」で述べる。

#### 2.1.4 超微粒子球状シリカグラウト材料

溶液型グラウト材料は止水性を担保すると考えられる強度特性がセメント系材料に比べて 2 オーダー程度も低く、低アルカリ性セメント系グラウト材料を十分にサポートできない可能性があ

る。そこで、低アルカリ性セメント系グラウト材料と溶液型グラウト材料の中間的な粒度分布を有する超微粒子球状シリカを主材とする新たなグラウト材料を開発した。詳細は「2.4 超微粒子球状シリカグラウト材料」で述べる。

### 2.1.5 グラウト材料の適用範囲

本研究では、低アルカリ性セメント系グラウト材料（以下、「低アルカリ性セメント」という）をメインのグラウト材料とし、溶液型グラウト材料（以下、「溶液型」という）と超微粒子球状シリカグラウト材料（以下、「超微粒子球状シリカ」という）を低アルカリ性セメントが対応できない状況で使用する代替材料として位置付けた。

グラウト材料の適用範囲については、浸透可能な亀裂開口幅が経験則として最大粒径の 3 倍<sup>3),4)</sup>程度とされていることや、スウェーデン核燃料廃棄物管理会社（以下、「SKB」という）での分類例（セメント系材料は比較的大きな亀裂（水理学的亀裂開口幅  $\geq 100\mu\text{m}$ ）を、溶液型はそれよりも小さな亀裂を対象）<sup>5)</sup>を参考に、亀裂開口幅と材料の最大粒径や平均粒径をもとに図 2.1-2 のように分類した。

また、亀裂開口幅以外にも注入工法や坑道種別に着目して分類することも可能である<sup>6)</sup>。

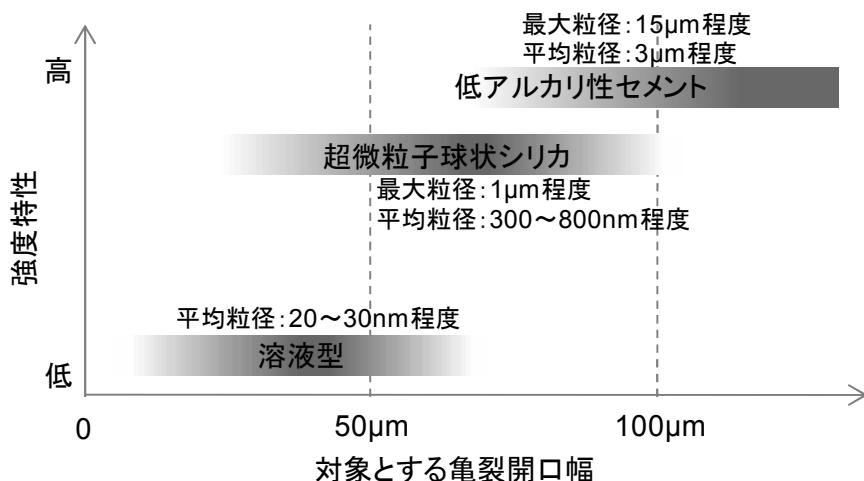


図 2.1-2 適用範囲のイメージ

## 2.2 低アルカリ性セメント系グラウト材料

### 2.2.1 試験の概要

#### (1) 開発の目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムは、天然バリアと人工バリアからなる多重バリアシステムにより構成される。これら放射性廃棄物処分場施設の建設・操業においては、セメント系材料が止水や処分空洞安定等の目的で用いられる。セメント系材料は、処分場閉鎖後長期にわたり高アルカリ成分 ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ など) を溶出することから、バリア材である岩盤やベントナイト等の鉱物に化学的変質を与え、処分システムの長期性能に大きな不確実性をもたらすことが懸念されている。このため、ポゾラン材料を高含有した低アルカリ性セメントの開発が進められ<sup>7), 8)</sup>、これまでに吹付けコンクリートや覆工コンクリート等への適用研究が進められてきた<sup>9), 10)</sup>。

本研究では、原位置への適用において最適と考えられる配合を提示するため、新たに低アルカリ性セメントを開発することとし、これまで基礎物性の把握（2007年度）<sup>11)</sup>、原位置での適用性試験に向けた配合を選定し、浸透性を評価（2008年度）<sup>12)</sup>した。

#### (2) 構成材料

セメントは水和反応によって硬化するが、その過程で  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  を生成するため高アルカリとなる。このため、フライアッシュやシリカフュームのポゾラン反応を利用して、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  を消費することによりアルカリ性を低減する手法が検討されてきた<sup>8), 9)</sup>。グラウト材材の粉体材料の選定においては、粒子形状やサイズが重要な要因となり、流動性分散性および浸透性の観点から球状粒子が望ましいと判断された。そこで、ポゾラン材料として、超微粒子のシリカフューム（以下、「SF」という）と JIS I 種のフライアッシュ（以下、「FA」という）を選定し、さらに中間粒子サイズとなる球状シリカ（以下、「SS」という）を追加選定した。セメントは、OPC を微粉碎して、平均粒径  $4.26\mu\text{m}$  の超微粒子セメントを試作した（以下、「超微粒子 OPC」という）。なお、超微粒子の粉体材料を多量使用するため、それらの分散を長時間安定化させ再凝集を防ぐナフタレン系の高性能減水剤を併用した。構成材料の一覧は表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 構成材料

構成材料			仕様	製造・販売	製品名称
結合材 (B)	超微粒子普通ポルトランドセメント	超微粒子 OPC	低アルカリ型 OPC の微粉碎調製品 平均粒径 $4.26\mu\text{m}$ , 密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ , 比表面積 $12000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度(メーカー値)	太平洋マテリアル	試作品
	シリカフューム	SF	JIS 規格品 平均粒径 $0.72\mu\text{m}$ , 密度 $2.20\text{g}/\text{cm}^3$ , 比表面積 $2000000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度(メーカー値)	エルケムジャパン	940U
	球状シリカ	SS	平均粒径 $1.10\mu\text{m}$ , 密度 $2.40\text{g}/\text{cm}^3$ , 比表面積 $62000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度(メーカー値)	電気化学工業	SFP-30M
	フライアッシュ	FA	JIS I 種品 平均粒径 $2.99\mu\text{m}$ , 密度 $2.40\text{g}/\text{cm}^3$ , 比表面積 $5460\text{cm}^2/\text{g}$ 程度(メーカー試験値)	四国電力	ファイナッシュ FA20
混和剤	分散剤	SP	ナフタレン系高性能減水剤	花王	マイティ 150
	急硬剤	—	炭酸塩	太平洋マテリアル	アロフィックス SS
練混ぜ水	水	W	水道水からイオン交換水を精製	—	—
作用水			人工海水, ASTM 規格品	八洲薬品	アクアマリン AB

### (3) 目標とする性能

SKB, フィンランドのポシヴァ社（以下、「POSIVA」という）においては、グラウトの対象亀裂開口幅として 100 $\mu\text{m}$  を超える大きな亀裂と 50~100 $\mu\text{m}$  の小さな亀裂が想定されている。大きな亀裂に対しては低アルカリ性セメントが、小さな亀裂に対しては非セメント系材料の溶液型（コロイダルシリカ）の使用が考えられている<sup>13, 14)</sup>。一方、我が国での地層処分においては、具体的にどの程度までの亀裂開口幅をグラウトで止水すべきか十分な議論がなされていないため、グラウト材料に対する要求性能が確立していないのが現状である。そこで、本研究では海外のグラウト材料における要求性能を参考とすることとした。

POSIVA の R20 プログラムの IMA-project<sup>15)</sup>における要求性能<sup>16)</sup>の一部を表 2.2-2 に示す。性能の分類は本研究において独自に設定した施工性、止水性、低アルカリ性とした。ここに示す要求値は、低アルカリ性セメントの室内試験に関するガイドラインとして示されたものであるため、最適な配合を選定する際の目安として用いた。また、表 2.2-2 に示す性能以外の基礎物性および浸透特性を把握するため、各種試験を実施した。

表 2.2-2 室内試験における材料の要求値

性 能		要求値
施工性	粘度	30 分後 $\leqq 50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$
	降伏値	30 分後 $\leqq 5 \text{ Pa}$
	流下時間	30 分後 $\leqq 45 \text{ s}$
	bmin <sup>*1</sup>	30 分後 $\leqq 80 \mu\text{m}$
止水性	ブリーディング率	2 時間後 $\leqq 2\%$
	せん断強度	6 時間後 $\geqq 500 \text{ Pa}$
	圧縮強度	材齢 28 日 $\geqq 4 \text{ MPa}$
低アルカリ性	pH	$\leqq 11$

\*1 グラウト材料が全く浸透しない最小の鋼製フィルタメッシュ幅

#### (4) 配合選定手順

##### 1) 2007 年度の選定手順

- 2007 年度は、図 2.2-1 に示すフローに従い地層処分に適する 10 配合を選定した。
- ① 使用する粉体材料の物性を把握するため「粒度分布測定」、「活性度指數測定」を実施。
  - ② 超微粒子 OPC を SF, SS, FA のポゾラン材料を 50～80%に置き換えた結合材構成、水結合材比（以下、「W/B」という）（100, 200, 300, 400%の 2～4 段階）、SP 添加率（以下、「SP/B」という）（2～3.5%の 1 段階）をパラメータとする 96 配合を選定。
  - ③ 96 配合に対して、流動性、粘性および材料分離抵抗性を把握するため「漏斗流下試験」、「粘性試験」および「静置ブリーディング試験」を実施。
  - ④ 流動性、粘性、および材料分離抵抗性に優れる 31 配合を選定。
  - ⑤ 31 配合に対して、分離抵抗性および極初期の強度特性を把握するため「加圧ブリーディング試験」、初期強度の「ベーンせん断試験」、「一軸・三軸圧縮強度試験」およびゲル化材を添加した「ゲルタイム調整試験」を実施。
  - ⑥ 分離抵抗性、強度発現性に優れた 10 配合を選定。
  - ⑦ 10 配合に対して、浸透性および低アルカリ性を把握するため「鋼製メッシュ透過試験」、「浸透試験」、「目詰まり試験」、「pH 測定試験」を実施。

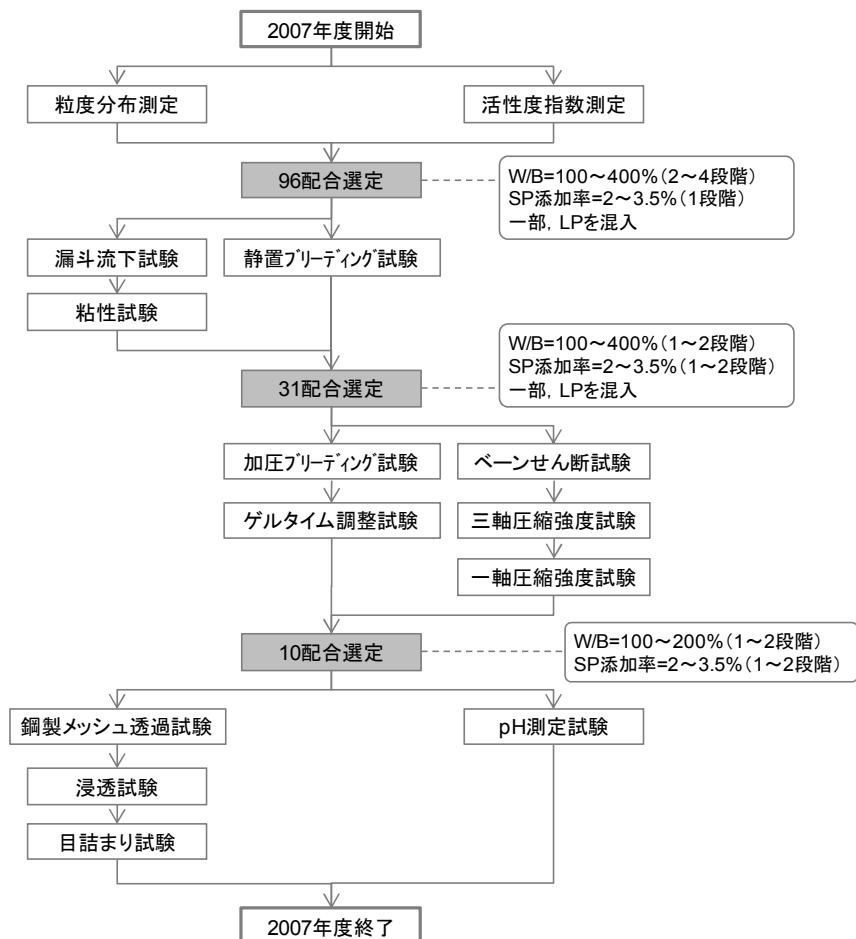


図 2.2-1 配合の選定フロー（2007 年度）

## 2) 2008 年度の選定手順

2008 年度は、前年度に選定された 10 配合をベースに、図 2.2-2 に示すフローに従い原位置への適用において最適と考えられる 1 配合を選定した。

- ① 使用する粉体材料の粒度特性を確認するため「粒度分布測定」を実施。
- ② 結合材構成、W/B (100, 125, 150, 200%の 2~4 段階), SP/B (1~6%の 3 段階) をパラメータとする 63 配合を選定。
- ③ 63 配合に対して、流動性、粘性、材料分離抵抗性および硬化特性を把握するため「漏斗流下試験」、「粘性試験」、「鋼製メッシュ透過試験」、「静置ブリーディング試験」、「凝結試験」、「フォールコーン試験」を実施。
- ④ 流動性、粘性、材料分離抵抗性および硬化特性に優れる 43 配合を選定。
- ⑤ 43 配合に対して、強度特性を把握するため「一軸圧縮強度試験」を実施。
- ⑥ 強度特性に優れる 20 配合を選定。
- ⑦ 20 配合に対して、浸透性、分離抵抗性を把握するため「サンドカラム注入試験」、「加圧ブリーディング試験」を実施。
- ⑧ 浸透性、分離抵抗性に優れる 10 配合を選定。
- ⑨ 10 配合に対して、強度特性を把握するため「付着強度試験」、「可視化平行平板試験」を実施。
- ⑩ 強度特性に優れ、原位置への適用に最適と考えられる 1 配合を選定。
- ⑪ 1 配合に対して、ゲルタイム調整が可能か把握するため「ゲルタイム調整試験」を実施。

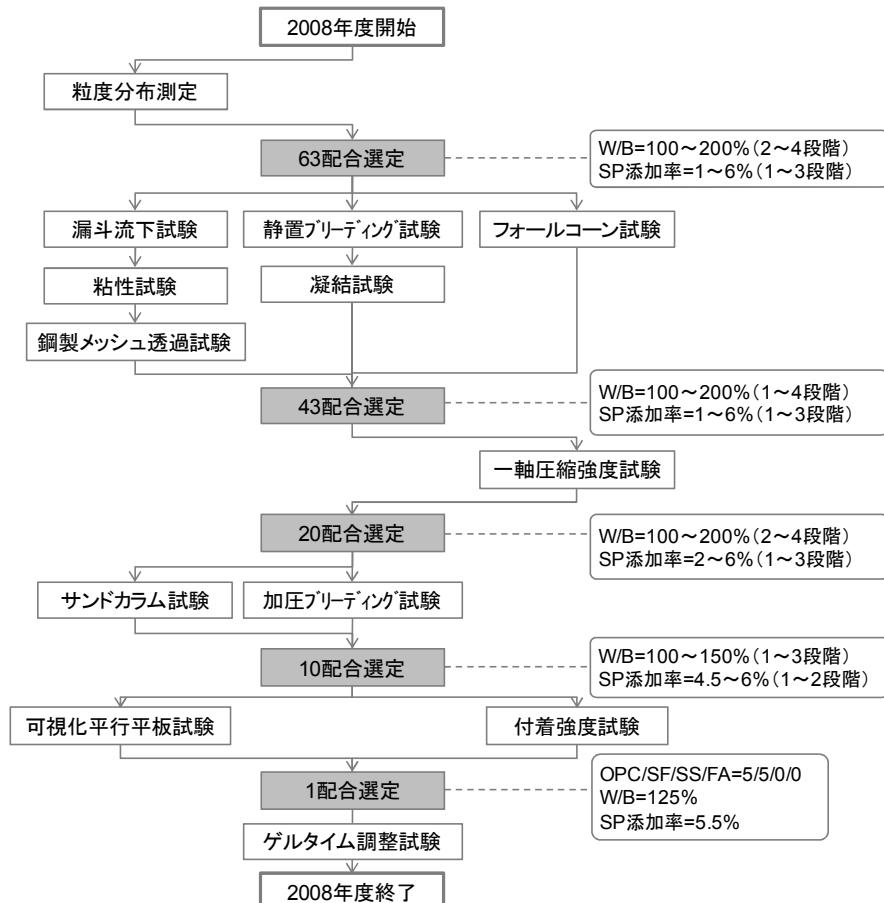


図 2.2-2 配合の選定フロー（2008 年度）

## (5) 試験項目

試験項目一覧を表 2.2-3 に示す。なお、各試験方法の詳細については「2.2.3 試験方法」で述べる。

表 2.2-3 基礎物性試験項目

試験項目	試験方法	条件	実施状況	
			2007年度	2008年度
(1) 基礎物性試験	1)漏斗流下試験	J P漏斗 流下時間	【JSCEF531-1999に準拠】	練上5分後 30分後
		P漏斗 流下時間	【JSCEF521-1999に準拠】	練上5分後 30分後
		ファンネル 流下時間	【JSCEF531-1999に準拠】	練上5分後 30分後 1時間後
	2)粘性試験	降伏値	レオメータ法	練上5分後 30分後
		塑性粘度	レオメータ法	練上5分後 30分後
		最小透過 メッシュ幅	海外の浸透性能試験を参考	30分後
		グラウト 注入量	アクリル製透明モールド、内径50mm、長さ500mm 加圧力0.1MPa	30秒間浸透量
	5)ゲルタイム調整試験	ゲルタイム	主液と硬化剤を入れたビーカーを交互に流し込み、ゲル化する時間を測定	A液のみ 凝結時間
				A液+B液 最短時間
				A液+B液 最長時間
				2時間後 3時間後 1日後
	6)静置ブリーディング試験	ブリーディング率	【JSCEF532-1999に準拠】	1MPa 2MPa 3.5MPa 5MPa
				2MPa 5分間
				2MPa 最終
				— — ○ ○
	7)加圧ブリーディング試験	加圧脱水量	JSCEF502-2007を参考 (加圧は順次昇圧し、昇圧後5分間の脱水量を測定)	1MPa 2MPa 3.5MPa 5MPa
				2MPa 5分間 2MPa 最終
	8)凝結試験	始発時間 終結時間	【JISA5201-1997に準拠】	— —
				— —
	9)ペーンせん断試験	ペーンせん断 強度	凝結程度に合せ羽根とトルクメータを選定 回転トルクを与える反応トルクを測定	6時間後 8時間後 12時間後 1日後 1.5日後
				○ ○ ○ ○ ○
				— — — — —
				— — — — —
				— — — — —
	10)フォールコン試験	せん断強度	【JGS T142-2000に準拠】	6時間後
	11)三軸圧縮強度試験	粘着力	【JGS0521に準拠】	7日後
		内部摩擦角		7日後
	12)一軸圧縮強度試験	一軸圧縮強度	【JSCE-G505-1999に準拠】	28日後
	13)付着試験	付着強度	直接引張強度試験	28日後
		グラウト圧縮強度比		28日後
	14)pH測定試験	微粉浸漬液のpH	供試体を50°Cの温水中で14日間養生後、粉碎した試料を液固比5:1で浸漬 72時間の浸透攪拌後、ガラス電極pHメータで測定	20°C養生 付換水
				○ —
				20°C養生 人工海水
				○ —
				50°C養生 付換水
				○ —
				50°C養生 人工海水
(2) 浸透性能試験	1)浸透試験	流出速度	アクリル板+ステンレス板(平行平板モデル)、およびアクリル板+花崗岩(凹凸亀裂モデル)の2種類を使用 亀裂幅を50~200 μm、最大圧力1.0MPa (詳細は「2.2.3(2)」参照)	— —
		充填重量		○ —
	2)目詰まり試験	最大圧力5.0MPa、他上記「浸透試験」と同様	— —	○ —
	3)可視化平行平板試験	累積注入量	可視化平行平板試験装置を使用 亀裂幅を20, 50, 100 μm、注入圧力0.1, 1.0, 2.0MPa (詳細は「2.2.3(2)」参照)	— —
		間隙圧		○ —

## 2.2.2 試験材料

### (1) 材料物性

#### 1) 粒度分布測定

##### a. 測定方法

グラウト材料の基礎物性試験に先立ち、使用する粉体材料の粒度分布を測定した。測定手法はレーザー回析法とし、使用機器はセイシン企業社製の粒度分布測定装置 LMS-350（計測範囲：0.1～500μm、半導体レーザー：波長 670nm、最大出力 2mW）とした。

微粉末材料計測時の分散性を高めるために、分散媒としてヘキサメタリん酸ナトリウム 0.1%蒸留水溶液を併用し、スターラーによる攪拌希釀、超音波（40W, 40kHz）による補助振動により分散力を作用させた。

##### b. 測定結果

粉体材料の粒度分布測定結果の一例を図 2.2-3 にそれぞれ示す。

平均粒径は SF が最も細かく、SS, FA の順に大きくなり、超微粒子 OPC が最も粗くなった。最大粒径は SS が最も細かく、次いで SF, FA, 超微粒子 OPC の順となった。粒度分布形状は SF が比較的ブロードであるのに対し、他の粉体材料は比較的シャープであった。

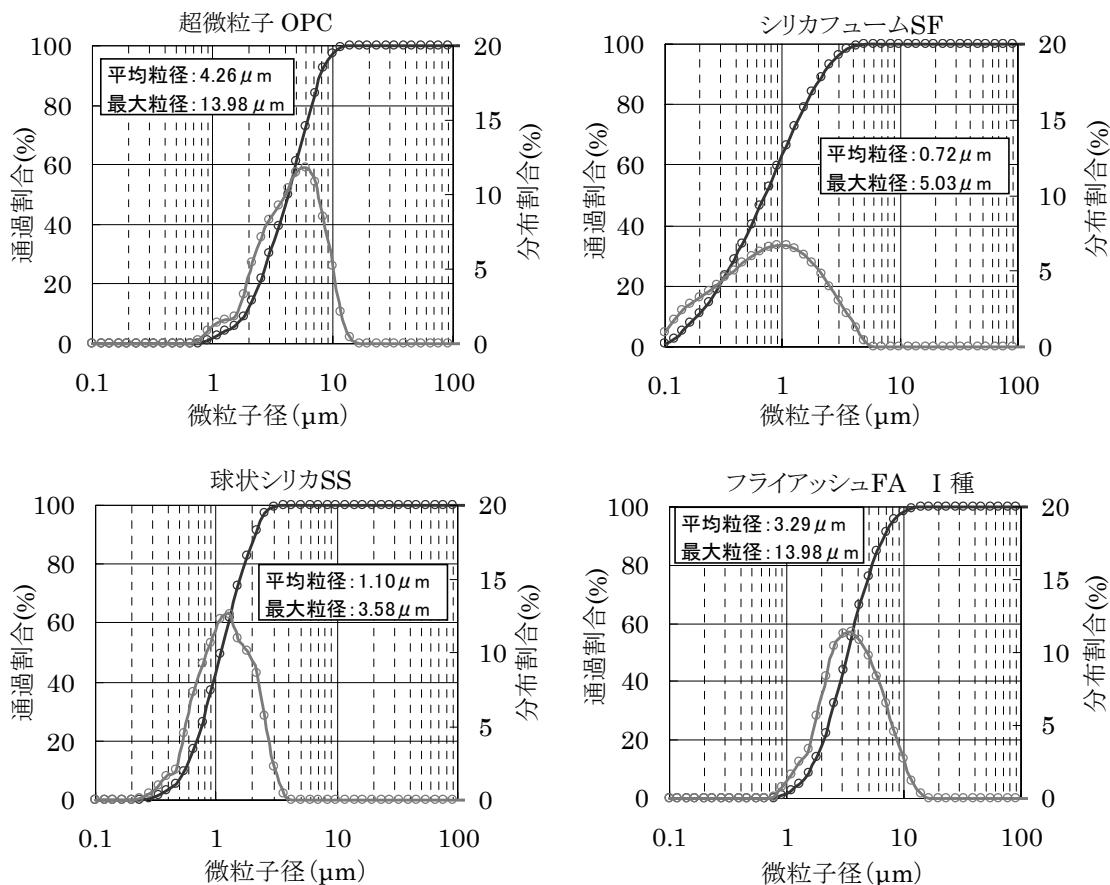


図 2.2-3 粉体材料の粒度分布計測の一例(2008 年度)

## 2) 活性度指数測定(2007 年度実施分)

### a. 測定方法

グラウト材料の基礎物性試験に先立ち、使用するポゾラン材料および比較対象とするためベースセメントである超微粒子 OPC の活性度指数を測定した。測定方法は、JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）（「付属書 2」参照）、JIS A 6207（コンクリート用シリカフューム）（「付属書 4」参照）に従った。

強度試験の材齢は 7 日と 28 日とした。混和材置換率は JIS に従って SF, SS (成分的に SF と同等と判断) で 10%, FA で 25% とした。JIS では混和剤を使用しない W/B=50% の配合とするが、超微粒子 OPC を用いた配合では流動性が著しく低下し、フロー試験や供試体の作製が困難であったため、W/B を 60%, SP/B=2% に修正した。

### b. 測定結果

活性度指数の測定結果を図 2.2-4 に示す。

活性度指数は SS と SF が同等の値を示し、良好なポゾラン反応性を有していることが確認された。SF (1週, 4週) と FA (4週, 13週) の値が JIS 規格を満足していないことは、W/B の変更や SP の添加が影響したと推察される。

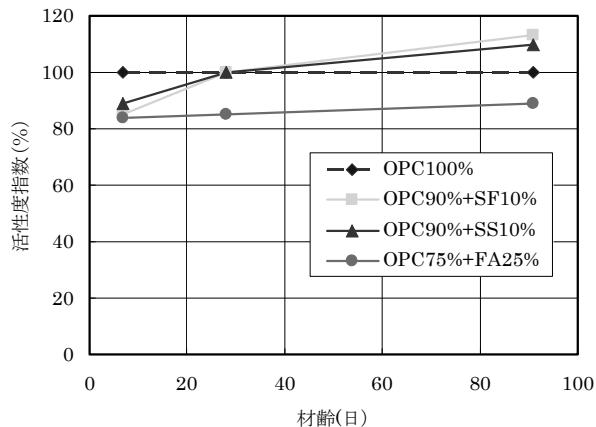


図 2.2-4 活性度指数の測定結果

## (2) 練混ぜ方法

2007 年度の練混ぜは、現場での施工を想定し、通常のパドル型のグラウトミキサにより行った。1 バッチの練り量は、試験に必要な量や、均質な練混ぜが可能となる最少量から 50L と定め、混練時間は 2 分間に設定した。

2008 年度の練混ぜは、2007 年の練混ぜで SF の凝集の可能性が考えられたため、以下のように変更した。

### 1) 練混ぜ機械の回転数改造

練混ぜ効率が高く、均質なグラウト材料が製造できる Hany 社製コロイダルミキサーHCM (High shear Colloidal Mixer) と同等の性能を有するように、東陽商事社製コロイダルミキサーTKM-220

(練混ぜ容量 200L, 50HZ で 1500rpm) の標準仕様をインバーターにより 70HZ で 2100rpm に改造した。

## 2) シリカフュームのスラリー化

SF は超微粒子であることから凝集しやすいため、十分に分散するようにならかじめイオン交換水で SF スラリーとして作製した。

配合は、海外のグラウトエイドの水粉体比にならい 100%とし、SF の分散、攪拌効率向上のため SP/B=0.2%以上とした。

## 3) 練混ぜ手順

練混ぜ手順を以下のとおりとしたため、SF の分散が良くなり、SP 添加量が増加した。

- ① SF スラリーの作成。
- ② SF スラリーに残りの練混ぜ水としてイオン交換水と SP を添加し、1500rpm で 20 秒攪拌。
- ③ 攪拌後、2000rpm の高速回転に変え、超微粒子 OPC を少量ずつ投入。
- ④ 超微粒子 OPC の投入後、SS や FA などのポゾラン材料を少量ずつ投入し、2 分間攪拌。

### (3) 試験配合

2007 年度<sup>11)</sup>の試験配合は、表 2.2-4 に示すように超微粒子セメントとポゾラン材料として二成分系、三成分系および四成分系の 96 配合とした。

2008 年度<sup>12)</sup>の試験配合は、表 2.2-5 に示すように、W/B を 2 段階 (100%, 150%) から 4 段階 (100%, 125%, 150%, 200%) に、結合材重量に対する SP/B をそれぞれ 3 段階 (1~6%) に変化させた 63 配合とした。

試験材料は、ポゾラン反応により低アルカリ性にするために、既往の検討<sup>8)</sup>を参考にセメント系材料に OPC、ポゾラン材料に SF、FA を用い、ポゾラン材料の置換率を 50%~80%とした。

セメント系材料は、微細な亀裂にグラウト材料を浸透させるため、低アルカリ型セメントを微粒子化した。ポゾラン材料は、SF と FA に加えてその中間粒径の SS を採用するとともに、ブリーディング低減のためにフィラー材料として石灰石微粉末(以下、「LP」という)を追加した。また、SP は、構成材料に微粒子のものが多く、練混ぜ時の凝集や早期のゲル化が懸念されたため、高性能 AE 減水剤を使用した。

なお、結合材構成比は、OPC/SF/SS/FA の順に示し、結合材合計重量を 10 とした場合、例えば 4/5/1/0 のように記述する。ただし、ここでの OPC は超微粒子 OPC を意味する。

表 2.2-4 2007 年度の基礎物性試験の配合一覧

	結合材構成比 <sup>*2,3</sup>				SP/B (%)				配合数	備考		
	超微粒子 OPC	SF	SS	FA	W/B <sup>*2</sup> (%)							
					100	200	300 <sup>*1</sup>	400 <sup>*1</sup>				
一成分系	10	0	0	0	1.0	1.0	—	—	6	微粒化前		
	10	0	0	0	2.0	2.0	2.0	1.0		比較用		
二成分系	5	5	0	0	4.0	2.0	2.0	2.0	8			
	5	0	5	0	2.0	2.0	—	—				
	5	0	0	5	2.0	2.0	—	—				
三成分系	4	5	1	0	3.0	2.0	3.0	3.0	68			
	4	4	2	0	2.5	2.0	—	—				
	4	3	3	0	2.5	2.0	—	—				
	4	2	4	0	2.5	2.0	—	—				
	4	5	0	1	4.0	2.0	3.0	3.0				
	4	4	0	2	3.0	2.0	—	—				
	4	3	0	3	3.0	2.0	—	—				
	4	2	0	4	2.5	2.0	—	—				
	3	6	1	0	3.5	2.0	3.0	3.0				
	3	5	2	0	3.0	2.0	3.0	3.0				
	3	4	3	0	2.5	2.0	—	—				
	3	3	4	0	3.0	2.0	—	—				
	3	2	5	0	2.0	2.0	—	—				
	3	6	0	1	5.0	2.0	3.0	3.0				
	3	5	0	2	3.0	2.5	3.0	3.0				
	3	4	0	3	3.0	3.0	—	—				
	3	3	0	4	3.0	3.0	—	—				
	3	2	0	5	2.0	2.0	—	—				
	2	5	3	0	3.0	2.5	3.0	3.0				
	2	4	4	0	2.5	2.5	—	—				
	2	3	5	0	3.0	2.5	—	—				
	2	2	6	0	2.5	2.5	—	—				
	2	5	0	3	4.0	3.0	3.0	3.0				
	2	4	0	4	3.0	3.0	—	—				
	2	3	0	5	2.0	2.5	—	—				
	2	2	0	6	2.5	2.0	—	—				
四成分系	4	4	1	1	2.5	2.5	—	—	14			
	3	4	2	1	2.5	2.5	—	—				
	3	4	1.5	1.5	2.5	2.5	—	—				
	3	4	1	2	2.5	2.5	—	—				
	2	4	3	1	2.5	2.0	—	—				
	2	4	2	2	2.5	2.0	—	—				
	2	4	1	3	2.0	2.0	—	—				
合計								96				

\*1 : SF が 50%以上かつ W/B が 300%以上の配合は、ブリーディングの抑制のため、LP を混入。混入率は W/B が 300%, 400%に対して、それぞれ水粉体比 (W/LP) を 133%, 150%とした。

\*2 : 結合材 B は超微粒子 OPC, SF, SS, FA の合計, W/B は水と結合材の重量比 (%) を示す。

\*3 : 以降、例えば、ポゾラン材料のうち SS が多い三成分系の配合を SS 三成分系と示す。

表 2.2-5 2008 年度の基礎物性試験の配合一覧

	結合材構成比				SP/B (%)				配合数	
	超微粒子 OPC	SF	SS	FA	W/B (%)					
					100	125	150	200		
一成分系	10	0	0	0	3.0	—	2.0	—	6	
					4.0	—	3.0	—		
					5.0	—	4.0	—		
二成分系	5	5	0	0	4.5	4.5	3.0	2.5	12	
					5.5	5.0	4.0	3.0		
					6.0	5.5	4.5	3.5		
三成分系	4	5	1	0	5.0	4.0	3.0	2.0	45	
					5.5	5.0	4.0	2.5		
					6.0	5.5	4.5	3.0		
	4	4	0	2	3.5	—	1.5	1.0		
					4.0	—	3.0	2.0		
					4.5	—	4.0	3.0		
	4	2	0	4	2.5	—	1.0	—		
					3.0	—	1.5	—		
					3.5	—	2.0	—		
	3	6	1	0	5.0	—	3.0	—		
					5.5	—	4.0	—		
					6.0	—	5.0	—		
	3	6	0	1	5.0	—	3.5	—		
					5.5	—	4.0	—		
					6.0	—	5.0	—		
	2	5	3	0	4.5	—	3.0	—		
					5.0	—	4.0	—		
					5.5	—	5.0	—		
合計									63	

### 2.2.3 試験方法

#### (1) 基礎特性試験

##### 1) 漏斗流下試験

###### a. JP 漏斗流下試験（2007 年度実施分）

土木学会規準 JSCE F531 に従って JP 漏斗流下試験を実施した。JP 漏斗の流下時間の計測は、練り上り直後（5 分後）および 30 分後とした。

###### b. ファンネル流下試験

土木学会規準 JSCE F531 に従ってファンネル流下試験を実施した。ファンネル粘度計は写真 2.2-1 に示すように、吐出口径  $\phi 4.8\text{mm}$ 、容量  $500\text{cm}^3$  である。ファンネル粘度計の流下時間の計測は、練り上り直後（5 分後）、30 分後および 60 分後とした。

今回の配合は W/B が 100~400%と比較的低粘性のため、吐出口径が  $\phi 14\text{mm}$  と大きい JP 漏斗流下試験では流下時間が 2~3 秒程度と非常に短い範囲に收まり、配合間の定量的な比較が難しくなると判断された。そこで、吐出口が小さく計測時間が長くなる「ファンネル粘度計」による計測も実施した。



写真 2.2-1 ファンネル粘度計

### c. P漏斗流下試験（2008 年度実施分）

土木学会規準 JSCE F521 に従って P 漏斗流下試験を実施した。P 漏斗は写真 2.2-2 に示すように、吐出口の直径 13.0mm、容量 1725cc である。

今回の配合は粘性が高いため、ファンネル漏斗流下試験が不可能となる可能性が想定された。そこで、粘度が高い場合でも測定が可能な P 漏斗による計測も実施した。



写真 2.2-2 P漏斗流下試験

## 2) 粘性試験

レオメータ法（使用機器：ブルックフィールド製の LVDV-1+、少量サンプルアダプター）により、塑性粘度 (mPa·s) および降伏値 (Pa) を計測した。

## 3) 鋼製メッシュ透過試験

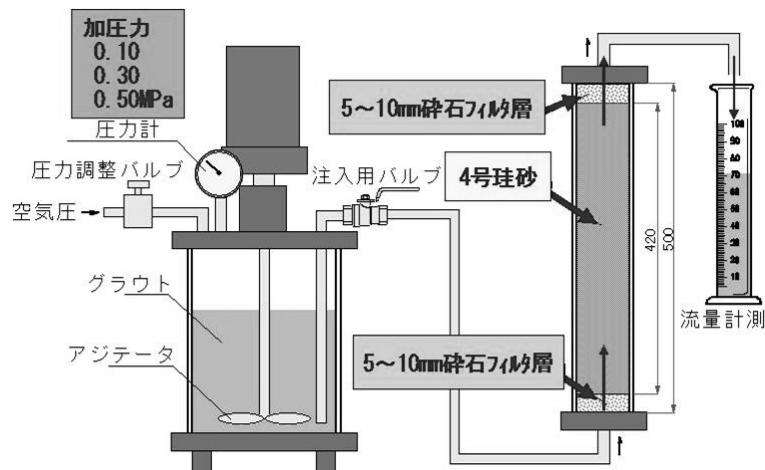
鋼製メッシュ透過試験装置（メッシュサイズ：63, 75, 90, 106, 125μm）を用いて透過量を計測した。試験装置は写真 2.2-3 に示す通りである。ペネトラビリティーメーターやフィルターポンプは海外での事例<sup>17)</sup>を参考にした。試験における圧力は 0.1MPa とした。



写真 2.2-3 鋼製メッシュ透過試験装置

## 4) サンドカラム試験

サンドカラム装置を用いて浸透量のデータを参考値として取得した。試験装置の構成と概要は、吉田ら<sup>18)</sup>を参考に、図 2.2-5 および写真 2.2-4 に示すように、内径 50mm、外径 65mm、長さ 500mm とした。透明なアクリル製モールド内に、図 2.2-6 に示すように Posiva 社の文献<sup>15)</sup>とほぼ同じ粒度分布を有する 4 号珪砂を充填し、上下フィルターに 5~10mm 粒径の碎石を 35mm 厚に敷いて、グラウト材料を 0.1MPa の定圧で下部から注入した。なお、途中で閉塞した場合は、0.1→0.3→0.5MPa に順次圧力を変化させて影響を確認した。

図 2.2-5 サンドカラム試験装置の概要<sup>8)</sup>

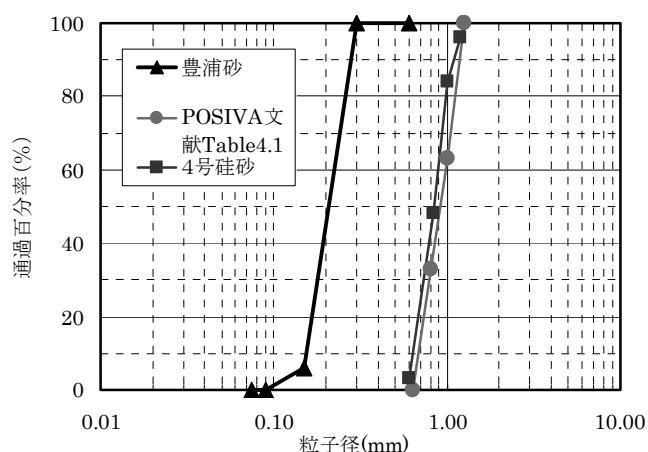
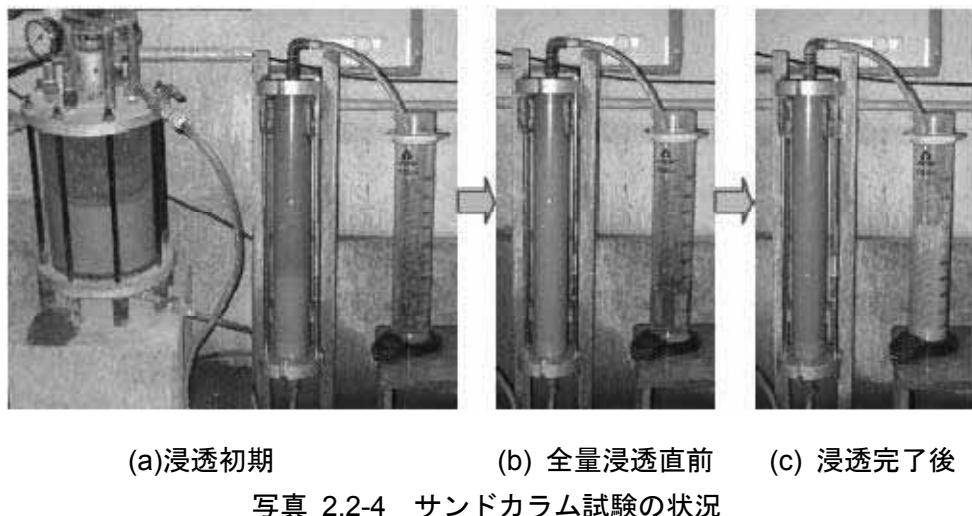


図 2.2-6 サンドカラム試験に使用した砂の粒度分布

### 5) ゲルタイム調整試験

ビーカー流し込み法により、目視で流動性が急激に失われるまでのゲルタイムを計測した。試験は、急硬剤にアロフィックス SS（太平洋マテリアル製）、ゲルタイム調整剤に炭酸塩（太平洋マテリアル製）を用い、ゲルタイム調整剤の量をパラメータとして実施した。温度条件は 20°C で一定とした。なお、予備試験の結果、急硬剤の量はグラウト容積の 1/5 とした。

### 6) 静置ブリーディング試験

土木学会規準 JSCE F532 に従ってブリーディング試験を実施した。静置ブリーディング率の計測は、練混ぜ後 2 時間と 24 時間とした。

### 7) 加圧ブリーディング試験

土木学会規準 JSCE F532 に従って加圧ブリーディング試験を実施した。ブリーディング率の計測は練混ぜ直後とした。

この方法は、粗骨材の最大寸法が 80mm 以下の通常のフレッシュコンクリートの規準であり、

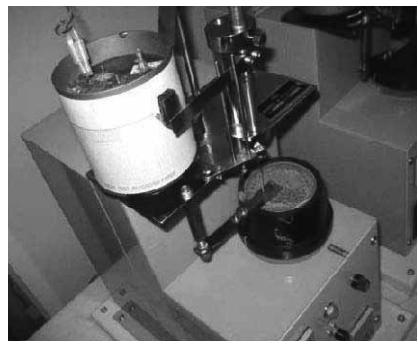
微細粒子で構成されるグラウト材料の加圧ブリーディング率の計測には適していない。そこで、写真 2.2-3 に示す鋼製メッシュ透過試験装置を用い、容器内部にろ過材（ポーラストーン）およびろ紙（No.5-B, 厚さ 0.21mm, 粒子保持機能 8μm）を設置し、ブリーディング水量（加圧力 2MPa）を正確に採取できるよう調整した。

### 8) 凝結試験

日本工業規格 JIS R 5201 に従って凝結試験を実施した。装置は写真 2.2-5 に示すように、手動および自動のものとした。自動凝結試験装置は、主に凝結が 12 時間以上の長時間を要する場合の計測に用いた。



(a) 手動凝結試験装置



(b) 自動凝結試験装置

写真 2.2-5 凝結試験装置

### 9) ベーンせん断試験

凝結の程度に合せて羽根とトルクメーターを適宜選定し、回転トルクを与えてその抵抗（反力トルク）を計測した。山本ら<sup>19)</sup>によると、6 時間と 8 時間でのせん断強度の推奨値が示されていることから、この付近（6 時間～12 時間程度）で適宜計測を実施した。

### 10) フォールコーン試験

地盤工学会規準 JGS T142 に従ってフォールコーン試験を実施した。計測は、練混ぜ後 6 時間とした。試験装置は写真 2.2-6 に示す通りである。貫入深さからせん断強度を算定する換算表として文献 GLO-85<sup>20)</sup>を参考としたが、換算表には 8.73kPa（貫入深さ 4.0mm）から 0.98kPa（同 13.0mm）までしか記述がない。そこで、それ以下の 0.5kPa を判定するため、指標近似計算によりその貫入深さ 18.4mm を推定した。

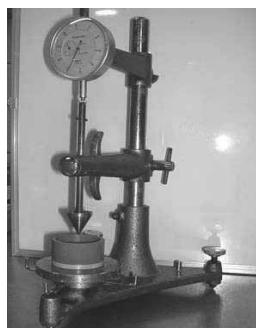


写真 2.2-6 フォールコーン試験状況

### 11) 三軸圧縮強度試験

地盤工学会規準 JGS0521 に従って三軸圧縮試験を実施した。円柱供試体は  $\phi 50 \times 100\text{mm}$  のモールドとした。材齢 1 日まで  $20^{\circ}\text{C}$  の室温で乾かないように封緘養生した。材齢 1 日以降は、早期の脱枠が難しい低強度の配合に養生条件を合せるために、型枠に入れたまま  $20^{\circ}\text{C}$  RH90%の条件で湿空養生した。

### 12) 一軸圧縮強度試験

土木学会規準 JSCE G505 に従って一軸圧縮強度試験を実施した。円柱供試体は  $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$  のモールドとした。材齢 1 日まで  $20^{\circ}\text{C}$  の恒温室で養生後、材齢 28 日まで標準水中養生を行った。

### 13) 付着強度試験

建研式接着力試験装置を用いて直接引張試験を実施した。供試体の作成には、岩盤コアを厚さ 3cm 程度に切断し 2 枚の円盤状岩盤を作成した後、それらを再度重ね合わせることで、幅 5mm 程度の亀裂を模擬した間隙を作製した。その間隙を湿潤状態にしグラウト材料を注入充填後、標準養生を 28 日間行った。なお、岩盤コアには幌延深地層研究センター地下研究施設である換気立坑の先行ボーリングコア ( $\phi 50\text{mm}$ , 深度 238~255m) を用いた。

### 14) pH 測定試験

硬化したグラウト材料の供試体を  $20^{\circ}\text{C}$  あるいは  $50^{\circ}\text{C}$  の温水中で 14 日間養生し測定を行った。養生後乾燥し、おおむね  $75\mu\text{m}$  以下の粒径に粉碎した試料を  $20^{\circ}\text{C}$  のイオン交換水中に液固比 5 : 1 となるように浸漬した。その後、72 時間の振とう・攪拌後、浸漬液の pH をガラス電極 pH メータにより測定した。

## (2) 浸透特性試験

### 1) 浸透試験

本試験は、グラウト材料の亀裂浸透性能を評価するために実施した。試験装置は、浸透状況が視覚的に確認できるように上面をアクリル板とした。下面是、アクリル板+ステンレス板（平行平板モデル）のものとアクリル板+花崗岩（凹凸亀裂モデル）の 2 種類を用意した。試験装置を図 2.2-7 に示す。

模擬する亀裂開口幅は、上面と下面の間にスペーサーを設置することによって、 $50, 100, 200\mu\text{m}$  に調整した。なお、亀裂開口幅分布を一様とするため、グラウト材料の注入前に透水試験（放射流型）を行い、理論流量になるようスペーサーで開口幅を調整した。

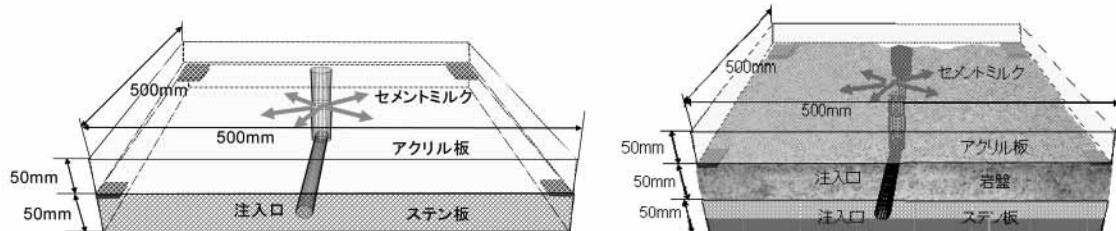


図 2.2-7 亀裂を模擬した浸透性能試験装置（左：アクリル板+鉄板、右：アクリル板+花崗岩）

グラウト注入は、グラウト注入ポンプを用いて循環方式で行なった。注入量はグラウトポンプ回転数 (Hz) で管理し、注入圧力は最大 1.0MPa とした。試験装置は、注入圧に対して亀裂開口幅を保持する目的で、アクリル板を鋼製フレームで支持する構造とした。浸透性能試験状況を写真 2.2-7 に示す。

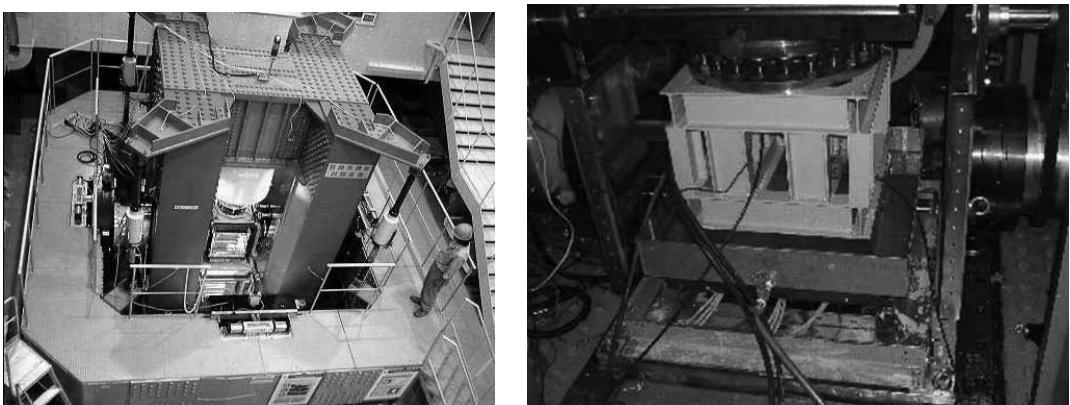


写真 2.2-7 漫透性能試験状況 (左 : 全体, 右 : 鋼製フレーム)

## 2) 目詰まり試験

本試験は、グラウト材料の高圧注入時の目詰まり特性を評価するために実施した。注入圧は最大 5MPa とした、そのほかの試験条件は「1) 浸透試験」と同様とした。

## 3) 可視化平行平板試験

### a. 試験概要

低アルカリ性セメントの亀裂開口幅や注入圧の違いによる総合的な施工性、高圧注入における材料分離抵抗性などの止水性を評価するため、基礎特性試験により選定された 10 配合（表 2.2-6 参照）を用いて可視化平行平板試験を実施した。

表 2.2-6 可視化平行平板試験の配合

配合 No.	結合材構成比				W/B (%)	SP/B (%)
	超微粒子 OPC	SF	SS	FA		
1	5	5	0	0	100	6.0
2	5	5	0	0	125	5.5
3	5	5	0	0	150	4.5
4	4	5	1	0	100	6.0
5	4	5	1	0	125	5.5
6	4	5	1	0	150	4.5
7	4	4	0	2	100	4.5
8	4	4	0	2	150	4.0
9	3	6	0	1	100	6.0
10	3	6	1	0	100	6.0

試験装置は、浸透状況が視覚的に確認できるように上面をアクリル板 ( $\phi 2m$ , 厚さ 50mm) とした。下面是、SS 鋼板 ( $\phi 2m$ , 厚さ 60mm) とした。可視化平行平板試験装置を図 2.2-8 に示す。

模擬する亀裂開口幅は、上面と下面の間にスペーサーを設置することによって、20, 50, 100 $\mu m$

に調整した。なお、亀裂開口幅分布を一様とするため、グラウト材料の注入前に透水試験（放射流型）を行い、理論流量になるようボルトの締めにより調整した。

グラウト注入は、中心部から一定の昇圧速度で載荷・注入し、最大注入圧がそれぞれ 0.1, 1.0, 2.0 MPa に達した時点で定圧注入とした。その後、流量が 0、または定常流出になった時点で注入を終了とした。試験装置は、注入圧に対して亀裂開口幅を保持する目的で、鋼製フレームを上面に設置し、ボルトで下面に固定した。また、グラウト注入中の亀裂内圧力分布の経時変化を計測するため、圧力計を中心より 90° 間隔に、中心からの距離が 0.1m, 0.4m, 0.8m となるよう配置した。スペーサーおよび圧力計の配置図を図 2.2-9 に示す。可視化平行平板試験装置組立状況を写真 2.2-8 に示す。

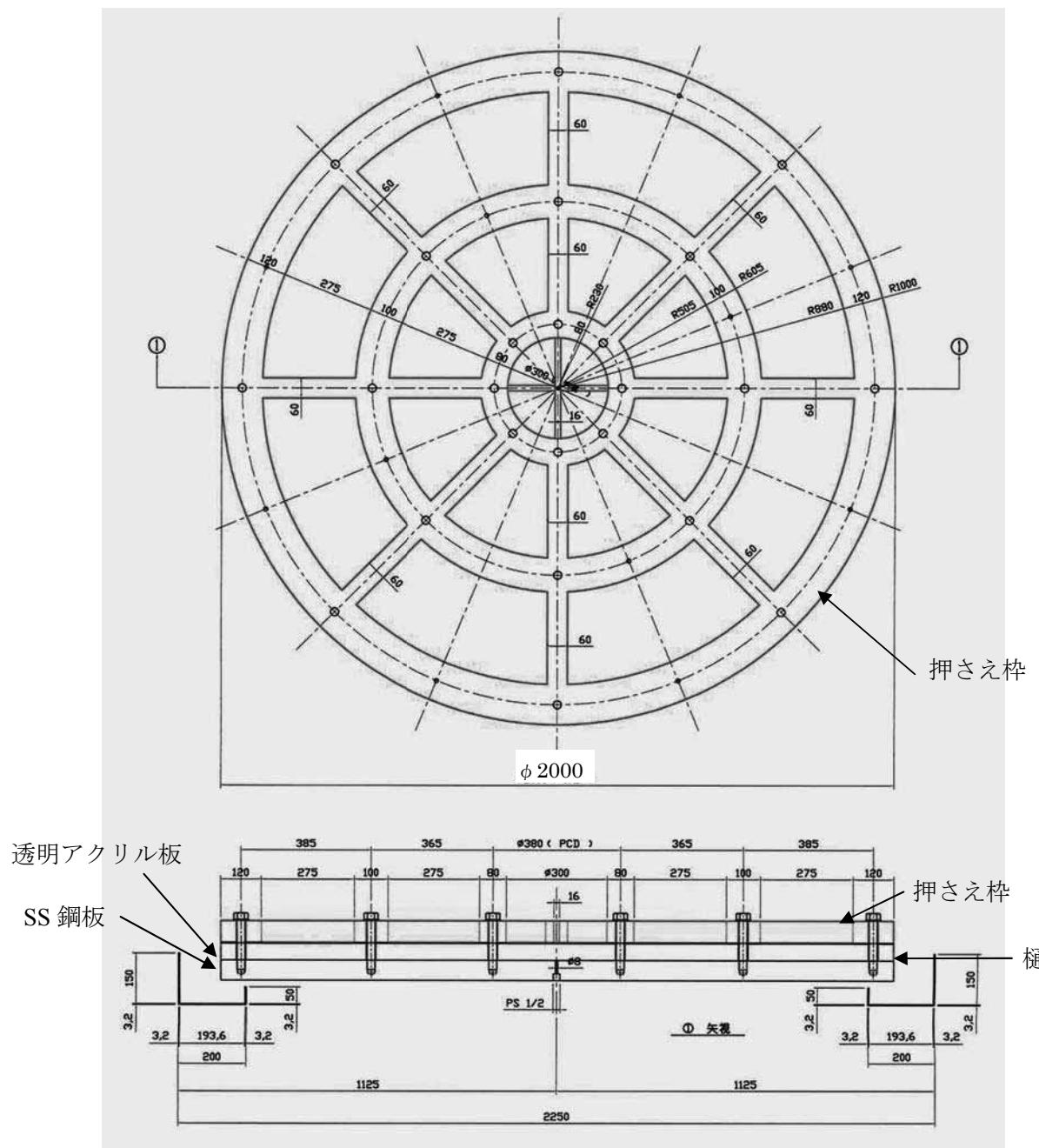


図 2.2-8 可視化平行平板試験装置

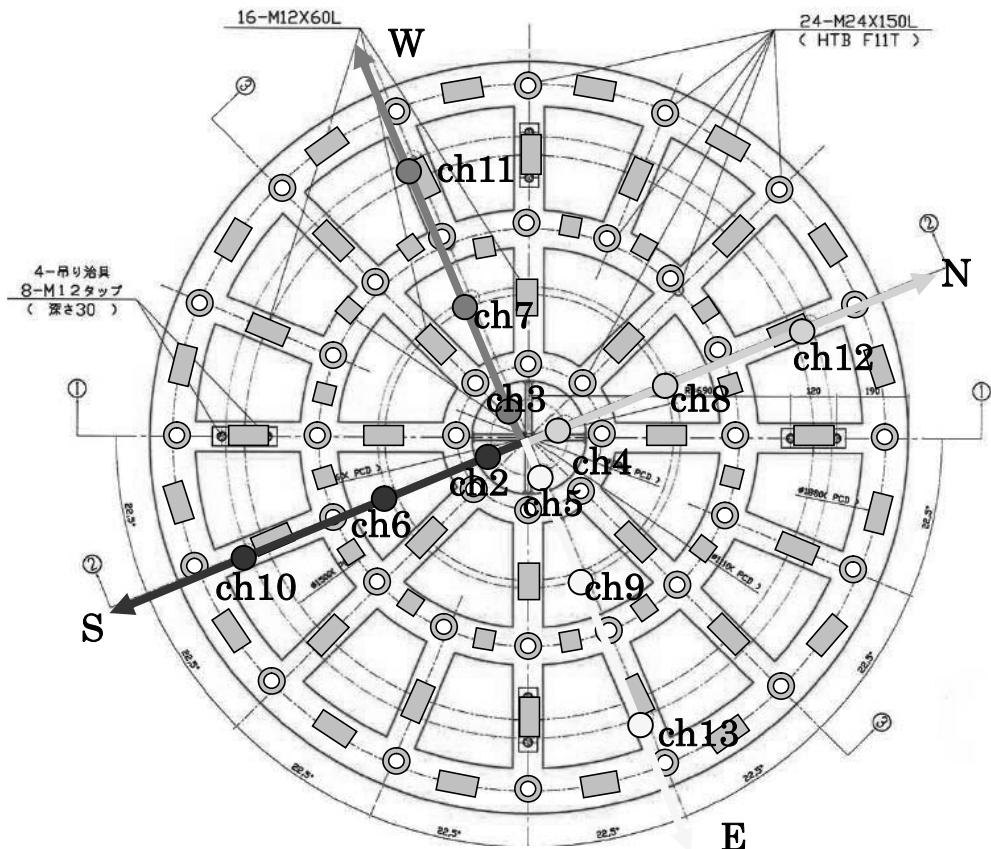


図 2.2-9 スペーサーおよび圧力計設置位置

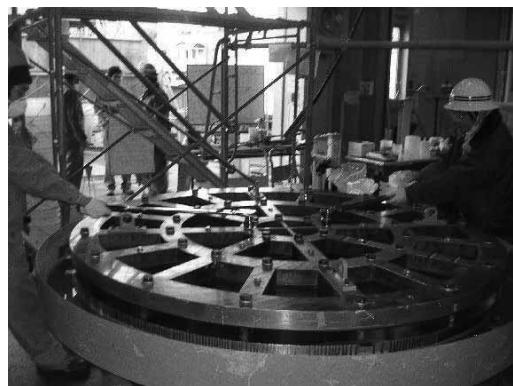


写真 2.2-8 可視化平行平板試験装置組立状況

試験数量は、10 配合×亀裂開口幅 3 ケース（20, 50, 100 $\mu\text{m}$ ）×最大注入圧 3 ケース（0.1, 1.0, 2.0 MPa）で全 90 ケースとした。

#### b. 使用器具

##### i. スペーサー, 圧力計

スペーサーとして、シムプレート（厚さ 20, 50, 100 $\mu\text{m}$ ）を利用した（写真 2.2-9）。シムプレ

ートは、ボルト位置に外径 50mm、内径 40mm のドーナツ型を 40 枚、押さえ枠の中間点に 100×50mm の四角型を 40 枚、その他の調整のため 50mm×50mm の四角型を 16 枚配置した。圧力計の設置状況は写真 2.2-10 に示す。

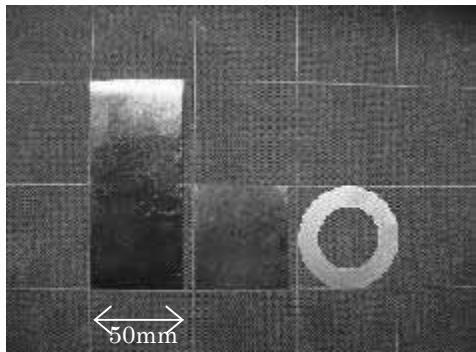


写真 2.2-9 スペーサー



写真 2.2-10 圧力計設置状況

### iii. ボルト、止水ワッシャー、O リング

上面、下面是、SS 鋼板からの切り出した抑え枠とボルトで固定する。上面の貫通位置には O リングを 2 個配置し、ワッシャーには止水ワッシャーを用いボルト孔からの漏水を防止した。ボルト、止水ワッシャー、O リングを写真 2.2-11 に示す。



写真 2.2-11 ボルト、止水ワッシャー、O リング

### iii. CCD カメラ

グラウト材料の注入状況が観察できるよう可視化平行平板装置の周囲に仮設足場を組み、その上部に CCD カメラを設置した。CCD カメラの設置状況を写真 2.2-12 に示す。

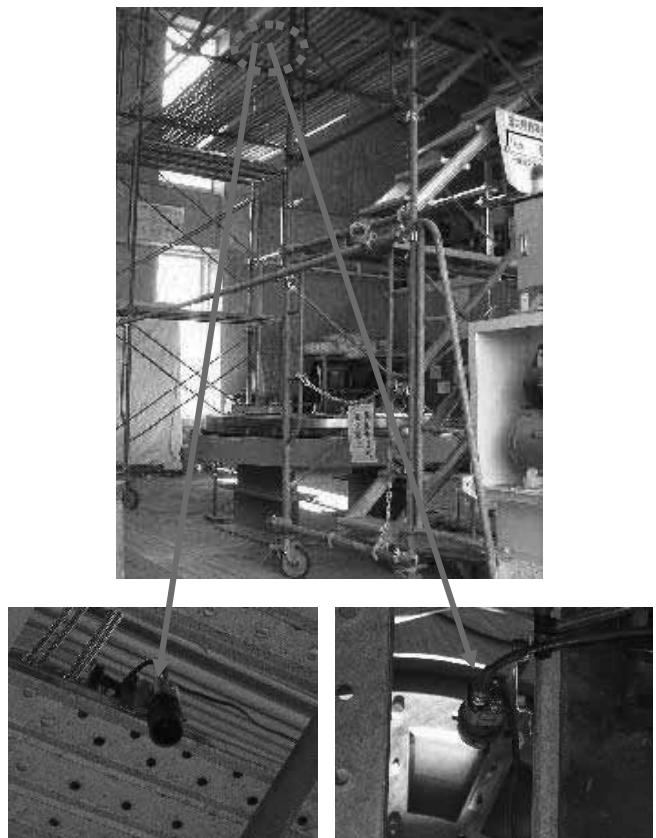


写真 2.2-12 CCD カメラ設置状況（左：下より，右：上より）

#### iv. 注入装置

注入装置として、写真 2.2-13～写真 2.2-16 に示すコロイダルミキサー、タンク、流量圧力制御装置、計測装置を利用した。



写真 2.2-13 コロイダルミキサー



写真 2.2-14 タンク



写真 2.2-15 流量圧力制御装置



写真 2.2-16 計測装置

### c. 試験手順

#### i. 組み立て

組み立ての手順は以下に示す通りである。装置の組み立て状況を写真 2.2-17 に示す。

- ・ 上面をクレーンで吊り上げ、落下防止用の支柱を組立。
- ・ 所定の厚さのスペーサーを配置。
- ・ 支柱を外し、上面を下面まで降ろし、ボルトで固定。
- ・ 所定の圧力で注入を行い、理論流量になるようボルト締めにより開口幅を調整。ボルト締め付けにはトルク調整レンチを使用。
- ・ 周辺の開口幅をフィラーチージまたは所定厚さのスペーサーにより確認。
- ・ 空気を送り、隙間内の水を排除。

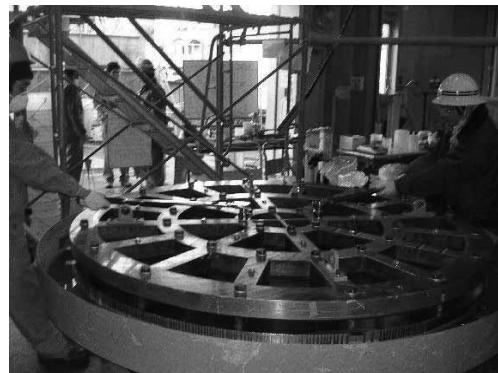


写真 2.2-17 組み立て状況（左：シムプレート設置状況、右：ボルト締め状況）

#### ii. グラウト注入

注入の手順は以下に示す通りである。グラウト注入の状況を写真 2.2-18 に示す。

- ・ 練混ぜ後、タンクにグラウト材料を送り注入を開始。
- ・ 間隙水圧測定、ビデオ撮影も同時に開始。
- ・ 所定の圧力になった時点で注入圧力を保持。
- ・ 流量が 0 または定常流出になった時点で注入を終了。
- ・ グラウト材料が平行平板外に流出した場合は、その単位体積重量を測定。

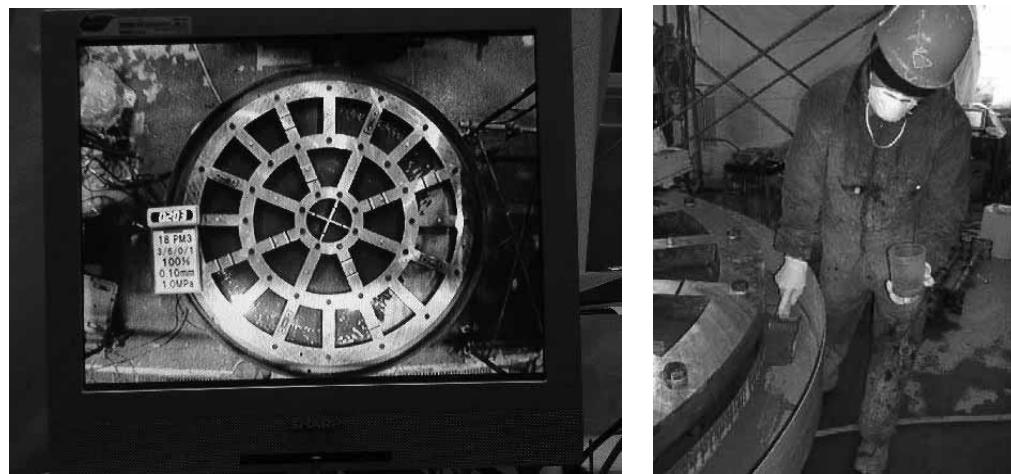


写真 2.2-18 注入状況（左：ビデオ撮影、右：グラウト採取状況）

#### iii. 解体

試験装置の解体手順は以下に示す通りである。

- ・ ボルトの解除。
- ・ 上面をクレーンにて吊り上げ、落下防止用の支柱を組立。
- ・ 上面と下面のグラウト材料の拭き取り。
- ・ 付着したグラウト材料の高圧水による洗浄（写真 2.2-19）。



写真 2.2-19 洗浄状況

以上の作業を注入ごとに繰り返す。

## 2.2.4 試験結果

### (1) 基礎特性試験

#### 1) 漏斗流下試験

##### a. JP 漏斗流下試験(2007 年度実施分)

練上がり 5 分、30 分後の JP 漏斗とファンネルの全流下時間データの比較を図 2.2-10 に示す。

JP 漏斗の流下時間は大部分が 2.1~2.5 秒の狭い範囲となり、ファンネルの流下時間は 20~35 秒程度の広い範囲となる。グラウト材料の粘性・流動性の比較においては、測定範囲が広いファンネル流下時間による評価手法の方が適していると考える。

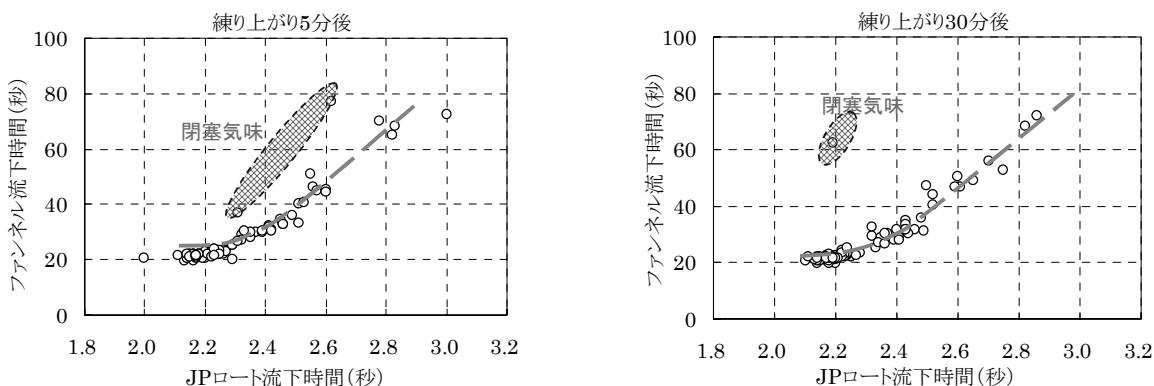


図 2.2-10 JP 漏斗とファンネルにおける流下時間の比較

##### b. ファンネル流下試験

ファンネル流下時間と塑性粘度の関係の一例（2008 年度実施）を図 2.2-11 に示す。

ファンネル流下時間と塑性粘度は直線関係（流下時間の増加に伴い塑性粘度が高くなる）にあることから、ファンネル流下時間の計測により粘度の変化を概略判定できる。

また、ファンネル流下時間は、練上り直後と練上がり 30 分後を比較すると、練上がり 30 分後の方が 3~8 秒程度（平均 5 秒程度）長くなる。そのため、一般的に良好なフレッシュ状態（30 分後のファンネル流下時間が 30 秒以下（塑性粘度で 90mPa·s 以下））とするためには、練上り直後のファンネル流下時間を 25 秒以下になるよう SP/B を設定すれば、30 分後のファンネル流下時間が 30 秒以下となる。

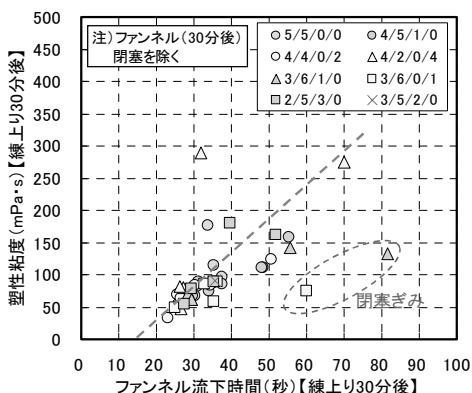


図 2.2-11 ファンネル流下時間と塑性粘度の関係

### c. P漏斗流下試験(2008 年度実施分)

b で示した通り塑性粘度とファンネル流下時間に直線関係が成り立つことから、ファンネル流下時間の計測で粘度が推定できる。よって、P 漏斗流下時間により粘度を測定する必要はないと考える。

## 2) 粘性試験

粘性試験による練り上がり 30 分後の塑性粘度および降伏値の一例(2008 年度実施)を図 2.2-12, 図 2.2-13 に示す。

低アルカリ性セメントは、同結合材構成比において、W/B が大きく SP/B が小さくなるほど塑性粘度および降伏値が小さくなる。

表 2.2-2 の要求値(塑性粘度 $\leq 50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 降伏値 $\leq 5 \text{ Pa}$ )を満足するためには、SP/B(最大で 6.0%)をさらに増やすことも考えられた(表 2.2-5 参照)。しかし、有機物で構成される SP の使用量は低減することが望ましい。Posiva での検討においても 4%程度<sup>21)</sup>となっていることから、表 2.2-5 の中から要件に近い最適配合を選定した。

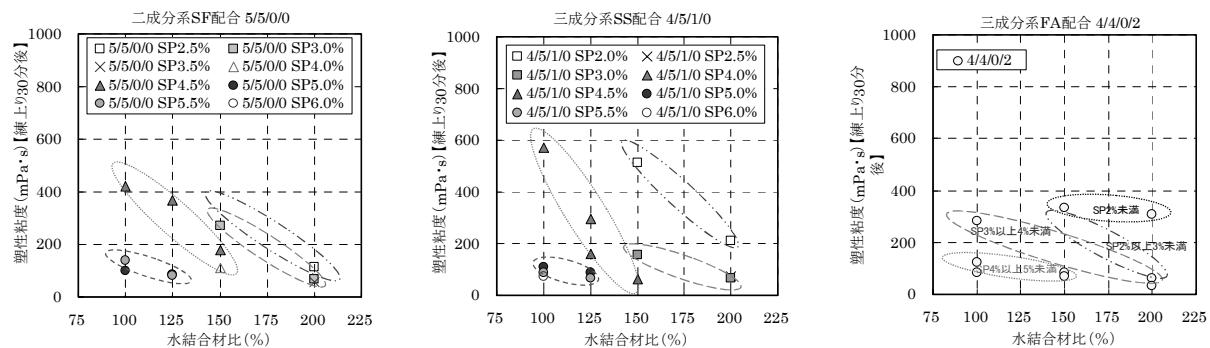


図 2.2-12 SP/B をパラメータとした W/B と塑性粘度の関係

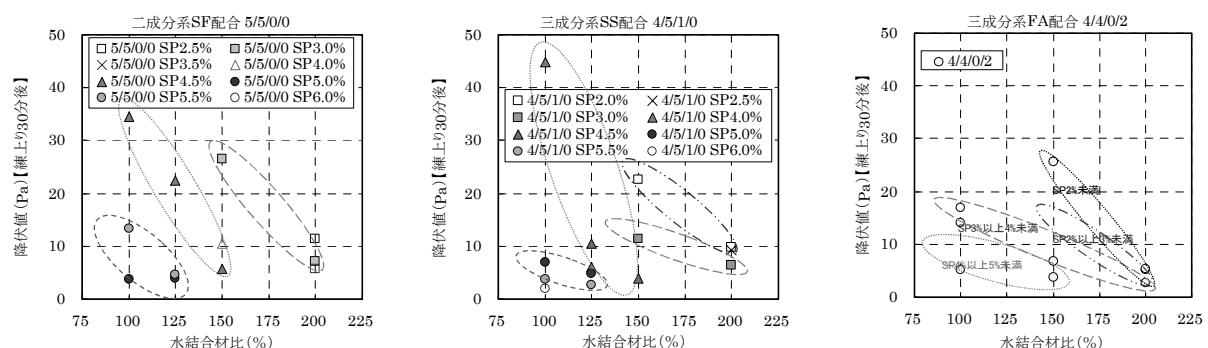


図 2.2-13 SP/B をパラメータとした W/B と降伏値の関係

## 3) 鋼製メッシュ透過試験

鋼製メッシュ透過試験における透過量とメッシュサイズの関係の一例(2008 年度実施)を図 2.2-14 に示す。

メッシュ透過量は、W/B が大きく SP/B が多くなるほど増加する傾向にあるが、グラウト材料の

粘性が低く、分離抵抗性が高いほど鋼製メッシュ内側のフィルターケーキ生成が遅くなる傾向を確認した。

最小メッシュサイズ  $b_{min}$  (通過量が 0 となるメッシュサイズ、微小間隙浸透性の限界サイズと考えられる) は、グラウト材料の最大粒径に依存するものの、表 2.2-2 の要求値 ( $b_{min} \leq 80\mu\text{m}$ ) をすべての配合で満足した。 $b_{min}$  は、SS 三成分系が最も小さく  $40\sim50\mu\text{m}$  程度、次いで SF 二成分系が  $42\sim57\mu\text{m}$  程度となった。粒子サイズが相対的に大きい FA 三成分系の  $b_{min}$  は  $56\sim63\mu\text{m}$  となつた。

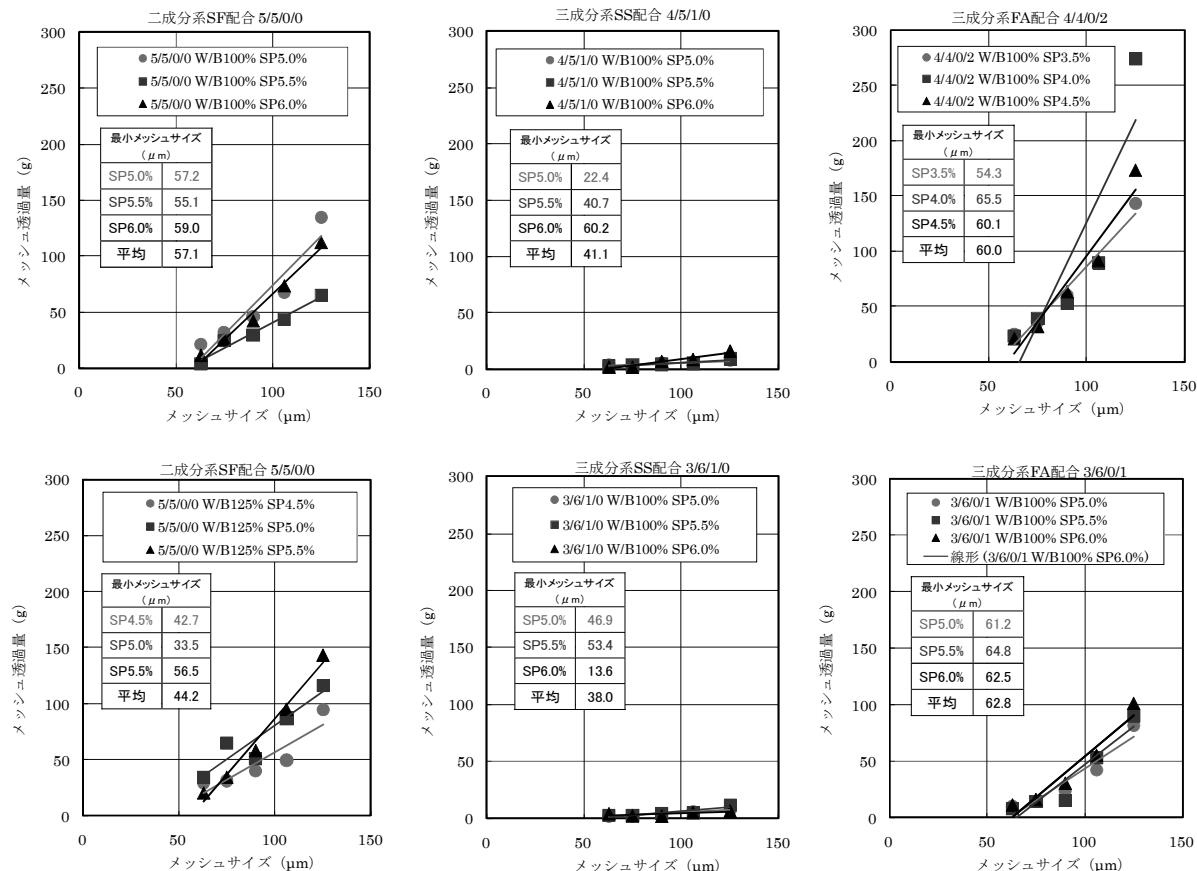


図 2.2-14 メッシュ透過試験における透過量とメッシュサイズの関係

#### 4) サンドカラム試験(2008 年度実施分)

サンドカラム試験の浸透流量の経時変化の一例を図 2.2-15 に示す。

浸透量が多い配合は、FA 三成分系の 4/4/0/2 と 4/2/0/4 であり、次いで 5/5/0/0 の W/B=125% となつた。SS 三成分系の 4/5/1/0 の浸透量は著しく少なかった。

また、浸透流量は W/B と SP/B が大きいほど多くなったが、5/5/0/0 や 4/2/0/4 では W/B が大きいほど少なくなる逆転現象も見られた。これは、W/B の増加に応じて SP/B を低減させ、W/B と塑性粘度や降伏値の関係が逆転した影響と考える。

なお、 $300\text{cm}^3$  程度の浸透量の時グラウト材料が流出したことから、サンドカラム装置の間隙浸透量は  $300\text{cm}^3$  程度と考えた。

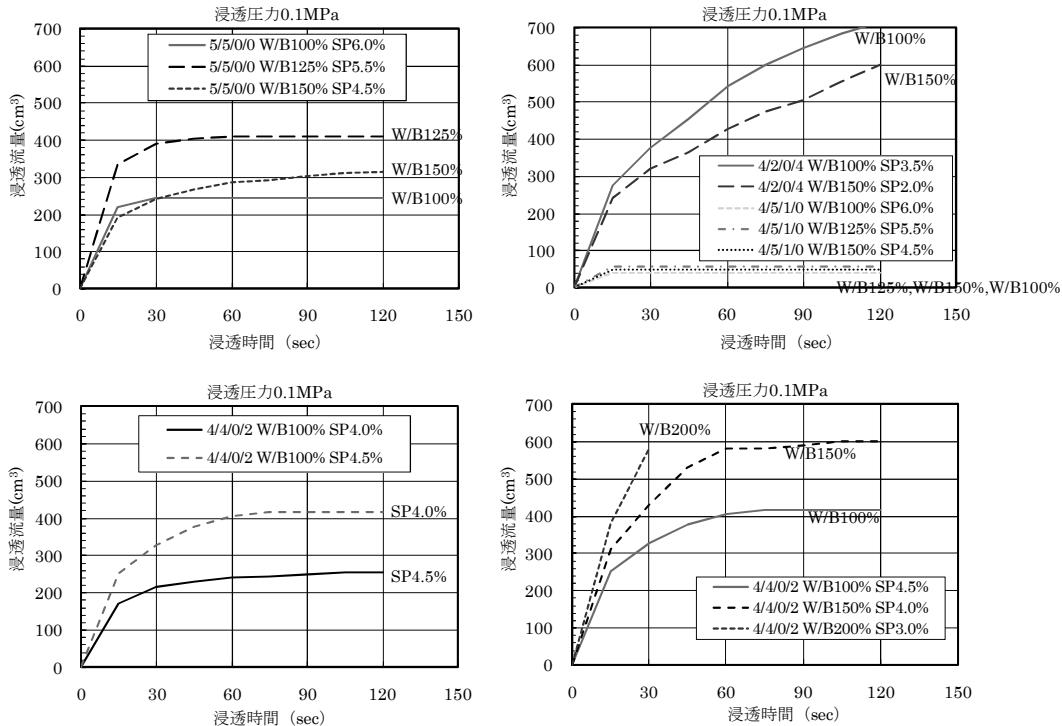


図 2.2-15 浸透量の経時変化の一例

## 5) ゲルタイム調整試験(2008 年度実施分)

ゲルタイム調整試験の結果を図 2.2-16 に示す。

5/5/0/0 の W/B=125%, SP/B=5.5% の配合は、ゲルタイムを 10~42 秒程度に調整できる。

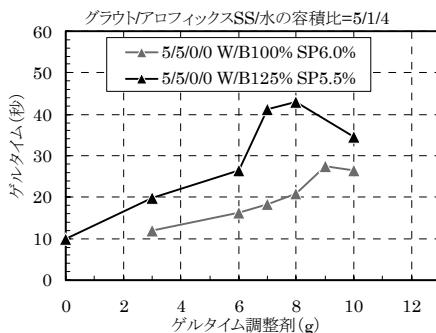


図 2.2-16 ゲルタイム調整試験結果

## 6) 静置ブリーディング試験

静置ブリーディング試験の結果（2008 年度実施）を表 2.2-7 に示す。

ブリーディング率は、W/B=150%以下においてほぼ 0.1%以下になり、表 2.2-2 の要求値（ブリーディング率  $\leq 2.0\%$ ）を満足した。

サンドカラム試験で浸透性が良好であった 4/2/0/4 や 4/4/0/2 の一部の配合では、ブリーディングが多く発生し、FA が材料分離抵抗性に積極的に寄与しないことが示された。

表 2.2-7 静置ブリーディング試験結果

結合材構成比 OPC/SF/SS/FA	練混ぜ 2 時間後				練混ぜ 24 時間後			
	W/B (%)				W/B (%)			
	100	125	150	200	100	125	150	200
5/5/0/0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
4/5/1/0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
4/4/0/2	0.0	—	0.1	0.7	0.0	—	0.0	1.5
4/2/0/4	0.1	—	1.2	—	0.0	—	1.9	—
3/6/1/0	0.0	—	0.0	—	0.0	—	0.0	—
3/6/0/1	0.0	—	0.1	—	0.0	—	0.0	—

## 7) 加圧ブリーディング試験

加圧ブリーディング試験の結果（2008 年度実施）を図 2.2-17 に示す。

同じ結合材構成比においては、W/B が大きくなるほど加圧ブリーディング率（脱水量）が増加する傾向が認められたことから、W/B の小さい配合の高圧注入時の材料分離抵抗性が優れていることが示された。また、加圧ブリーディング率も 4/2/0/4 の W/B=150% が最も多く、4/4/0/2 の W/B=200% でやや多くなつたことから、FA 三成分系の配合は材料分離抵抗性がやや劣ることが確認された。

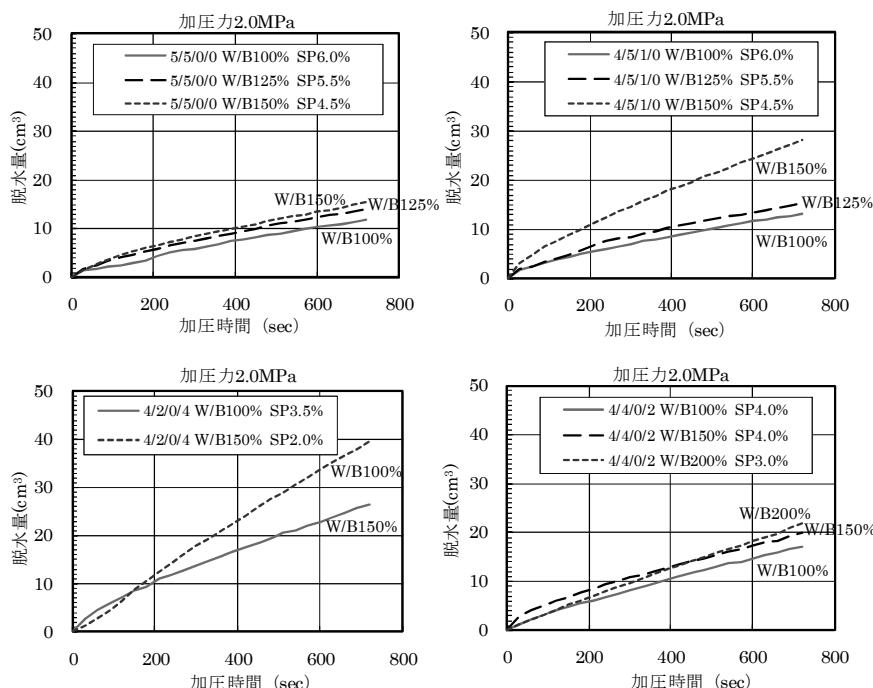


図 2.2-17 加圧ブリーディング試験結果の一例

## 8) 凝結試験(2008 年度実施分)

グラウト材料の W/B や SP/B と凝結始発時間との関係を図 2.2-18、W/B と凝結終結時間の関係を図 2.2-19 に示す。

凝結始発時間は、早いもので 6~8 時間程度、遅いもので 20~27 時間程度と、おおむね 12 時間以内となった。W/B が大きく SP/B が多いものほど始発時間が遅れる傾向にあることから、6)の

24時間後ブリーディング率は、グラウト材料がほぼ終結した時点での値を示している。亀裂内に充填されたグラウト材料の凝結後の止水性を評価する指標となり得る。

凝結終結時間は0.44日(10.5時間)～7.77日(186.5時間)であり、結合材構成比やW/Bに支配される。

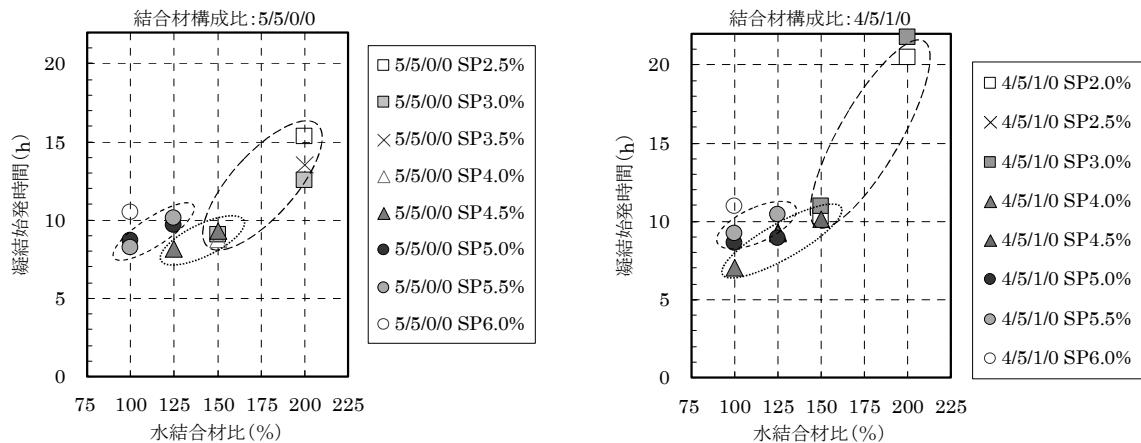


図 2.2-18 凝結始発時間とW/Bの関係

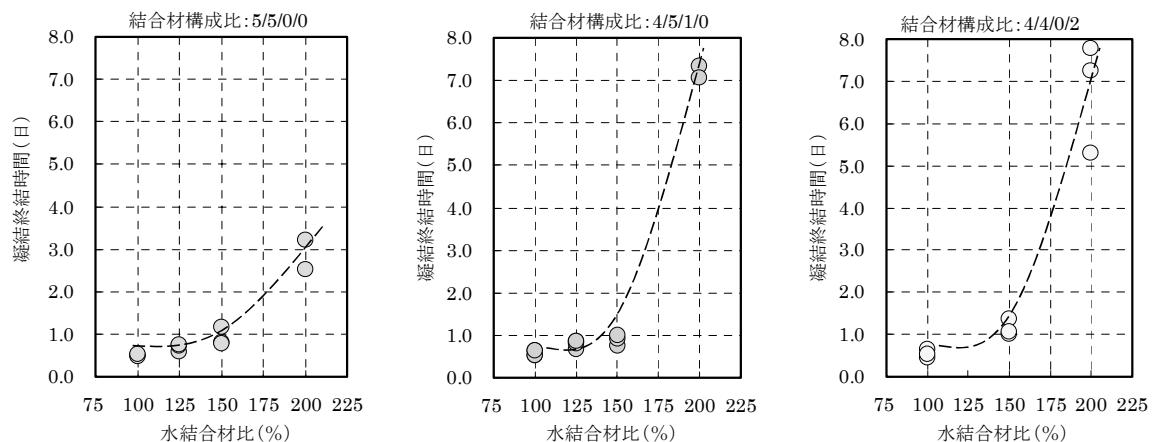


図 2.2-19 凝結終結時間とW/Bの関係

### 9) ベーンせん断試験(2007年度実施分)

ベーンせん断強度は、表 2.2-2 の要求値(せん断強度 $\geq 500\text{Pa}$ )を満足しなかった。これは、1時間後の作業性(可使時間)を想定し、遅延型の混和剤であるマイティ150Rを添加したためと考える。

要求値に近い強度を発現した配合は2/5/3/0であり、3/6/0/1, 3/5/2/0, 3/6/1/0の強度発現が次いで良い結果となった。

### 10) フォールコーン試験(2008年度実施分)

注水後6時間におけるフォールコーン貫入深さとW/Bの関係の一例を、SP/Bをパラメータとし

て図 2.2-20 に示す。

6 時間せん断強度は 0.2~8kPa 程度となり、おおむね表 2.2-2 の要求値（せん断強度 $\geq 500\text{Pa}$ ）（貫入深さが 18.4mm 以下）を満足した。また、6 時間せん断強度は W/B が大きく SP/B が大きいほど、小さくなる傾向を示すことから、強度の向上のためには浸透性が確保できる範囲内で、SP/B の少ない配合を選定する必要がある。

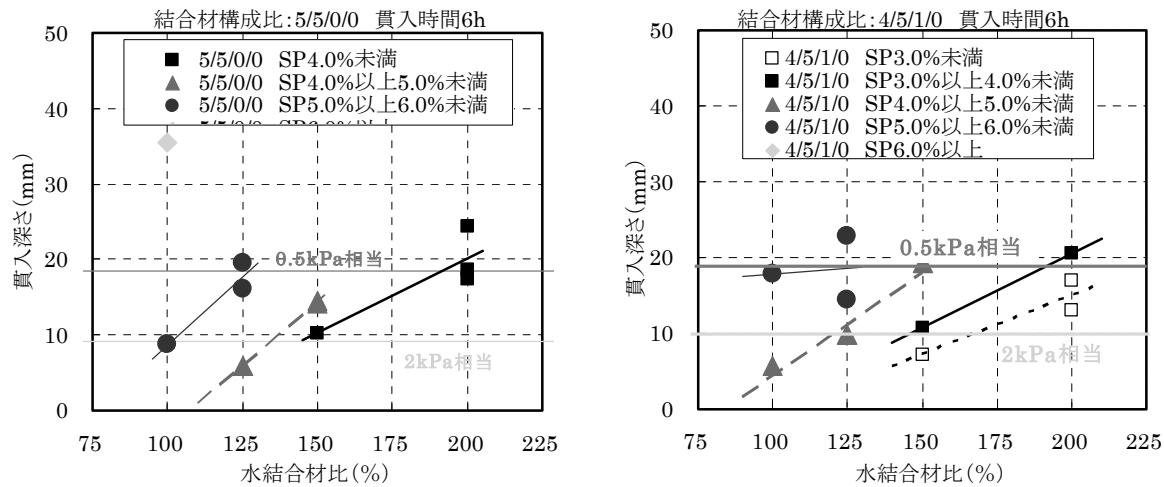


図 2.2-20 ファールコーン貫入深さと W/B の関係

### 11) 三軸圧縮強度試験(2007 年度実施分)

三軸圧縮強度は、FA 二成分系 5/0/0/5 の W/B=100% が最も大きく 1,176kPa であった。この配合はブリーディングが著しく多く、供試体成型時に沈降・濃縮されて密度や強度が高くなったと考えられる。次に三軸圧縮強度が大きい配合は、SF 二成分系 5/5/0/0, SS 二成分系 5/0/5/0 および三成分の 4/5/1/0, 4/2/0/4, 3/6/1/0, 3/6/0/1 等で、200kPa 以上の強度が得られた。

なお、10kPa 以下の低強度しか得られないもの (W/B=200%以上の配合) や、低強度の配合で側圧の影響が認められないもの ( $\phi=0$ ) も確認された。

### 12) 一軸圧縮強度試験

材齢 28 日の一軸圧縮強度 (2008 年度実施) を結合材水比との関係で整理し図 2.2-21 に示す。

一軸圧縮強度が大きい配合は、SF 二成分系 5/5/0/0, SS 三成分系 4/5/1/0 であり、W/B=100%において 18~21MPa の強度が得られた。

次に一軸圧縮強度が大きい配合は、OPC 単味、FA 三成分系 4/4/0/2 であり、15~16 MPa の強度が得られた。それ以外では、SS 三成分系 3/6/1/0, FA 三成分系 3/6/0/1, 4/2/0/4 で 8 MPa 以上の強度が得られた。OPC を 20% しか含まない 2/5/3/0 は、要求値を満足しなかった。

配合選定においては、圧縮強度が大きい傾向が認められる 5/5/0/0 および 4/5/1/0 をメインに、せん断強度 (フォールコーン試験より算出) が大きいものを選定することとした。また、OPC と SF がほぼ等量の結合材構成の場合に強度が高いことから、強度発現性とポゾラン反応による低アルカリ性を同時に満足させるには、OPC と SF のバランスを考慮する必要があると考えた。

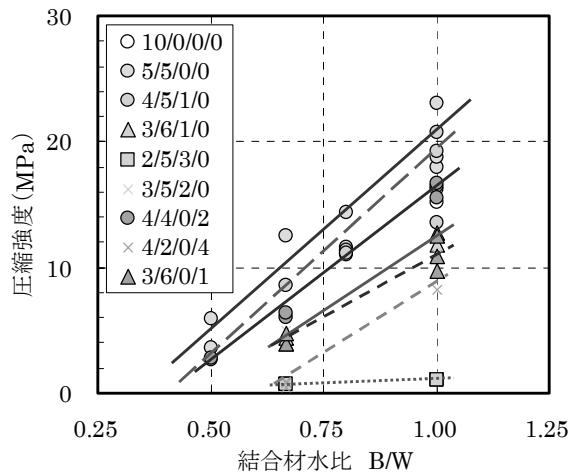
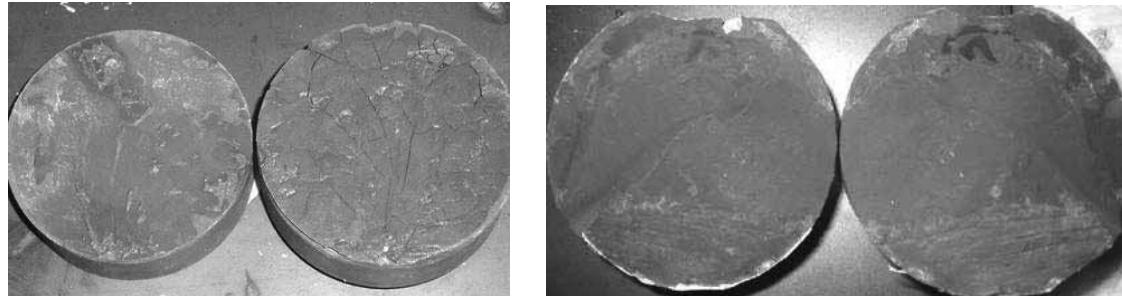


図 2.2-21 圧縮強度と結合材水比の関係

## 13) 付着強度試験(2008 年度実施分)

付着強度は全断面有効として計算し、おおむね 0.05MPa 程度となった。配合における差異や圧縮強度等との明確な相関関係は認められなかった。

付着破壊の形態は、写真 2.2-20(a)に示すように、グラウト材料と岩盤コアの付着面での剥離破壊であった。付着強度が 0.115MPa と最も高い 3/6/0/1 (W/B=100%, SP/B=6.0%) では、同写真 (b)に示すようにグラウト材料の内部で内面破壊を起こすものも確認された。



(a) 剥離破壊 (b) 内面破壊  
写真 2.2-20 付着強度試験後の供試体の状況 ( $\phi 50\text{mm}$ )

## 14) pH 測定試験(2007 年度実施分)

浸漬 3 週間経過後の pH 測定結果を表 2.2-8 に示す。

pH が 11.0 以下になった配合は、OPC が 30%以下の配合 (3/6/1/0, 3/6/0/1, 2/5/3/0) のみであった (20°C, 人工海水)。

50°Cで養生すると反応が促進され全て  $\text{pH} < 11$  を達成した。反応が十分進行した長期材齢条件においては、ポゾラン材料を 50%程度以上混合することで、目標 pH の 11 以下の低アルカリ性が期待された。

表 2.2-8 グラウト材料の pH 測定結果

結合材構成比 OPC/SF/SS/FA	W/B (%)	pH 測定値			
		20°C 2 週間養生		50°C 2 週間養生	
		イオン 交換水	人工 海水	イオン 交換水	人工 海水
5/5/0/0	100	12.11	11.40	10.60	9.61
5/5/0/0	200	12.09	11.49	10.63	9.40
4/5/1/0	200	12.29	11.54	10.50	9.32
4/4/0/2	100	11.98	11.16	10.68	9.52
4/4/0/2	200	12.28	11.44	10.66	9.47
4/2/0/4	100	12.35	11.83	10.37	9.97
3/6/1/0	100	11.56	10.30	10.60	9.61
3/6/0/1	100	11.31	10.02	10.49	9.28
2/5/3/0	100	10.93	9.71	10.22	9.05

## (2) 浸透特性試験

## 1) 浸透試験（2007 年度実施分）

平行平板モデルにおける流出速度と配合の関係を図 2.2-22 に示す。

注入圧力 1.0MPa で行なった本注入試験においては、流出速度に差が認められたものの、ほとんどの配合で良好な浸透状況が確認された。注入状況を写真 2.2-21 に示す。

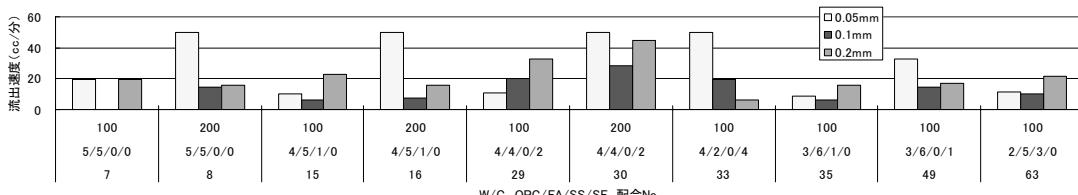


図 2.2-22 流出速度と配合の関係（平行平板モデル）

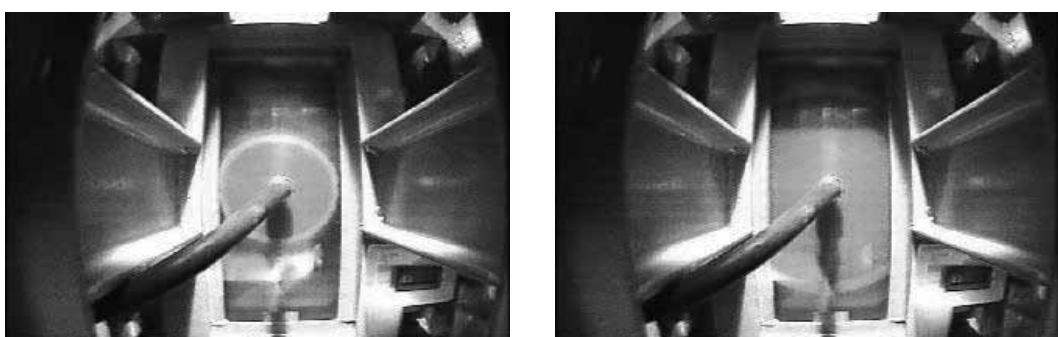


写真 2.2-21 グラウト注入状況（平行平板モデル）

凹凸亀裂モデルによる充填重量と配合の関係を図 2.2-23 に示す。

凹凸亀裂モデルを用いた注入試験においては、平行平板モデルでの浸透結果を踏まえ、浸透状況の差を現れやすくするため注入圧力を 0.1MPa とした。しかし、平行平板モデルと同様に、ほとんどの配合で良好な浸透状況が確認された。

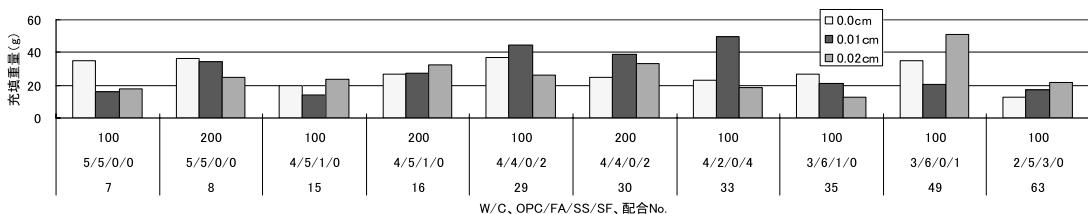


図 2.2-23 充填重量と配合の関係（凹凸亀裂モデル）

## 2) 目詰まり特性評価試験(2007 年度実施分)

5/5/0/0 の W/B=100% の平行平板モデルにおける試験結果を図 2.2-24 に示す。

開口幅 50 $\mu\text{m}$  の試験においては、目詰まりすることなく浸透した。一方、開口幅 100 $\mu\text{m}$  や 200 $\mu\text{m}$  の試験においては、注入圧力が 2MPa 程度で目詰まりが生じた。一般に、狭い開口幅において目詰まりが生じやすいと考えられているが、開口幅 50 $\mu\text{m}$  で目詰まりが生じず、100 $\mu\text{m}$  以上で生じたという現象は、山本ほか<sup>19)</sup>でも報告されている。W/B が高いグラウト材料においては、異なる濃度の材料が広い亀裂内を浸透していることが理由とされている。

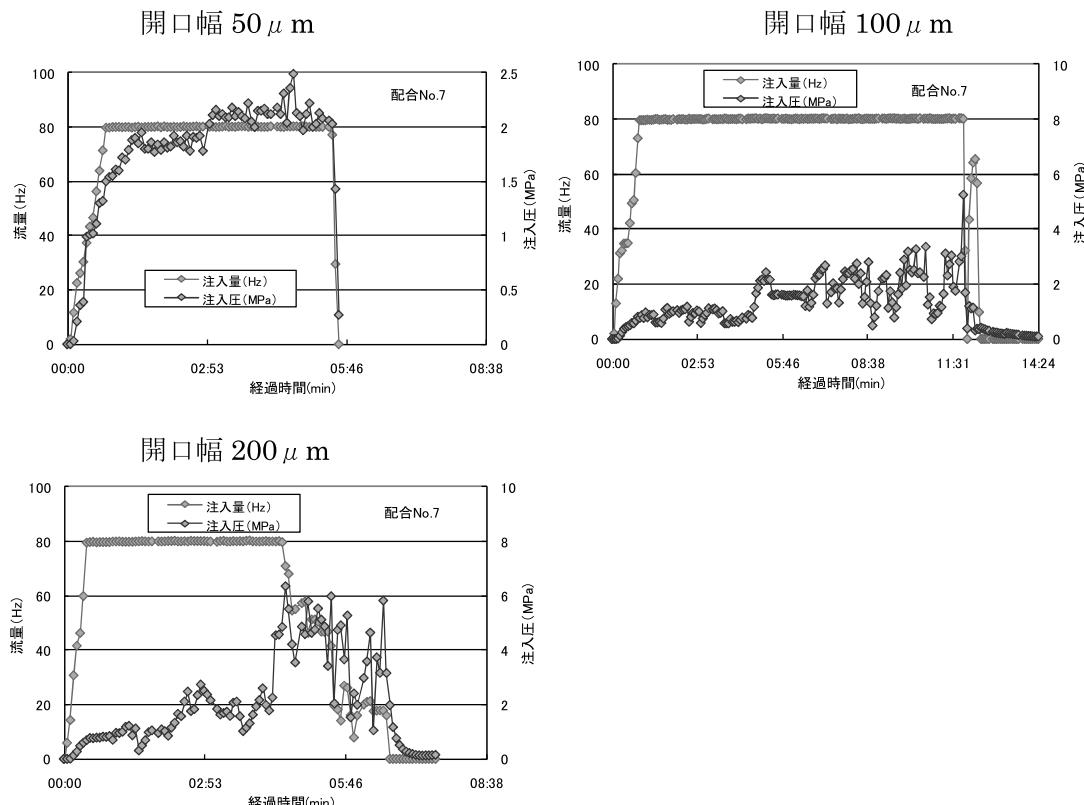


図 2.2-24 ポンプ回転数と注入圧力の経時変化（平行平板モデル）

## 3) 可視化平行平板試験(2008 年度実施分)

最大注入圧 1.0MPa における注入試験結果一覧を表 2.2-9, 図 2.2-25 に, 2.0MPa における注入試験結果一覧を表 2.2-10, 図 2.2-26 に示す。

注入圧 0.1MPa においては、配合間の明確な差異は認められなかった。注入圧 1.0MPa および 2.0MPa においては、5/5/0/0 と他の配合で顕著な違いが現れた。とくに、注入圧 2.0MPa における配合 No.1~3 (5/5/0/0) の累積注入量は、他の配合に比べ 1 衍程度多くなった。

表 2.2-9 試験結果一覧表（注入圧 1MPa）

配合 No.	結合材構成比 OPC/SF/SS/FA	W/B (%)	SP/B (%)	開口幅 ( $\mu\text{m}$ )	粘度 (mPa·s)	降伏値 (Pa)	比重	最大注入圧 (MPa)	累積注入量 (L)
1	5/5/0/0	100	6.0	100	100.5	3.8	1.46	1.0	0.07
2	5/5/0/0	125	5.5		72.4	3.4	1.35	1.0	3.38
3	5/5/0/0	150	4.5		102.8	7.7	1.33	1.0	1.49
4	4/5/1/0	100	6.0		73.8	1.5	1.44	1.0	0.57
5	4/5/1/0	125	5.5		92.1	4.9	1.38	1.0	0.44
6	4/5/1/0	150	4.0		55.0	4.4	1.33	1.0	1.65
7	4/4/0/2	100	4.5		68.9	3.2	1.46	1.0	0.65
8	4/4/0/2	150	4.0		43.2	2.9	1.33	1.0	0.89
9	3/6/0/1	100	6.0		71.6	1.5	1.43	1.0	0.42
10	3/6/1/0	100	6.0		95.0	3.7	1.42	1.0	0.05
1	5/5/0/0	100	6.0	50	100.6	2.3	1.46	1.0	0.28
2	5/5/0/0	125	5.5		70.4	2.3	1.35	1.0	0.34
3	5/5/0/0	150	4.5		60.8	4.8	1.33	1.0	0.45
4	4/5/1/0	100	6.0		88.8	1.7	1.44	1.0	0.36
5	4/5/1/0	125	5.5		70.4	2.3	1.38	1.0	0.29
6	4/5/1/0	150	4.0		49.2	3.1	1.33	1.0	0.22
7	4/4/0/2	100	4.5		67.7	3.2	1.46	1.0	0.07
8	4/4/0/2	150	4.0		42.9	2.0	1.33	1.0	0.37
9	3/6/0/1	100	6.0		103.6	2.9	1.43	1.0	0.23
10	3/6/1/0	100	6.0		94.1	2.1	1.42	1.0	0.25
1	5/5/0/0	100	6.0	20	120.2	3.6	1.46	1.0	0.10
2	5/5/0/0	125	5.5		79.6	4.0	1.35	1.0	0.11
3	5/5/0/0	150	4.5		71.9	7.0	1.33	1.0	0.07
4	4/5/1/0	100	6.0		101.9	2.4	1.44	1.0	0.09
5	4/5/1/0	125	5.5		63.8	2.1	1.38	1.0	0.16
6	4/5/1/0	150	4.0		71.9	7.0	1.33	1.0	0.14
7	4/4/0/2	100	4.5		78.1	3.0	1.46	1.0	0.07
8	4/4/0/2	150	4.0		41.3	2.4	1.33	1.0	0.12
9	3/6/0/1	100	6.0		134.9	3.5	1.43	1.0	0.11
10	3/6/1/0	100	6.0		122	3.0	1.42	1.0	0.14

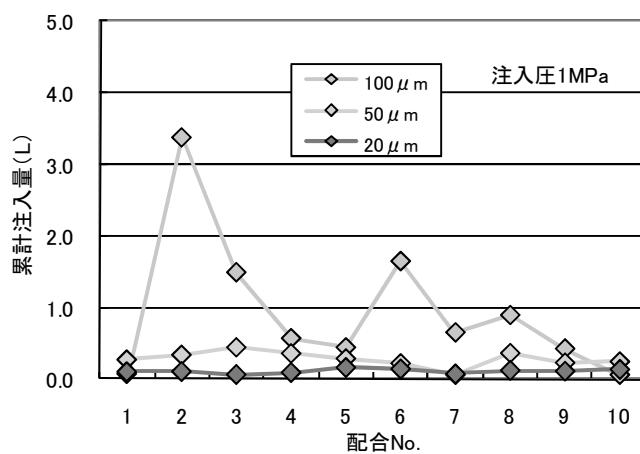


図 2.2-25 配合と累計注入量の関係（最大注入圧 1.0MPa）

表 2.2-10 試験結果一覧表（注入圧 2MPa）

配合 No.	結合材構成比 OPC/SF/SS/FA	W/B (%)	SP/B (%)	開口幅 ( $\mu\text{m}$ )	粘度 (mPa·s)	降伏値 (Pa)	比重	最大注入圧 (MPa)	累積注入量 (L)
1	5/5/0/0	100	6.0	100	65.1	7.5	1.46	2.0	32.34
2	5/5/0/0	125	5.5		78.9	1.9	1.35	2.0	32.02
3	5/5/0/0	150	4.5		79.4	6.2	1.33	2.0	31.42
4	4/5/1/0	100	6.0		79.1	1.6	1.44	2.0	2.73
5	4/5/1/0	125	5.5		74.6	2.3	1.38	2.0	2.42
6	4/5/1/0	150	4.0		62.9	5.0	1.33	2.0	4.55
7	4/4/0/2	100	4.5		107.4	6.1	1.46	2.0	1.67
8	4/4/0/2	150	4.0		48.7	2.7	1.33	2.0	3.32
9	3/6/0/1	100	6.0		101.6	2.2	1.43	2.0	1.08
10	3/6/1/0	100	6.0		97.0	2.6	1.42	2.0	3.95
1	5/5/0/0	100	6.0	50	122.8	3.3	1.46	2.0	0.22
2	5/5/0/0	125	5.5		103.8	4.4	1.35	2.0	0.25
3	5/5/0/0	150	4.5		75.1	4.9	1.33	2.0	2.28
4	4/5/1/0	100	6.0		57.3	1.4	1.44	2.0	0.25
5	4/5/1/0	125	5.5		57.3	1.4	1.38	2.0	0.25
6	4/5/1/0	150	4.0		66.5	4.7	1.33	2.0	0.23
7	4/4/0/2	100	4.5		111.6	5.1	1.46	2.0	0.28
8	4/4/0/2	150	4.0		47.5	2.2	1.33	2.0	0.26
9	3/6/0/1	100	6		109.4	2.1	1.43	2.0	0.11
10	3/6/1/0	100	6		122.7	4.0	1.42	2.0	0.23
1	5/5/0/0	100	6.0	20	47.5	2.2	1.46	2.0	0.26
2	5/5/0/0	125	5.5		89.7	7.0	1.35	2.0	0.23
3	5/5/0/0	150	4.5		75.1	4.9	1.33	2.0	0.28
4	4/5/1/0	100	6.0		101.8	2.4	1.44	2.0	0.17
5	4/5/1/0	125	5.5		71.8	2.8	1.38	2.0	0.16
6	4/5/1/0	150	4.0		53.3	3.4	1.33	2.0	0.20
7	4/4/0/2	100	4.5		87.3	3.2	1.46	2.0	0.15
8	4/4/0/2	150	4.0		38.0	1.9	1.33	2.0	0.15
9	3/6/0/1	100	6.0		85.3	1.6	1.43	2.0	0.15
10	3/6/1/0	100	6.0		91.3	1.9	1.42	2.0	0.18

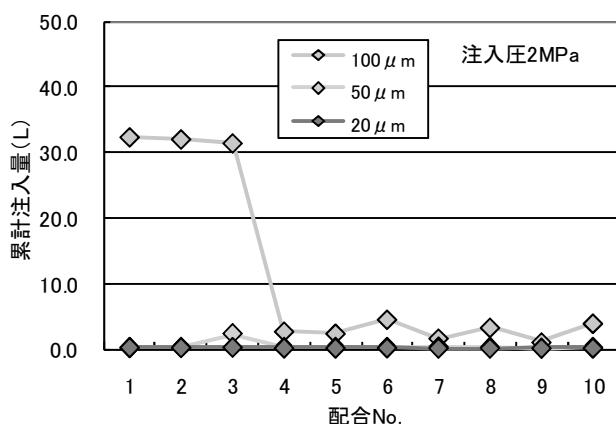


図 2.2-26 配合と累計注入量の関係（最大注入圧 2.0MPa）

流量や間隙圧の経時変化が明瞭な配合 No.3 について、最大注入圧 1.0MPa の場合の注入量の経時変化を図 2.2-27 に、間隙圧の経時変化を図 2.2-28～図 2.2-30 に示す。

注入量は断続的に浸透と目詰まりを繰り返していることが確認される。間隙圧も同様な変化を示す。

最適配合として、累計注入量がとくに多かった（図 2.2-25、図 2.2-26 参照）配合 No.2 (5/5/0/0, W/B=125%, SP/B=5.5%) と配合 No.3 (5/5/0/0, W/B=150%, SP/B=4.5%) が選定された。

配合 No.2 と No.3 については、粘性試験および漏斗流下試験において差が確認されなかつたものの、図 2.2-15 に示すサンドカラム試験において配合 No.2 の優位性が示された。また、止水性に関する試験結果については、両配合とも表 2.2-2 の要求値を満足し十分な止水性を示した。以上より、総合的に最も優れた配合として、配合 No.2 (5/5/0/0, W/B=125%, SP/B=5.5%) を選定した。

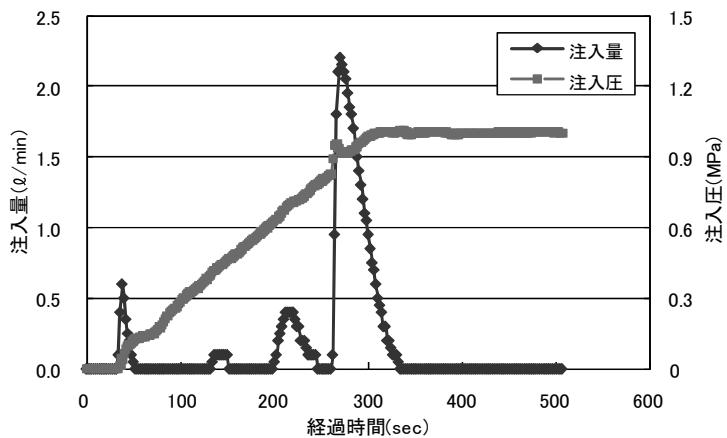


図 2.2-27 注入圧・注入量—時間関係

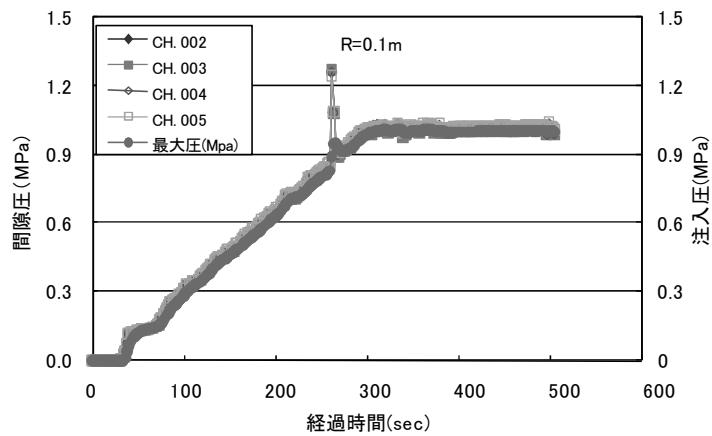


図 2.2-28 間隙圧—時間関係 (R=0.1m)

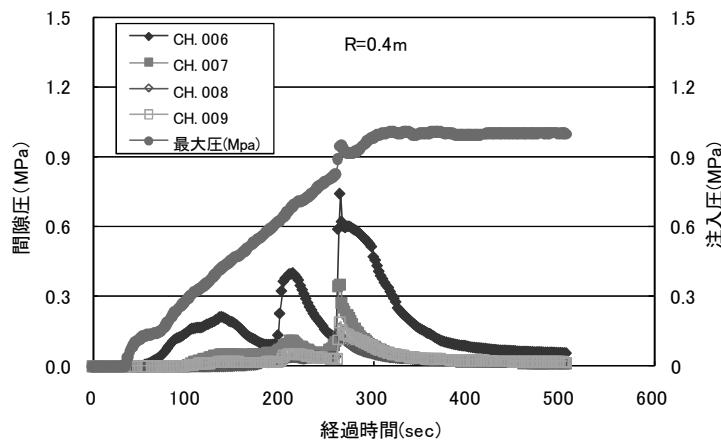


図 2.2-29 間隙圧一時間関係 (R=0.4m)

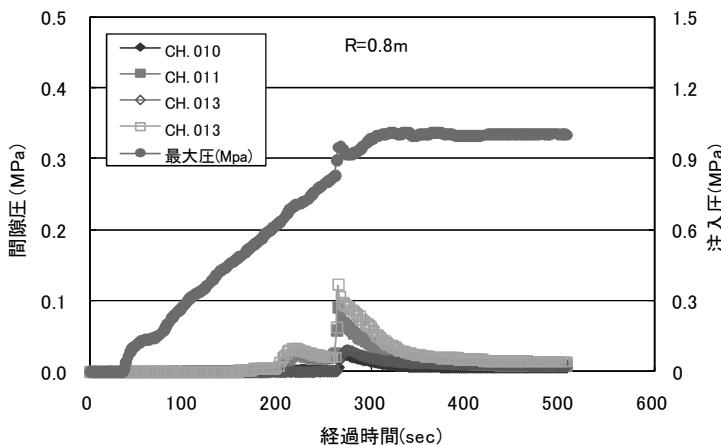


図 2.2-30 間隙圧一時間関係 (R=0.8m)

## 2.2.5 まとめ

2007 年度から 2008 年度の 2 年間にわたって実施した低アルカリ性セメントの基礎物性試験や浸透特性試験から、原位置試験に適用可能な配合を選定した。

2007 年度は、低アルカリ性セメントの概略絞り込みを行い、微粉材料の OPC の一部を、ポゾラン材料の SF, SS, FA に置き換えた結合材構成比 37 種類において、W/B を 100%～400% の 2～4 段階、SP/B を 2～3.5% の 1 段階に変えた 96 配合により各種試験を行った。

まず、96 配合に対し、粘性試験や静置ブリーディング試験を行い、粘性特性や材料分離抵抗性に優れた配合に、一部の比較配合を含めた 31 配合を選定した。31 配合のうち、さらに材料分離抵抗性や初期強度発現性に優れた 10 配合を絞り込んだ。この際、強度発現が少ない W/B の大きい 300～400% は除き浸透試験を実施した。

各種試験により本材料の特性について把握した。また、漏斗流下試験や pH 測定試験等については、材料選定に適当と思われる試験方法を検討し 2008 年度の試験で採用した。

2008年度は、前年度に得られた材料特性を考慮し、結合材構成比を8種類、W/Bを100～200%の4段階、SP/Bを1～6%の3段階に変えた63配合により各種試験を行った。なお、2008年度は、練混ゼミキサーを改良することでSFの分散性が良くなり、粘性が増加したためSP/Bを増やした。

まず、63配合に対し、施工性および初期強度発現性に優れた43配合を選定し、さらに強度特性に優れた20配合を選定した。その後、20配合の浸透性および材料分離特性を評価した。SSが含まれる配合はサンドカラム試験から浸透性が低くなり、FAが多く含まれる配合は材料分離抵抗性が若干劣ることが確認できた。ここまで試験から10配合を選定し、可視化平行平板注入試験を行い浸透特性について把握した。

最も優れた1配合を選定するために10配合で実施した基礎物性試験結果から総合評価を行った(表2.2-11)。

施工性、止水性については、表2.2-2の要求値よりも優れているものを「○」、要求値を満足するものを「△」、要求値を満足しないものを「△」、要求値を満足せず他と比較しても劣っているものを「×」とした。浸透性はサンドカラム試験結果により判断することとしたが、要求値がないため定性的に評価した。他の配合と比較し、優れているものを「○」、劣っているものを「×」とした。

全てに優れた配合「結合材構成比 OPC/SF/SS/FA= 5/5/0/0, W/B=125%, SP/B=5.5%」を原位置試験の候補配合として選定した。

表 2.2-11 基礎物性試験結果のまとめ (2008)

結合材構成比 <sup>*1</sup>	W/B (%)	SP/B (%)	施工性			止水性			浸透性 <sup>*2</sup>	総合評価 <sup>*3</sup>
			粘度	降伏値	漏斗流下時間	アリーティング率	せん断強度	圧縮強度		
5/5/0/0	100	6.0	△	○	○	○	△	◎	○	△
5/5/0/0	125	5.5	△	○	○	○	○	◎	○	○
5/5/0/0	150	4.5	△	△	○	○	○	◎	○	△
4/5/1/0	100	6.0	△	◎	◎	○	△	◎	×	×
4/5/1/0	125	5.5	△	○	◎	○	△	◎	×	×
4/5/1/0	150	4.5	△	○	◎	○	△	○	×	×
4/4/0/2	100	4.5	△	△	○	○	○	◎	○	△
4/4/0/2	150	4.0	△	○	◎	○	△	○	○	△
3/6/0/1	100	6.0	△	◎	◎	○	○	◎	×	×
3/6/1/0	100	6.0	△	◎	○	○	△	○	×	×

\*1 : OPC/SF/SS/FA

\*2 : サンドカラム試験結果により評価

\*3 : ○…最適配合として選定

△…各項目の評価で、×はないが、△が2つ以上ある場合

×…各項目の評価で1つでも×がある場合

## 2.3 溶液型グラウト材料

### 2.3.1 試験の概要

#### (1) 開発の目的

一般的に、岩盤を対象としたグラウト材料としてはセメント系材料が適用されており、地層処分においてもメインのグラウト材料としてセメント系材料を検討している（「2.1.4 グラウト材料の適用範囲」参照）。しかし、セメント系材料は、微小な岩盤亀裂の浸透性に限界がある。とくに、我が国の複雑な地質環境を考慮すると、亀裂開口幅が  $100\mu\text{m}$  を超える明瞭な岩盤亀裂だけでなく、より微小な亀裂への注入が必要となるため、セメント系材料より浸透性に優れる溶液型の検討を進めてきた。

溶液型は一般的にセメント系材料などの懸濁型グラウト材料よりも浸透性に優れるものの、岩盤亀裂への浸透性および基礎物性について不明であった。さらに、セメント系材料と比較して、強度的な観点が懸念された。

そこで、溶液型の適用性に関する予備検討として、各種溶液型の中から耐久性のあるコロイダルシリカ 1 種類に対して硬化促進剤濃度を変化させて基礎物性の検討（2007 年度）を行った。さらに、原位置での適用を考慮した際に最適と思われる配合の選定プロセスとして、異なるコロイダルシリカを用いた基礎物性の検討および評価（2008 年度）<sup>22)</sup>を行った。以下に検討内容と試験結果についてまとめ、原位置への適用を考慮した際に最適と考えられる 4 配合を提示する。

#### (2) 構成材料

溶液型には高分子系材料とシリカ系グラウト材料がある。高分子系グラウト材料は基本的に使用が禁止されているため、実質的にはシリカ系のみとなる。シリカ系グラウト材料の分類を図 2.3-1 に示す。

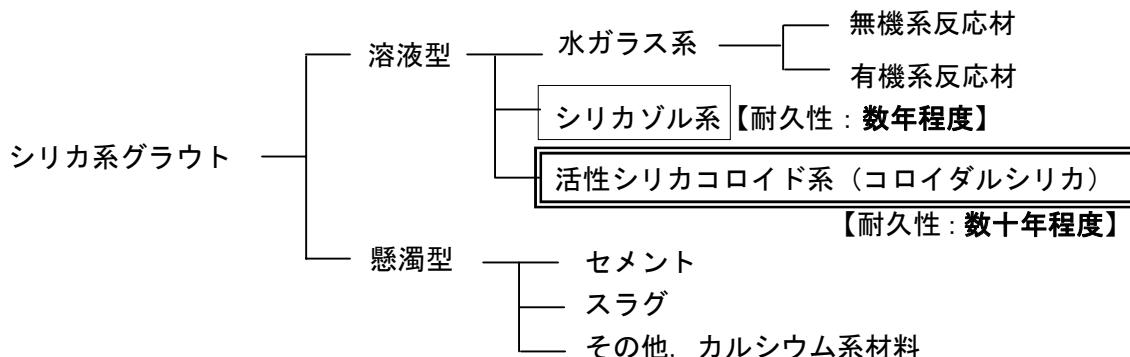


図 2.3-1 シリカ系グラウト材料の分類

耐久性のある材料は、シリカゾル系（酸性シリカゾル）と活性シリカコロイド系（コロイダルシリカ）の 2 種類が挙げられる。後者はイオン交換法により Na イオンを除去しているため耐久性に優れ、砂地盤の液状化対策等の本設注入に使用されている。本研究では活性シリカコロイド（コロイダルシリカ）を候補材料とした。構成材料を一覧にして表 2.3-1 に示す。

表 2.3-1 構成材料一覧

構成 材料	製品名称	仕様	製造・販売	使用年度		備考
				2007	2008	
コロイダルシリカ	Hi シリカ-20	コロイダルシリカ, 粒径 10~20nm, Na <sub>2</sub> O 0.35%以下 SiO <sub>2</sub> 濃度 20.6%, pH9.0~10.5 比重(25°C)1.132, 粘度(25°C)6mPa·s 以下	強化土エンジニアリング	—	○	汎用品
	Hi シリカ-30 (ハーマロック AT)	コロイダルシリカ, 粒径 10~20nm, Na <sub>2</sub> O 0.60%以下 SiO <sub>2</sub> 濃度 30.6%, pH9.0~10.5 比重(25°C)1.213, 粘度(25°C)6mPa·s 以下	強化土エンジニアリング	○	○	汎用品 2007 年度使用時の製品名称はハーマロック AT(アクターαとセット)
	Hi シリカ-40	コロイダルシリカ, 粒径 15~20nm, Na <sub>2</sub> O 0.60%以下 SiO <sub>2</sub> 濃度 40.5%, pH9.0~10.5 比重(25°C)1.3, 粘度(25°C)6mPa·s 以下	強化土エンジニアリング	—	○	汎用品
	Hi シリカ-20AL	コロイダルシリカ, 粒径 10~20nm, Na <sub>2</sub> O 0.35%以下 SiO <sub>2</sub> 濃度 20~21%, pH9.0~10.5 比重(25°C)1.13, 粘度(25°C)6mPa·s 以下	強化土エンジニアリング	—	○	粒子表面を Al で修飾して安定化
	Hi シリカ-30B	コロイダルシリカ, 粒径 10~20nm, Na <sub>2</sub> O 0.05%以下 SiO <sub>2</sub> 濃度 30~31%, pH9.0~10.5 比重(25°C)1.205, 粘度(25°C)6mPa·s 以下	強化土エンジニアリング	—	○	アンモニアタブ
	Hi シリカ-20P	コロイダルシリカ, 粒径 10~20nm, Na <sub>2</sub> O 0.35%以下 SiO <sub>2</sub> 濃度 20~21%, pH4.0~6.0 比重(25°C)1.153, 粘度(25°C)20mPa·s 以下	強化土エンジニアリング	—	○	NO <sub>3</sub> で安定化
	Hi シリカ-30S	コロイダルシリカ, 粒径 7~10nm, Na <sub>2</sub> O 0.60%以下 SiO <sub>2</sub> 濃度 30~31%, pH9.0~10.5 比重(25°C)1.212, 粘度(25°C)10mPa·s 以下	強化土エンジニアリング	—	○	粒子径が小さい
	Hi シリカ-20G	コロイダルシリカ, 粒径 40~50nm, Na <sub>2</sub> O 0.40%以下 SiO <sub>2</sub> 濃度 20~21%, pH9.0~10.5 比重(25°C)1.128, 粘度(25°C)6mPa·s 以下	強化土エンジニアリング	—	○	粒子径が大きい
	MEYCO MP320T	コロイダルシリカ, Na <sub>2</sub> O 0.40%以下 SiO <sub>2</sub> 濃度 29~31%, pH9.5~10.5 比重(20°C)1.2, 粘度(20°C)10mPa·s 以下	BASF	—	○	海外製品
硬化促進剤	アクターα	中性の無機塩	強化土エンジニアリング	○	○	Hi シリカシリーズの硬化促進剤
	硬化剤 NC	中性の無機塩, pH7 比重(20°C)1.07, 粘度(20°C)1mPa·s 以下	BASF	—	○	MEYCO MP320T の硬化促進剤
練混ぜ水	—	水道水から蒸留水を精製	—	○	○	—

### (3) 目標とする性能

「2.2.1(3)目標とする性能」で示した通り、地層処分におけるグラウト材料の要求性能は確立していない。そこで、岩盤の亀裂開口分布に関する既往研究から、改良すべき亀裂開口幅と坑道内への湧水量の関係を整理（2007 年度）し、改良目標とすべき亀裂開口幅に関する要求湧水量の目安（表 2.3-2 参照）を設定した。

また、グラウト材料は高圧環境下にさらされるため、地下水に抵抗するための付着強度および、数十年程度の耐久性が要求される。本研究においては、表 2.3-2 に示す独自に設定した施工性、止水性、低アルカリ性に分類し、溶液型の性能を把握した。

表 2.3-2 室内試験における材料の要求値の目安

性 能			要求値の目安	
施工性	浸透可能な 亀裂開口幅 $b_{min}$	一般的な亀裂密度の時	$\leq 40\mu m$	(許容湧水量 : 数 L/分/100m)
		亀裂密度 10 本/m の時	$\leq 40\mu m$	(許容湧水量 : 10L/分/100m)
		亀裂密度 1 本/m の時	$\leq 40\mu m$	(許容湧水量 : 5L/分/100m)
		亀裂密度 0.1 本/m の時	$\leq 70\mu m$	(許容湧水量 : 10L/分/100m)
			$\leq 60\mu m$	(許容湧水量 : 5L/分/100m)
			$\leq 90\mu m$	(許容湧水量 : 10L/分/100m)
			$\leq 80\mu m$	(許容湧水量 : 5L/分/100m)
止水性	水圧に抵抗するための付着強度		明確な基準なし (高い方が望ましい)	
	地下水に対する物理化学的な耐久性		$\geq$ 数十年程度 (長い方が望ましい)	
	粘性		明確な基準なし (低い方が望ましい)	
	圧縮強度		明確な基準なし (高い方が望ましい)	
	乾燥収縮特性 (寸法安定性 : 乾燥収縮による変化率)		明確な基準なし (小さい方が望ましい)	
低アルカリ性	pH		$\leq 11$	

## (4) 配合選定手順

## 1) 2007 年度（基礎物性の把握）

2007 年度は、溶液型の適用性に関する予備検討として、各種溶液型のなかから耐久性のあるコロイダルシリカ（パーマロック AT）を抽出し、「基本物性（粘性・強度）」、「微小亀裂への浸透性」、「地下水に対する抵抗性」に係る試験を実施し、図 2.3-2 に示すフローに従い地層処分に適する配合を選定した。

- ① 硬化促進剤の添加量をパラメータとする 4 配合（ゲルタイム 5 分, 57 分, 105 分, 180 分）を選定。
- ② 低アルカリ性および強度の基本物性を把握するため「pH 試験」、「一軸圧縮強度試験」を実施。
- ③ ゲルタイムが 5 分の配合は現実的ではないため、これを除いた 3 配合を選定。
- ④ 浸透挙動検討のための基礎データを取得するため「粘性試験」、「ろ過試験（ろ過フィルターを用いた透過実験）」を実施。
- ⑤ ゲルタイムが 57 分の配合に着目し、強度特性、浸透性、および水圧に抵抗する付着強度を把握するため「三軸圧縮強度試験」、「平行平板を用いた透過実験」、パイプからの押し出し実験による「水圧抵抗性試験」を実施。

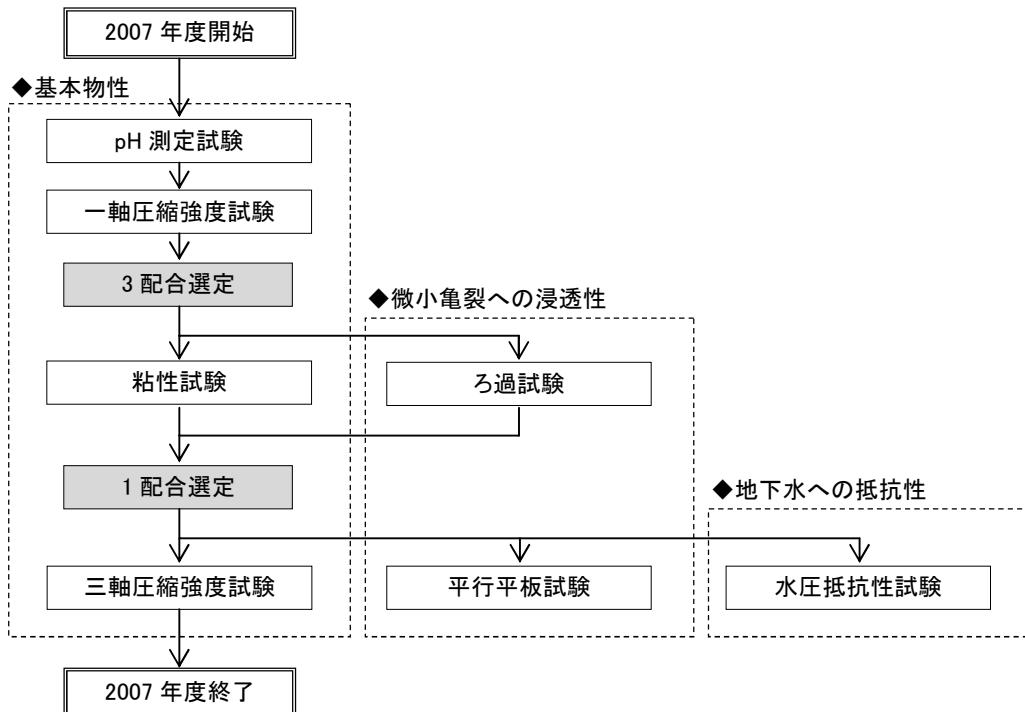


図 2.3-2 試験フロー（2007 年度）

## 2) 2008 年度（配合選定）

2008 年度は、コロイダルシリカの種類をパラメータとした 10 配合から、図 2.3-3 に示すフローに従い原位置への適用において最適と考えられる 4 配合を選定した。

- ① パーマロック AT の Hi シリカ (Hi シリカ 30) を含む 9 種類のコロイダルシリカを基に、シリカ濃度、表面の改質状況、シリカ粒径をパラメータとして 10 配合を選定。
- ② 10 配合に対して、ゲルタイムが 120 分（実際の施工を考慮した時間）となる硬化促進剤の添加量を求めるとともに、低アルカリ性を確認するため「ゲルタイム調整試験」、「pH 測定試験」を実施。
- ③ ゲル化しない配合を除いた 9 配合を選定。
- ④ 強度特性および収縮特性を把握するため「一軸圧縮強度試験」、「寸法安定性試験」を実施。
- ⑤ 9 配合の中から強度特性に優れた 4 配合を選定（二次選定配合）。
- ⑥ 強度特性、粘性および、地下水組成がグラウト材料に与える影響を把握するため「三軸圧縮強度試験」、「粘性測定試験」および、「地下水組成がグラウト材料に与える影響（強度およびゲル化特性への影響）の確認試験」を実施。
- ⑦ 強度特性にも優れ、地下水組成による影響の観点から総合的に優れる 2 配合を選定。
- ⑧ 2 配合に対して、水圧に対する抵抗力を把握するため「水圧抵抗性試験」を実施。
- ⑨ 二次選定配合に対して、ゲルの化学的安定性を把握するため、養生水（イオン交換水）に溶出するシリカ濃度を測定する「耐久性試験」を実施。

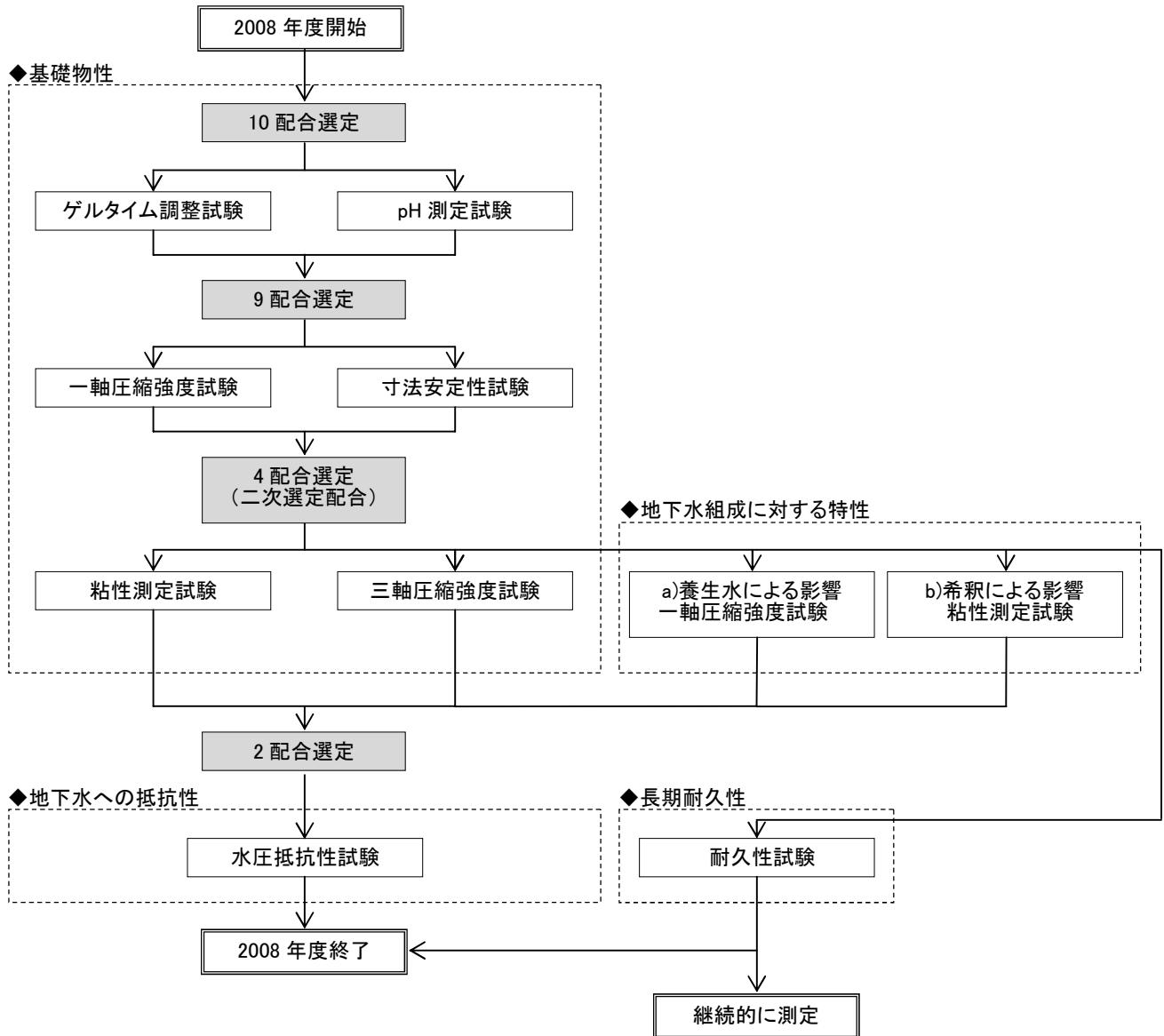


図 2.3-3 配合選定フロー（2008 年度）

### (5) 試験項目

試験項目一覧を表 2.3-3 に示す。なお、表中の配合番号の詳細については 2.3.2 で、各試験方法の詳細については 2.3.3 で述べる。

表 2.3-3 基礎物性試驗項目一覽

試験項目			試験方法	条件	実施状況																
					2007年度				2008年度												
					配合番号		配合番号														
						1	2	3	4	1・1	1・2	1・3	2・1	2・2	2・3	3・1	3・2	3・3			
(1)基礎物性試験	1)ゲルタイム調整試験		ゲルタイム	ゲルタイムを測定し、目標ゲルタイムに必要な硬化促進剤の添加量算定	目標ゲルタイム 120分	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
	2)pH測定試験		グラウト溶液のpH	ガラス電極式pHメーターにより測定	配合直後	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
	3)一軸圧縮強度試験	一軸圧縮強度	【JIS A1216:1998に準拠】	1日後 7日後 14日後 28日後	1日後	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○			
					7日後	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○			
					14日後	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					28日後	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○			
	4)寸法安定性試験	重量変化率 直径変化率 高さ変化率 密度変化率	一定期間養生した後の供試体を3種類の温度・湿度環境に暴露し、変化率を測定	20°C水中養生 湿度98%RH 湿度95%RH	20°C水中養生	-	-	-	-	○	○	○	○	-	○	○	-	-			
					湿度98%RH	-	-	-	-	○	○	○	○	-	○	○	-	-			
					湿度95%RH	-	-	-	-	○	○	○	○	-	○	○	-	-			
	5)粘性測定試験	降伏値 塑性粘度	レオメータによる静的測定 (コーンプレート型の治具)	練上5分後 10分後 20分後 30分後 40分後 50分後 60分後 80分後 100分後 120分後 140分後 160分後 180分後	練上5分後	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
					10分後	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					20分後	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					30分後	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					40分後	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					50分後	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					60分後	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					80分後	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					100分後	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					120分後	-	-	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					140分後	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					160分後	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					180分後	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					貯蔵弾性率 損失弾性率 複素粘度 位相角	レオメータによる動的測定 (コーンプレート型の治具)	練上～3時間後														
	6)ろ過試験	透過量	メッシュ幅10μmの透過量を測定	30分後 1日後 7日後 14日後 28日後	30分後	-	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					1日後	-	○	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-			
	7)三軸圧縮強度試験	粘着力 内部摩擦角	【JGS0521-2000に準拠】	7日後 14日後 28日後	7日後	-	○	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-			
					14日後	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					28日後	-	○	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-			
					7日後	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
8)平行平板試験	平行平板の透過時間		深さ25μm、幅46mm、長さ2000mmの平行平板透過状況を確認	配合直後	配合直後	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	a.養生水による影響 二軸圧縮強度試験				28日後	-	-	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-			
	b.希釈による影響 粘性測定試験				28日後	-	-	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-			
9)地下水組成による影響確認試験	a.養生水による影響 二軸圧縮強度試験		レオメータによる動的測定 (コーンプレート型の治具)	練上～3時間後	練上～3時間後	-	-	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-			
	b.希釈による影響 粘性測定試験				練上～3時間後	-	-	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-			
	c.希釈による影響 粘性測定試験				7日後	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
10)水圧抵抗性試験		付着強度	バイブを用いた押し出し試験により測定	28日後	28日後	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
					1日後	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	○	-	-			
11)耐久性試験			シリカ濃度および化学組成	養生水をICP発光分光分析装置およびイオンクロマトグラフィーシステムにより化学分析	1ヶ月毎	-	-	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-			

### 2.3.2 試験材料

### (1) 材料物性

各材料の物性は表 2.3-1 に示した通りである。

## (2) 練混ぜ方法

溶液型はコロイダルシリカ（A 液）に硬化促進剤を水に溶解させた B 液を混合することで作製する。B 液の作製の際には、粒状の硬化促進剤が溶解するまで 10 分間攪拌した。一方、A 液と B 液の混合については、セメント系材料と異なり懸濁液ではないため、練混ぜに要する時間を比較的短くし、1 分間とした。

なお、各材料は20°Cの恒温室に保管し、練上がり温度を20°Cとした。また、硬化後に養生が必要

要な試験体については、全て 20°C の恒温室にて水中養生を実施した。

### (3) 試験配合

2007 年度の試験配合は、表 2.3-4 に示す通り 320mL の Hi シリカ-30 に対し、異なるゲルタイム（5 分～180 分）を得るために硬化促進剤（アクターα）を 8.0g, 6.5g, 6.0g, 5.5g に振り分けた配合（配合番号 1～4）を用いた。ゲルタイムの定義は、グラウト材料を攪拌し、1mm 以下の気泡がグラウト材料中に留まる状態とした。

一方、2008 年度の試験配合は、コロイダルシリカの濃度、表面改質の影響、粒子径の影響を評価するため、表 2.3-1 に示した 9 種類のコロイダルシリカに対し、表 2.3-5 に示す 10 配合を検討し、後述するゲルタイム調整試験の結果から表 2.3-6 に示される配合に決定した。

表 2.3-4 2007 年度の基礎物性試験の配合一覧表

No.	Hi シリカ-30 (mL)	アクターα (g)	水 (mL)	pH	SiO <sub>2</sub> 濃度(%)		ゲルタイム (分)
					原材料	グラウト材料中	
1	320	8.0	76.00	9.02	30	24 程度	5
2	320	6.5	76.75	9.19	30	24 程度	57
3	320	6.0	77.00	9.17	30	24 程度	105
4	320	5.5	77.25	9.28	30	24 程度	180

表 2.3-5 2008 年度の検討配合一覧表（ゲルタイム調整前）

配合番号	コロイダルシリカの種類	粒子径 (nm)	SiO <sub>2</sub> 濃度 (%)		備考
			原材料	グラウト材料中	
1-1	Hi シリカ-20	10～20	20	16 程度	汎用品
1-2	Hi シリカ-30	10～20	30	24 程度	汎用品
1-3	Hi シリカ-40	15～20	40	32 程度	汎用品
2-1	Hi シリカ-20AL	10～20	20	16 程度	粒子表面に AL で修飾して安定
2-2	Hi シリカ-30B	10～20	30	16 程度に希釈	アンモニア タイプ
2-3	Hi シリカ-20P	10～20	20	16 程度	NO <sub>3</sub> で安定化
3-1	Hi シリカ-30S	7～10	30	24 程度	粒子径が小さい
3-2		7～10		16 程度に希釈	粒子径が大きい
3-3	Hi シリカ-20G	40～50	20	16 程度	海外製品
4	MEYCO MP320T	—	30	24 程度	汎用品
					海外製品

表 2.3-6 2008 年度の基礎物性試験の配合一覧表（ゲルタイム調整後、1000mLあたり）

配合番号		No1-1 Hi20	No1-2 Hi30	No1-3 Hi40	No2-1 20AL	No2-2 30B	No2-3 20P <sup>*1</sup>	No3-1 30S24%	No3-2 30S16%	No3-3 20G	No4 MP320T
シリカ	mL	800.00	800.00	800.00	800.00	500.00	NA	800.00	500.00	800.00	863.83
	g	905.60	970.40	1040.00	905.60	602.50	NA	969.60	606.00	902.40	1040.90
硬化 促進剤	mL	8.16	7.34	6.84	6.07	7.05	NA	6.19	7.80	11.66	0.00
	g	16.33	14.68	13.68	12.14	14.11	NA	12.37	15.60	23.31	0.00
水	mL	191.83	192.65	193.15	193.93	492.95	NA	193.83	492.20	188.35	136.20
	g	191.83	192.65	193.15	193.93	492.95	NA	193.83	492.20	188.35	145.73
シリカ 濃度	%	16.3%	24.7%	33.4%	16.3%	16.3%	NA	24.7%	16.3%	16.2%	28.1%

\*1：配合 No.2-3 に関してはゲル可能な配合を選定できず。

### 2.3.3 試験方法

#### (1) 基礎特性試験

##### 1) ゲルタイム調整試験（2008 年度実施分）

ゲルタイム調整試験は、表 2.3-5 に示す全 10 種類の検討配合を対象に実施した。コロイダルシリカに対して、硬化促進剤（アクターα または硬化剤 NC）の添加量を変化させゲルタイムを測定した。測定結果からゲルタイムが 120 分に対応する添加量を線形補間により求めた。

##### 2) pH 測定試験

pH 測定試験は、全配合に対して練混ぜ直後に、ガラス電極式 pH メータにより pH を測定した。

##### 3) 一軸圧縮強度試験

JIS A1216:1998 に従って一軸圧縮強度試験を実施した。一軸圧縮試験に用いる供試体は写真 2.3-1 に示すように、直径 5cm、高さ 10cm の円柱であり、所定の時間水中養生することで作成する。2007 年度の試験は、表 2.3-4 に示す配合全てを対象として、材齢 1 日、7 日、14 日、28 日で実施した。2008 年度の試験は表 2.3-6 に示す配合のうち No.2-3 を除く 9 種類を対象として、材齢 1 日、7 日、28 日で実施した。なお、試験時の圧縮速度は 1mm/分（ひずみ速度 1%/分）とした。



写真 2.3-1 一軸圧縮試験の載荷状況（2007 年度，配合 2，材齢 7 日）

#### 4) 寸法安定性試験（2008 年度実施分）

寸法安定性試験は、グラウト材料種類や配合の違いが収縮特性に与える影響を把握するために実施した。試験仕様を以下に示す。

##### i. 試験配合

試験に用いた配合は、表 2.3-6 に示した供試体の作製が可能（ゲル化可能）な 9 配合を対象とした。

##### ii. 養生環境

作製した供試体を写真 2.3-2 に示すように 20°Cで水中養生，湿度 98%RH，湿度 95%RH の計 3 種類の環境に暴露した。湿度 50%RH の環境において試験を実施する予定であったが，暴露した数時間後から表面が乾燥収縮し，ひび割れが発生した。このため，湿度を変化させて 1 日後の供試体の様子を観察し，湿度が 80%RH 以下の供試体ではひび割れが発生することが確認された。本試験における恒温恒湿槽の湿度設定は，装置の保証範囲となる 98%RH，95%RH とした。



写真 2.3-2 寸法安定性試験の養生状態（左；水中養生，右；恒温恒湿槽）

### iii. 測定項目と方法

試料は練混ぜ 1 日後に脱型し、重量と寸法（直径、高さ）を測定して初期値とした。水中養生または恒温恒湿槽に静置した時点を開始時間とし、所定の時間（1 週間後、2 週間後、1 ヶ月後）を目安に寸法と重量を測定した。測定結果から、重量、直径、高さおよび、密度の変化率を算出した。

#### 5) 粘性測定試験

##### a. レオメータによる「静的」測定（2007 年度実施分）

2007 年度の粘性測定試験は、配合番号 2～4 の 3 種類を対象として、写真 2.3-3 に示す Anton Paar 社製レオメータ Physica MCR301 を使用してレオロジー特性を把握した。

本装置には表 2.3-7 に示すようなコーンプレート型と共軸二重円筒型等の測定治具が用意される。適切な手法を選定するため予備測定を行った。共軸二重円筒型ではゲル化後のアップカーブにおける降伏値が測定できず、また、低せん断速度領域においてデータのバラツキが見られたため、本測定ではコーンプレート型を採用した。

本測定ではせん断速度とせん断応力の関係（流動曲線）および、粘性を静的に測定し、溶液型の浸透挙動検討（Gustafson & Stille (2005) モデルへ組み入れ）のための基礎データとした。

粘性測定は、以下の要領で実施した。

- ・せん断速度制御：0.01～200 (1/s)，対数昇降
- ・測定点：1 回の昇降につき 60 点（1 秒間隔）
- ・測定回数：アップカーブ、ダウンカーブを 1 回測定
- ・測定開始時間：配合番号 2 の試料は配合後 5 分、10 分、20 分・・・(10 分間隔)  
配合番号 3, 4 の試料は配合後 5 分、20 分、40 分・・・(20 分間隔)



写真 2.3-3 Anton Paar 社製レオメータ Physica MCR301

表 2.3-7 レオメータの測定治具の概要

	コーンプレート型	共軸二重円筒型
写真		
模式図		
特徴	接触面すべてにおいて一様なせん断速度を載荷できるため精度が良い。ただし、懸濁液の場合は粒子が詰まり精度が悪くなる場合がある。	接触面積が大きいため低粘度のスラリーの測定に適しているが、半径方向に一様なせん断速度ではない。

### b. レオメータによる「動的」測定（2008 年度実施分）

2008 年度の粘性測定試験は、二次選定配合の 4 種類（配合番号 1-2, 2-1, 3-1, 4）を対象として、2007 年度と同じく Anton Paar 社製レオメータ Physica MCR301 を使用してレオロジー特性を把握した。

ゲル化する材料はせん断を加えることでゲルが破壊し、本来の特性を把握できない可能性がある。このため、ゲル化する物質の粘性変化を計測する場合は、非常に小さいせん断ひずみを与えられる動的粘性測定が行われるのが一般的である。そこで、2007 年度の静的な粘性測定方法を変え、表 2.3-8 に示す仕様で動的粘性測定を行った。

表 2.3-8 2008 年度の粘性測定試験の仕様

設定項目	設定値
測定振動数	1Hz
せん断ひずみ	5%
測定間隔	60 s
測定回数	180 点（3 時間） ただし、地下水影響の試験では 240 点（4 時間）
測定項目	貯蔵弾性率、損失弾性率、複素粘度、位相角

### 6) ろ過試験（2007 年度実施分）

ろ過試験は、写真 2.3-4 に示すように 400mL の溶液型に 0.01MPa の圧力を載荷して、写真 2.3-5 に示す見開き量 10μm のメンブレンフィルターを通過させ、メッシュ透過性を確認した。試験配合は、配合番号 2, 3, 4 の 3 種類を対象とし、コロイダルシリカ（Hi シリカ）のみの配合（表 2.3-9）および、低濃度（水セメント比 10）の超微粒子セメントの配合（表 2.3-10）も比較用に試験を実施した。

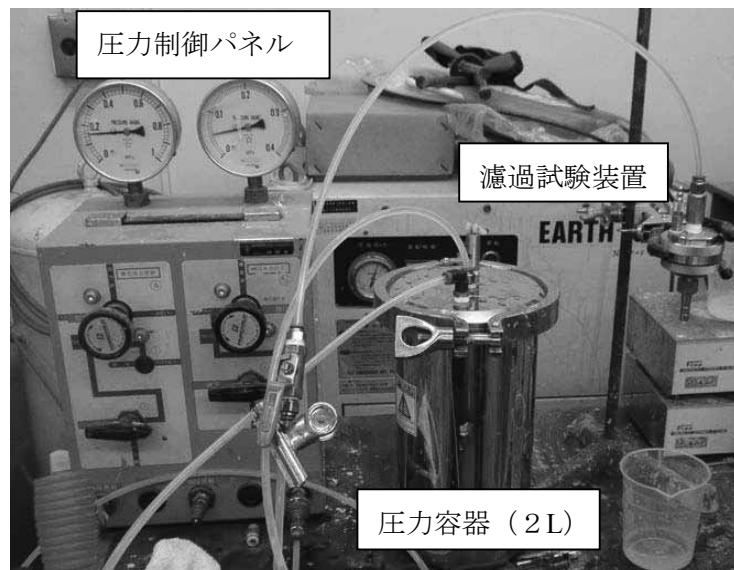


写真 2.3-4 ろ過試験装置全体



写真 2.3-5 ろ過試験装置とろ過フィルター（見開き量 10μm）

表 2.3-9 ろ過試験に用いた溶液型の配合

配合番号	pH	予想ゲルタイム (min)	粘度測定値 (mPa·s)
HI シリカ	—	∞	6.5
2	9.19	57	2.3
3	9.17	105	2.3
4	9.28	180	2.6

表 2.3-10 比較用の超微粒子セメントの配合

セメント	水セメント比	分散材	pH	粘度測定値 (mPa·s)
超微粒子セメント アロフィックス MC	10	1%	12.0	1.3

## 7) 三軸圧縮強度試験

地盤工学会規準 JGS0521-2000 に従って三軸圧縮強度試験を実施した。三軸圧縮試験に用いる供試体は写真 2.3-6 に示すように直径 5cm, 高さ 10cm の円柱であり, 所定の時間水中養生することで作成する。2007 年度の試験は, 配合番号 2 のみを対象とし, 材齢 1 日, 7 日, 14 日, 28 日に対して拘束圧 25, 50, 100kPa の 3 水準で行った。一方, 2008 年度の試験は, 強度特性に優れた二次選定配合の 4 種類を対象とし, 材齢 1 日, 7 日, 28 日に対して拘束圧 50, 100, 150kPa の 3 水準で実施した。なお, 試験時の圧縮速度は 1mm/分 (ひずみ速度 1%/分) とした。



写真 2.3-6 三軸圧縮試験の載荷状況（2007 年度，配合 1，材齢 7 日，拘束圧 100kPa 時）

#### 8) 平行平板試験（2007 年度実施分）

平行平板試験は、溶液型の浸透性能を把握することを目的として実施した。試験装置には、深さ 25μm、幅 46mm、長さ 2,000mm のスリットが設けられており、装置端部に深さ 5mm 程度のテープ一部を設けることでスムーズな注入が可能となった。

本実験では、配合番号 2、比較用として表 2.3-10 と同じ超微粒子セメント（水セメント比 10）の配合および、水道水を用いた。これら 3 種類の流体を、浸透区間 500mm、注入圧力 0.5MPa で注入することにより、透過性を確認した。

#### 9) 地下水組成がグラウト材料に与える影響確認試験（2008 年度実施分）

グラウト材料硬化後の地下水（養生水）の種類による強度の違いを確認した。また、硬化前のグラウト材料の地下水希釈に伴うゲル化特性（ゲルタイム）の変化を確認した。各試験は強度特性に優れる二次選定配合の 4 種類を用いて実施した。以下に試験方法を示す。

##### a. 養生水の種類による強度特性への影響確認試験

供試体を浸漬する養生水は、様々な地下水環境を想定し、①塩水系地下水（人工海水）、②pH13 程度の高アルカリ水（超微粒子セメントのブリーディング水）とした。各配合の供試体を、これらの養生水、および③イオン交換水にそれぞれ 28 日間浸漬した後、一軸圧縮強度試験（2.3.3 (1) 3) に示した方法と同等）を行い比較した。以下に、作製した養生水の仕様を示す。

##### ① 塩水系地下水

試験に用いる塩水系地下水として人工海水（八洲薬品：金属腐食試験用アクアマリン、pH=8.2）を作製した。表 2.3-11 に製品に添付された資料から抜粋した成分表を示す（アクアマリンは、通常 pH=8.2 程度に調整して用いるが、今回の試験では pH=9.02 程度に調整した）。写真 2.3-7 に養生

状態を示す。

表 2.3-11 アクアマリンの成分表（製品添付資料より抜粋）

成分	内容量 (g)
塩化マグネシウム (6水塩)	222.23
塩化カルシウム (2水塩)	30.70
塩化ストロンチウム (6水塩)	0.85
塩化カリウム	13.89
炭酸水素ナトリウム	4.02
臭化カリウム	2.01
ホウ酸	0.54
フッ化ナトリウム	0.06
塩化ナトリウム	490.68
硫酸ナトリウム (無水)	81.88



写真 2.3-7 アクアマリン（左）と養生状態(pH=9.02)

## ② pH13程度の高アルカリ水（超微粒子セメントのブリーディング水）

試験に用いる pH13 程度の高アルカリ水は、水セメント比 1.0 の超微粒子セメントを練混ぜ、そのブリーディング水を採取した。表 2.3-12 に超微粒子セメントの配合表を、写真 2.3-8 に養生状態を示す。

表 2.3-12 超微粒子セメントの配合

水セメント比	配合(kg)			体積(L)	重量(kg)	比重	1L 当りのセメント量(kg/L)
	セメント	水	分散剤				
1.0	25	25	0.25	33.33	50	1.50	0.75

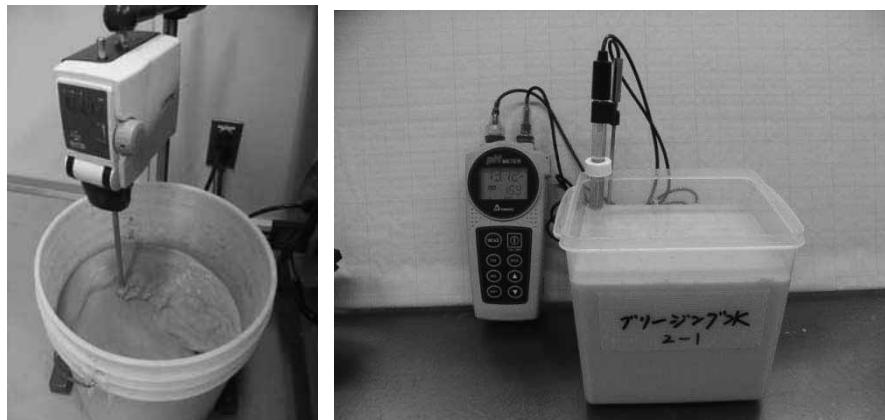


写真 2.3-8 超微粒子セメントグラウト材料の作製状況と養生状態(pH=13.1)

#### b. 地下水の希釈によるゲル化特性(ゲルタイム)への影響確認試験

溶液型が様々な地下水環境によって希釈された場合のゲル化特性を把握するため、希釈したグラウト材料を対象とし、5) b 節に示した方法と同様に粘性の「動的」測定試験を行った。なお、希釈水は養生水に用いた①塩水系地下水、②超微粒子セメントのブリーディング水、③イオン交換水の3種類とし、添加量はそれぞれ溶液型に対して 10vol%とした。

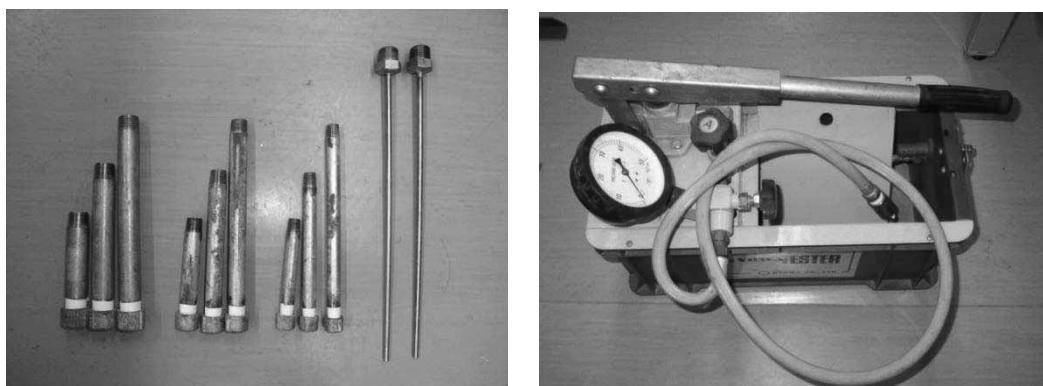
#### 10) 水圧抵抗性試験

##### a. パイプを用いた押し出し試験（2007 年度実施分）

###### i. 実験概要

2007 年度の水圧抵抗性試験では、配合番号 2 を試験対象とし、所定の内径、長さの鋼管に詰め、材齢 7 日および 28 日の時点で水圧により押し出し、水圧抵抗性に関するメカニズムを検討した。

試験に用いたパイプと注入装置（高圧用）を写真 2.3-9 に、実験の概要図を図 2.3-4 に示す。また、各パイプの諸元は表 2.3-13 の通りである。



(左から、1/2 インチ、3/8 インチ、1/4 インチ、5mm)

写真 2.3-9 押出し試験用のパイプと注入装置

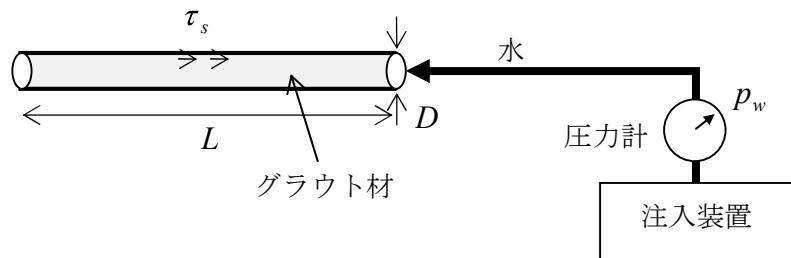


図 2.3-4 押出し実験の概要図

表 2.3-13 パイプの諸元

管の呼び径	内径(mm)	長さ(mm)	本数	養生期間(日)
1/2 インチ	16.7	100, 150, 200	各 1 本, 計 3 本	7, 28
3/8 インチ	12.8	100, 150, 200	各 1 本, 計 3 本	7, 28
1/4 インチ	9.1	100, 150, 200	各 1 本, 計 3 本	7, 28
5mm	5	300	計 2 本	7, 28

## ii. 破壊モデルの検討

図 2.3-4 の検討モデルから、グラウト材料抜け出し時のせん断抵抗を以下の式により評価した。

$$\frac{\pi D^2}{4} \cdot p_w = \pi D \cdot L \cdot \tau_s \quad (\text{式 2.3-1})$$

$$\tau_s = \frac{D}{4L} \cdot p_w \quad (\text{式 2.3-2})$$

## iii. 地下水に対する流出抵抗性の試算

パイプ押し出し試験の結果、図 2.3-5 に示す地下水に対する流出抵抗性のモデルを用い、地下水圧とグラウト材料の付着強度のつり合いから必要改良範囲に関する試算を実施した。

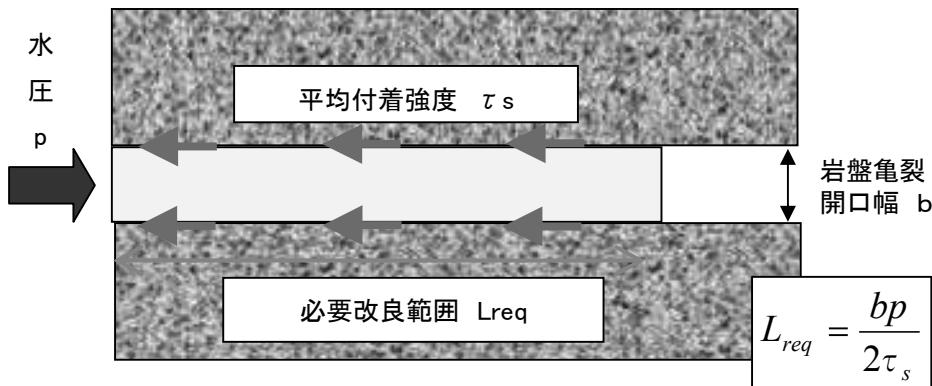


図 2.3-5 地下水に対する流出抵抗性の試算モデル

## b. 平行平板を用いた押し出し試験（2008 年度実施分）

### i. 試験概要

2008 年度の水圧抵抗性試験は、岩盤亀裂を模擬した平行平板実験装置に溶液型を注入し、材齢 1 日の時点で水圧による押し出し実験を行った。平行平板のスリット幅は 50mm に固定し、スリット開口幅を 100, 200 $\mu\text{m}$  の 2 種類、スリット長さを 50, 100, 200mm の 3 種類とし、計 6 種類の平行平板試験を実施した。図 2.3-6 に平行平板実験装置の概要図を示す。

試験配合は、強度特性や地下水組成による影響の観点から総合的に優れていると判断した 2 配合（配合番号 1-2, 3-1）を対象とし、スリット開口幅 100 $\mu\text{m}$  における配合（強度）による違いを比較検証した。配合番号 1-2 についてはスリット開口幅 200 $\mu\text{m}$  でも実験を行い、亀裂開口幅による違いを比較検証した。また、注入範囲の違いにより、後述する高水圧に対する抵抗性の試算モデルを検証した。以上の試験条件および検討ケースを表 2.3-14 に示す。

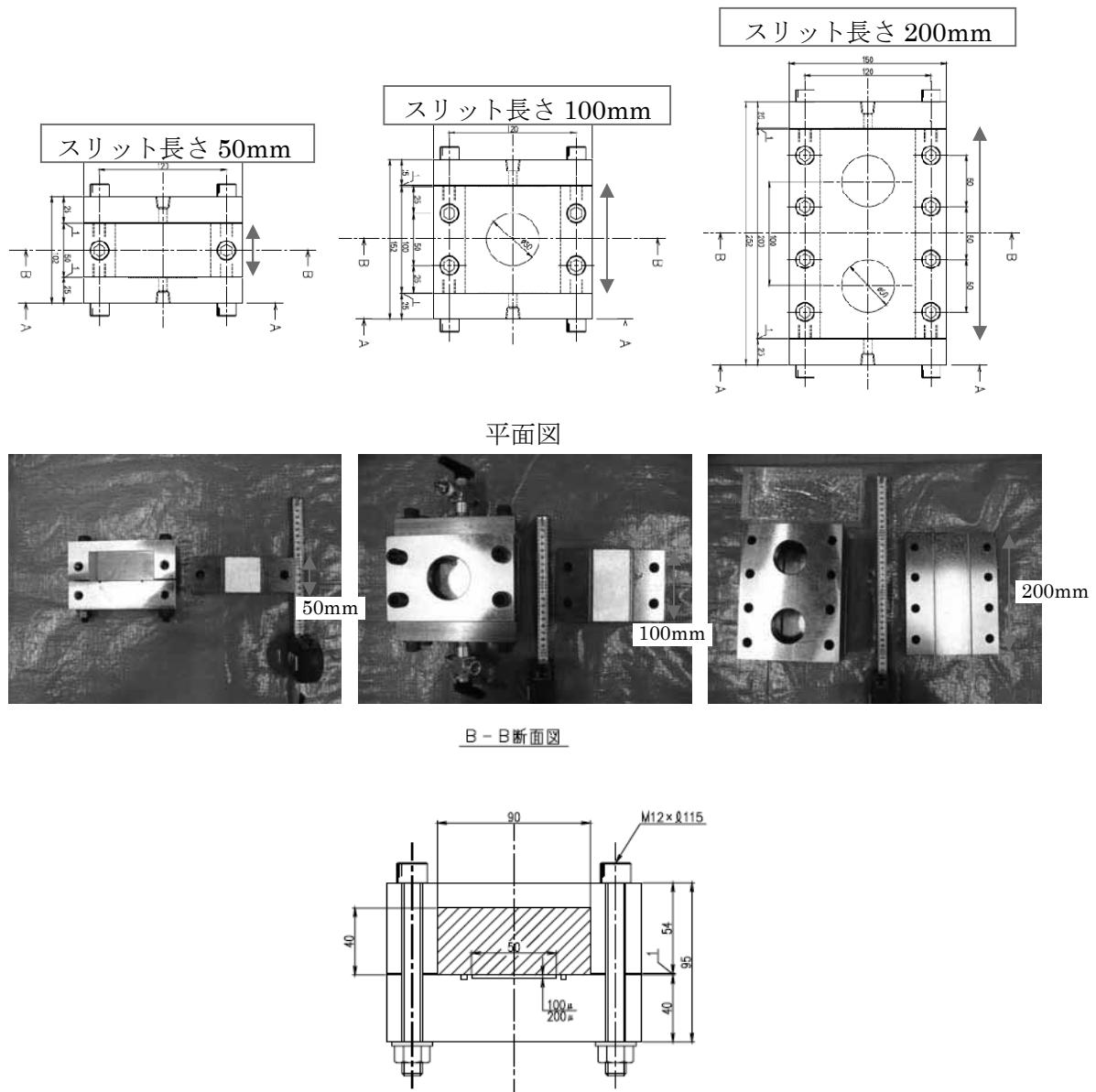


図 2.3-6 平行平板実験装置の概要図

表 2.3-14 水圧抵抗性試験の試験条件および検討ケース（2008 年度）

スリット開口幅	注入範囲	配合番号 1-2	配合番号 3-1	検討目的
100μm	50mm, 100mm 200mm	●	●	配合の違いを比較 破壊モデルを検証
200μm	50mm, 100mm 200mm	●		亀裂開口幅の違いを比較 破壊モデルを検証

## ii. 予備試験の概要

本試験に先立ち、平行平板実験装置の水理学的亀裂開口幅を計測するため予備透水試験を実施した。予備透水試験は表 2.3-14 に示す 6 条件の装置に対し、一定水圧  $P$  のもとで 3~4 回流量  $Q$  を観察した。なお、水理学的亀裂幅  $e$  は図 2.3-7 に示すモデルから以下の式(2.3-3)を誘導して求めた。

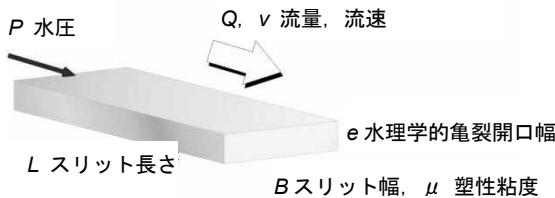


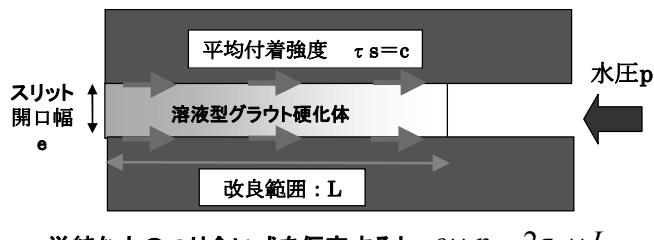
図 2.3-7 水理学的亀裂開口幅の算定モデル

$$e = \sqrt[3]{\frac{12\mu \cdot L \cdot Q}{P \cdot B}} \quad (\text{数式 } 2.3-3)$$

その結果、いずれの水理学的開口幅も装置の呼び寸法よりかなり小さい結果となった。これは、スリット幅に比べてスリット長さが短すぎるため、亀裂幅全体において層流状態となっていない可能性があったと考える。今後、圧力を 0.01MPa オーダーに低減するなどして再度確認する必要がある。

## iii. 高水圧抵抗性の検討モデルの検証

2007 年度と同様に、溶液型が高水圧により押し出される場合の検討を、図 2.3-8 に示す高水圧抵抗性の試算モデルにより実施した。押し出し試験で得られた破壊時の水圧と、この水圧を破壊モデルに代入して算定した付着強度（せん断強度）の関係から、モデルの妥当性を検証した。



$$\text{単純な力のつり合い式を仮定すると } e \times p = 2\tau_s \times L$$

図 2.3-8 高水圧抵抗性の試算モデル

### 11) 耐久性試験（2008 年度実施分）

耐久性試験は、強度特性に優れる二次選定配合の 4 種類（配合番号 1-2, 2-1, 3-1, 4）を対象とし、地下水に溶出するシリカ濃度等を測定してゲルの化学安定性を検証した。

まず、密閉可能な容器（栓付 200mL メスフラスコ、写真 2.3-10 参照）の中に、溶液型を練混ぜ後に 100mL 投入してゲル化させた。1 日経過後にイオン交換水を 100mL 投入し、全体を 200mL にして 20°C の恒温室で養生した。その後、1 ヶ月ごとに液相を採取し、シリカ濃度および化学組成を測定する。また、採取後は同量の作用水（イオン交換水）を新規に投入し再度養生した。化学組成の測定項目と試験方法を表 2.3-15 に示す。また、写真 2.3-11 に分析装置の写真を示す。

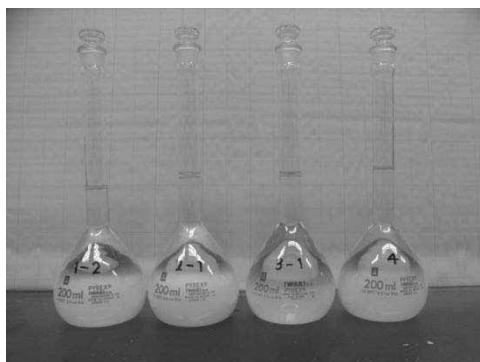


写真 2.3-10 試料の作製状況

表 2.3-15 測定項目と試験方法

対象	試験方法（分析装置）
全シリカ濃度	ICP-AES
Na	ICP-AES
K	ICP-AES
Cl	イオンクロマトグラフ法



(左；ICP 発光分光分析装置(SPS7800), 右；イオンクロマトグラフィーシステム(ICS3000))

写真 2.3-11 分析装置

### 2.3.4 試験結果

#### (1) 基礎特性試験

##### 1) ゲルタイム調整試験（2008 年度実施分）

配合番号 1-1～3-3 に対し、硬化促進剤（アクター $\alpha$ ）の添加量を変化させたゲルタイム測定結果から、線形補間でゲルタイムが 120 分となる添加量を表 2.3-16 に示した。

配合番号 2-3 は一週間経過後もゲル化しなかつたため検討から除外した。また、配合番号 3-3 は、ゲルタイムを測定できたものの、1,200 分経過後の粘性が 20～40mPa・s 程度と低かったため、グラウト材料への適用性が低いことが予想された。

表 2.3-16 ゲルタイム調整試験結果および pH 測定結果 (Hi シリカのシリーズ)

配合番号	検討 ケース	Hi シリカ [mL]	アクタ ー $\alpha$ [g]	水 [mL]	pH	ゲル タイム (min)	ゲルタイム 120 分の 時のアクター $\alpha$ [g]
1-1	1	320	6.75	76.63	9.01	101	6.53
	2	320	6.50	76.75	9.02	123	
	3	320	6.00	77.00	9.02	215	
1-2	1	320	8.00	76.00	9.02	5	5.87
	2	320	6.50	76.75	9.19	57	
	3	320	6.00	77.00	9.17	105	
	4	320	5.75	77.13	8.99	134	
	5	320	5.50	77.25	9.28	180	
	6	320	4.00	78.00	9.30	1200 以上	
1-3	1	320	6.50	76.75	8.96	30	5.47
	2	320	6.00	77.00	9.08	72	
	3	320	5.50	77.25	9.13	114	
	4	320	5.00	77.50	9.00	228	
2-1	1	320	5.50	77.25	8.98	56	4.85
	2	320	5.00	77.50	8.77	74	
	3	320	4.50	77.75	8.93	232	
2-2	1	200	6.00	197.00	9.85	73	5.64
	2	200	5.80	197.10	9.89	85	
	3	200	5.50	197.25	9.93	152	
2-3	1	300	32.00	84.00	4.96	ゲル化せず	算定不可
3-1	1	320	6.00	77.00	9.45	36	4.95
	2	320	5.00	77.50	9.43	109	
	3	320	4.50	77.75	9.56	216	
3-2	1	200	6.50	196.75	9.40	88	6.24
	2	200	6.20	196.90	9.42	125	
	3	200	6.00	197.00	9.49	155	
3-3	1	320	10.00	75.00	8.91	45	9.32
	2	320	9.00	75.50	8.90	156	

また、配合番号 4 に対し、硬化促進剤（硬化剤 NS）の添加量を変化させたゲルタイム測定結果から、線形補間でゲルタイムが 120 分となる添加量を表 2.3-17 に示した。

表 2.3-17 ゲルタイム調整試験結果および pH 測定結果 (MEYCO MP32OT : 海外製品)

配合番号	検討 ケース	MP320T [g]	硬化剤 NC [g]	添加率 [%]	pH	ゲル タイム (min)	ゲルタイム 120 分 の時の硬化剤 NC [%]
4	1	393.40	78.68	20.0	9.56	25	14
	2	402.70	70.47	17.5	9.61	45	
	3	412.40	61.86	15.0	9.65	100	
	4	422.50	52.81	12.5	9.69	190	

以上より、配合番号 2-3 を除く 9 種類の配合でゲルタイムの調整が可能であった。各配合は表 2.3-6 の通りである。

## 2) pH 測定試験

2007 年度の pH 測定試験結果は、配合 1~4 で順に、9.02, 9.19, 9.17, 9.28 であった。また、2008 年度の pH 測定試験結果は、表 2.3-16 および、表 2.3-17 に示す通り 8.77~9.93 であった。溶液型は pH<11 の低アルカリ性を満足する。

## 3) 一軸圧縮強度試験

### a. 2007 年度試験結果 (配合番号 1~4)

一軸圧縮強度試験後の供試体の破壊状況 (2007 年度) を写真 2.3-12 に示す。材齢に係らず破壊形態は縦方向の割裂破壊であった。

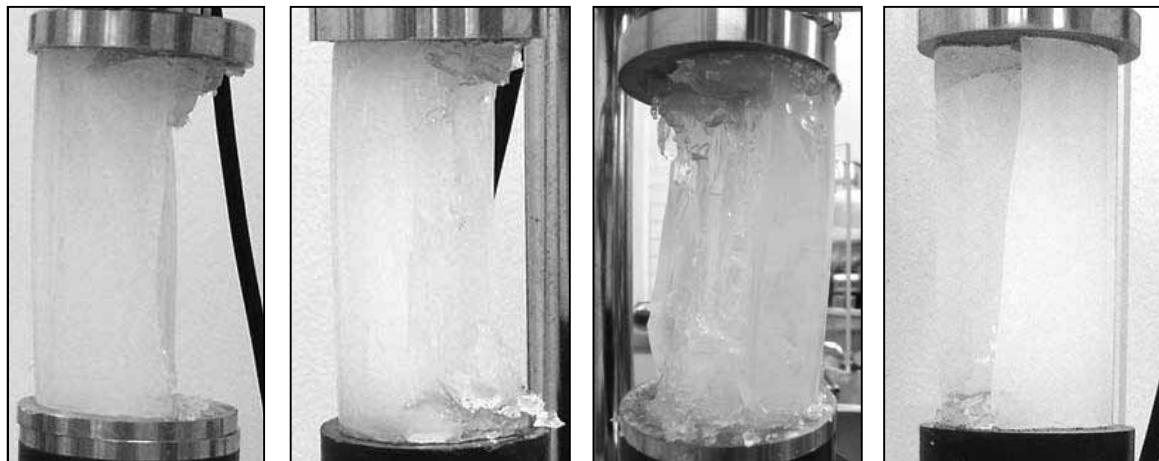


写真 2.3-12 破壊時の状況 (左から 1 日後, 7 日後, 14 日後, 28 日後)

応力～ひずみの関係を養生期間ごとに図 2.3-9 に示す。一軸圧縮状態では、破壊後に耐力が急減する脆性的な破壊形態を示す。

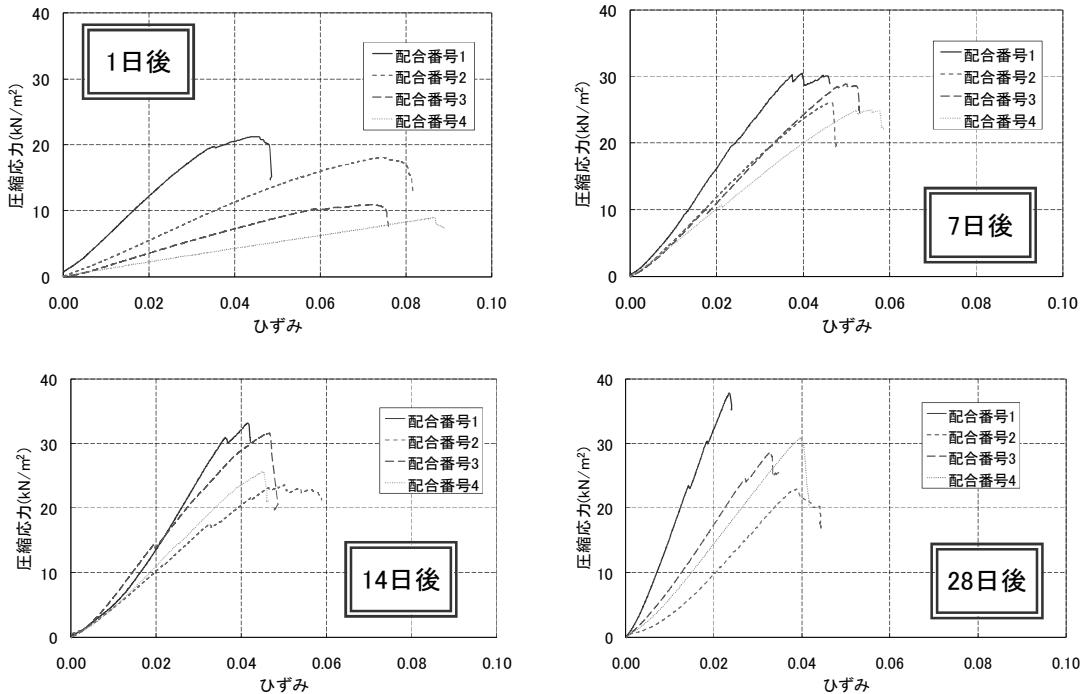


図 2.3-9 一軸圧縮強度試験における応力ーひずみ関係

最大圧縮応力と弾性係数を表 2.3-18, 表 2.3-19 に示し, 材齢による変化を図 2.3-10, 図 2.3-11 に示す。ゲルタイムの短い供試体ほど強度, 剛性が高くなる傾向があり, 材齢 7 日以降の強度増加量が少ない。

低アルカリ性セメントの 28 日強度が数 MPa 程度以上であり, 7 日以降に強度増加が少ないことを考えると, 本材料の最終強度はセメント系材料より劣る。しかし, 数時間で硬化せん断強度を発現するため, 初期強度には有利である。

表 2.3-18 一軸圧縮強度試験結果のまとめ (2007 年度) : 一軸圧縮強さ (単位 kN/m<sup>2</sup>)

材齢	配合番号 1	配合番号 2	配合番号 3	配合番号 4
1 日	21.2	15.2	11.0	9.1
7 日	30.3	26.1	13.1	9.2
14 日	33.2	23.6	31.6	25.7
28 日	37.8	22.9	28.7	30.9

表 2.3-19 一軸圧縮強度試験結果のまとめ (2007 年度) : 弾性係数 E<sub>50</sub> (単位 kN/m<sup>2</sup>)

材齢	配合番号 1	配合番号 2	配合番号 3	配合番号 4
1 日	615	234	184	109
7 日	811	602	442	164
14 日	728	516	713	568
28 日	1605	511	846	736

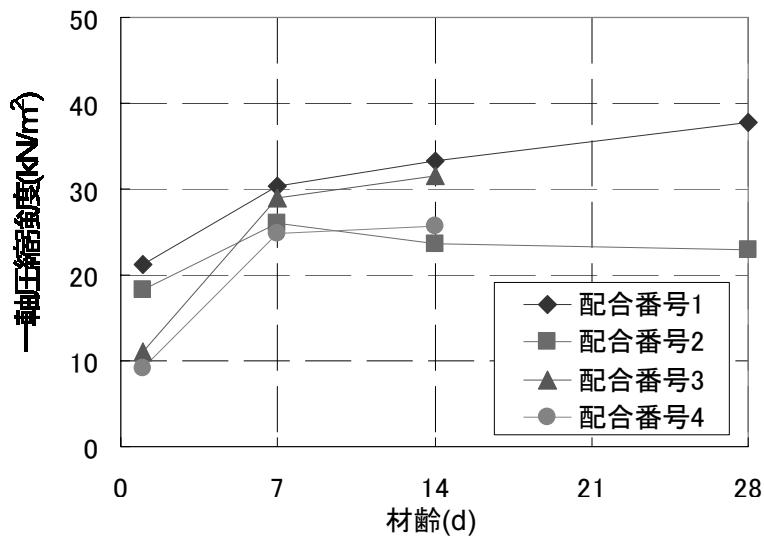
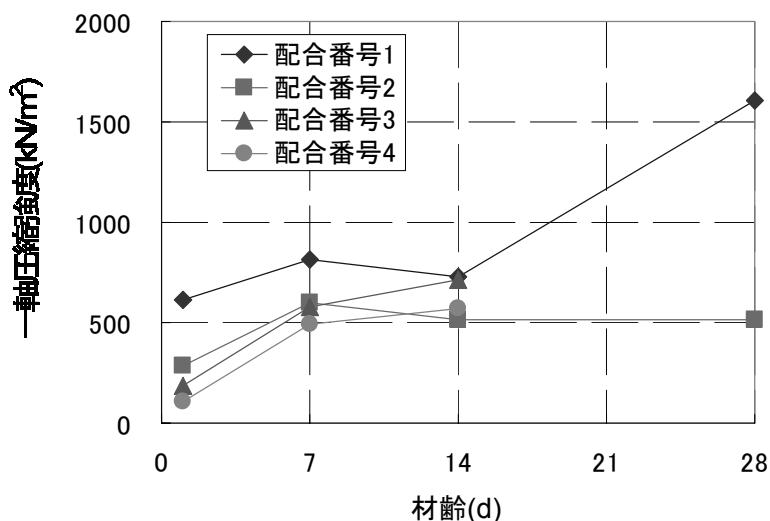


図 2.3-10 材齢と一軸圧縮強さの関係（2007 年度）

図 2.3-11 材齢と弾性係数  $E_{50}$  の関係（2007 年度）

### b. 2008 年度試験結果（配合番号 1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2, 3-3, 4）

2008 年度の試験結果を表 2.3-20, 表 2.3-21 に示し, それら平均値を配合別に比較したものを図 2.3-12, 図 2.3-13 に示す。

強度特性に優れる配合は配合 1-2, 3-1, 4 の 3 種類であり, 配合 3-1 の強度が高くなつた。比較的高濃度のコロイダルシリカを用いた配合 1-3 の強度は配合 1-2 より低く, 強度特性の観点から高シリカ濃度のコロイダルシリカを用いるメリットは確認できなかつた。強度の大きい配合は, 弹性係数も大きく, 両者の相関性も高い。

なお, 配合 3-3 は, 7 日後に供試体がゲル化したものの自立しなかつたため, 試験の実施を断念した。

表 2.3-20 一軸圧縮強度試験結果のまとめ（2008 年度）：一軸圧縮強さ（単位 kN/m<sup>2</sup>）

配合番号	グラウト材料中のシリカ濃度	1 日後		7 日後		28 日後	
		実験値	平均	実験値	平均	実験値	平均
1-1 (Hi20)	16.3%	7.2		11.6		16.5	
		6.2	6.2	11.8	11.4	17.1	16.7
		5.2		11.0		16.5	
1-2 (Hi30)	24.7%	18.9		26.3		36.9	
		17.1	18.2	27.6	26.2	32.7	36.5
		18.6		24.9		40.0	
1-3 (Hi40)	33.4%	17.2		22.6		32.9	
		17.3	16.3	14.9	18.5	34.5	33.5
		14.3		18.0		33.0	
2-1 (20AL)	16.3%	7.3		8.1		12.7	
		6.4	6.1	9.1	8.6	12.7	12.7
		4.7		8.6		12.6	
2-2 (30B)	16.3%	5.0		7.5		8.3	
		5.1	5.1	7.5	7.6	8.4	8.4
		5.1		7.7		8.5	
3-1 (30S24)	24.7%	27.0		46.9		59.4	
		31.2	30.7	58.4	54.4	67.6	60.0
		33.8		57.9		53.1	
3-2 (30S16)	16.3%	10.9		20.6		26.8	
		11.2	10.7	21.3	21.0	26.6	27.0
		10.1		21.0		27.7	
4 (MP320T)	28.1%	15.5		35.4		37.9	
		11.1	12.6	32.4	34.5	47.0	42.5
		11.2		35.8		42.7	

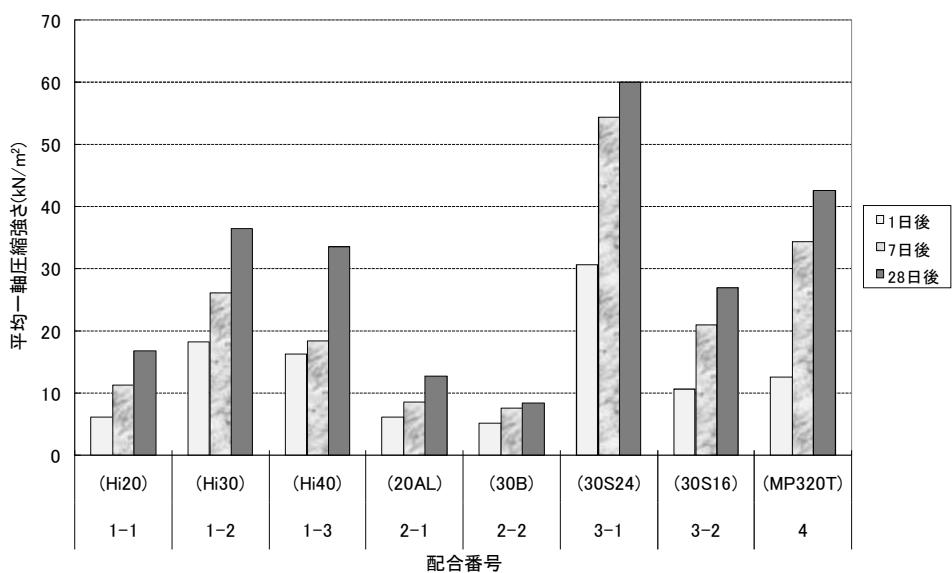


図 2.3-12 配合別の平均一軸圧縮強さの比較（2008 年度）

表 2.3-21 一軸圧縮強度試験結果のまとめ（2008 年度）：弾性係数  $E_{50}$ （単位  $\text{kN}/\text{m}^2$ ）

配合番号	グラウト材料中のシリカ濃度	1 日後	平均	7 日後	平均	28 日後	平均
1-1 (Hi20)	16.3%	77		199		323	
		76	74	188	192	328	
		71		190		327	
1-2 (Hi30)	24.7%	256		542		862	
		233	240	594	540	788	
		232		482		961	
1-3 (Hi40)	33.4%	157		465		849	
		165	159	416	433	754	
		155		416		798	
2-1 (20AL)	16.3%	66		145		232	
		65	63	148	145	209	
		58		142		236	
2-2 (30B)	16.3%	51		103		146	
		47	48	106	105	151	
		47		105		151	
3-1 (30S24)	24.7%	392		1203		1428	
		436	414	1156	1178	1558	
		413		1175		1548	
3-2 (30S16)	16.3%	155		392		567	
		142	146	359	370	533	
		140		358		546	
4 (MP320T)	28.1%	197		900		1317	
		226	197	847	863	1464	
		168		843		1603	

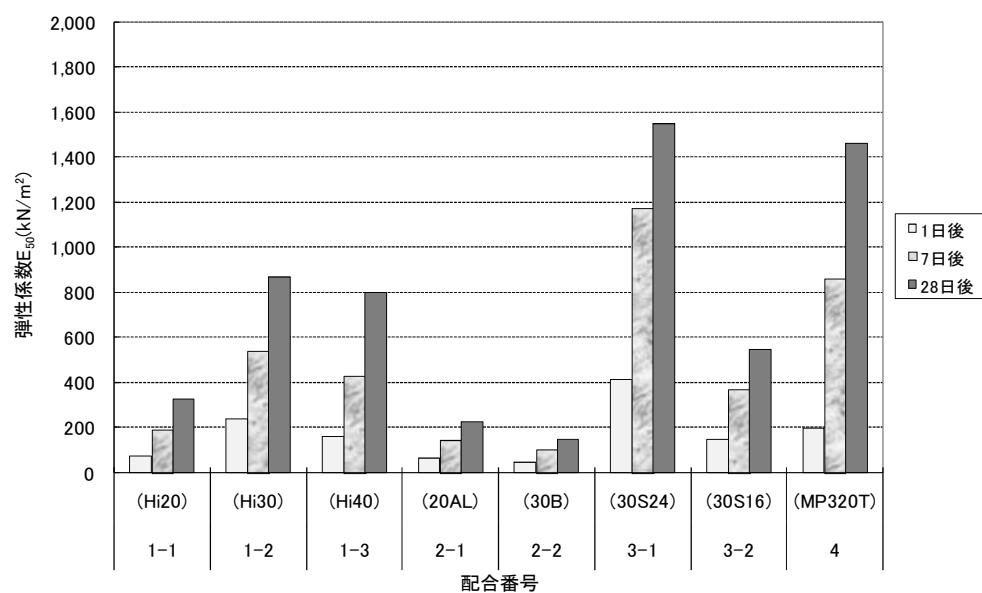


図 2.3-13 配合別の弾性係数の比較（2008 年度）

#### 4) 寸法安定性試験（2008 年度実施分）

温度 20°C で水中養生、湿度 98%RH, 95%RH の 3 種類の環境下で供試体（配合番号 1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2, 4 の 8 配合）を養生した場合の寸法安定性を確認した。

水中養生の場合はすべての供試体でほとんど変化がなかった。気中養生の場合は重量、体積ともに減少した。この変化は供試体中の水分が蒸発していることに起因しているものと考えられ、シリカ濃度が低いほど変化率が大きい。

#### 5) 粘性測定試験

##### a. レオメータによる「静的」測定試験結果（2007 年度実施分）

各配合の流動曲線の試験結果を、ここでは図 2.3-14 に示す流動の種類で表 2.3-22 の通り区別した。

2007 年度は静的に測定したため、ゲルタイムの定義が非常に曖昧となっていたが、仮に擬塑性流動の始まった時間をゲルタイムとすれば、配合番号 4 を除けば基本配合（表 2.3-4）で示した予想ゲルタイムとほぼ一致した（表 2.3-23）。

図 2.3-15 は表 2.3-22 でニュートン流体と判定される範囲での粘度の時間変化を示したものであり、ゲルタイムが近づくにつれ粘度が急激に上昇していることが確認できる。

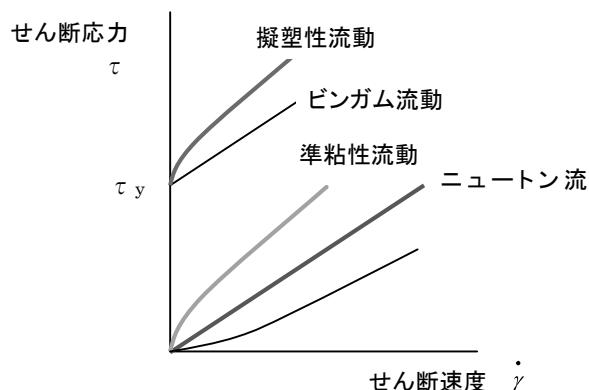


図 2.3-14 流動の種類

表 2.3-22 各配合における経過時間ごとの流動の種類分け（2007 年度）

経過時間 (分)	配合番号 2	配合番号 3	配合番号 4
	予想ゲルタイム 57 分	予想ゲルタイム 105 分	予想ゲルタイム 180 分
5	ニュートン流動	ニュートン流動	ニュートン流動
10	ニュートン流動	—	—
20	ニュートン流動	ニュートン流動	ニュートン流動
30	ニュートン流動	—	—
40	ニュートン流動	ニュートン流動	ニュートン流動
50	準粘性流動	—	—
60	擬塑性流動	ニュートン流動	ニュートン流動
80	—	準粘性流動	ニュートン流動
100	—	擬塑性流動	ニュートン流動
120	—	擬塑性流動	ニュートン流動
140	—	—	準粘性流動
160	—	—	擬塑性流動
180	—	—	擬塑性流動
200	—	—	擬塑性流動

表 2.3-23 実ゲルタイムと予想ゲルタイムの比較（2007 年度）

	配合番号 2	配合番号 3	配合番号 4
実ゲルタイム	50 分	100 分	140 分
予想ゲルタイム	57 分	105 分	180 分

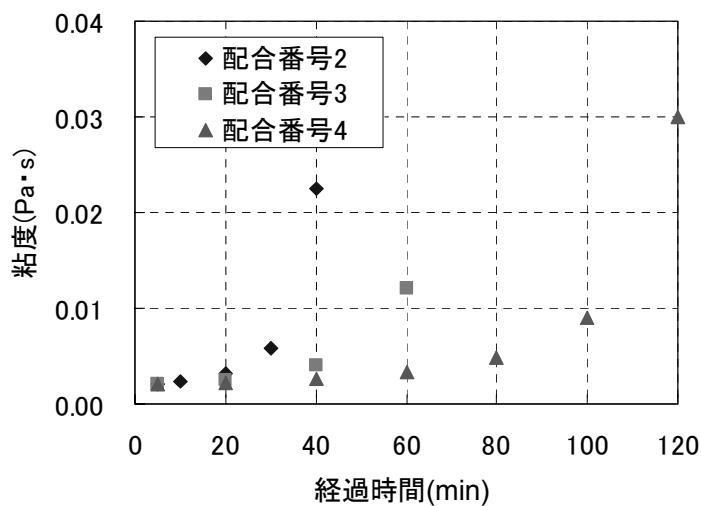


図 2.3-15 ニュートン流体時の粘度の経時変化（2007 年度）

### b. レオメータによる「動的」測定試験結果（2008 年度実施分）

4 種類の二次選定配合における貯蔵弾性率、損失弾性率、複素粘度、位相角の測定結果（経時変化図）を図 2.3-16 に示す。

全ての配合でゲルタイムが 120 分となるように調整したため、ゲル化したと判定される貯蔵弾性率と損失弾性率の大小関係が逆転する時間、複素粘度が急激に上昇する時間、および位相角が急激に 0 度に落ちる時間が 120 分程度であった。

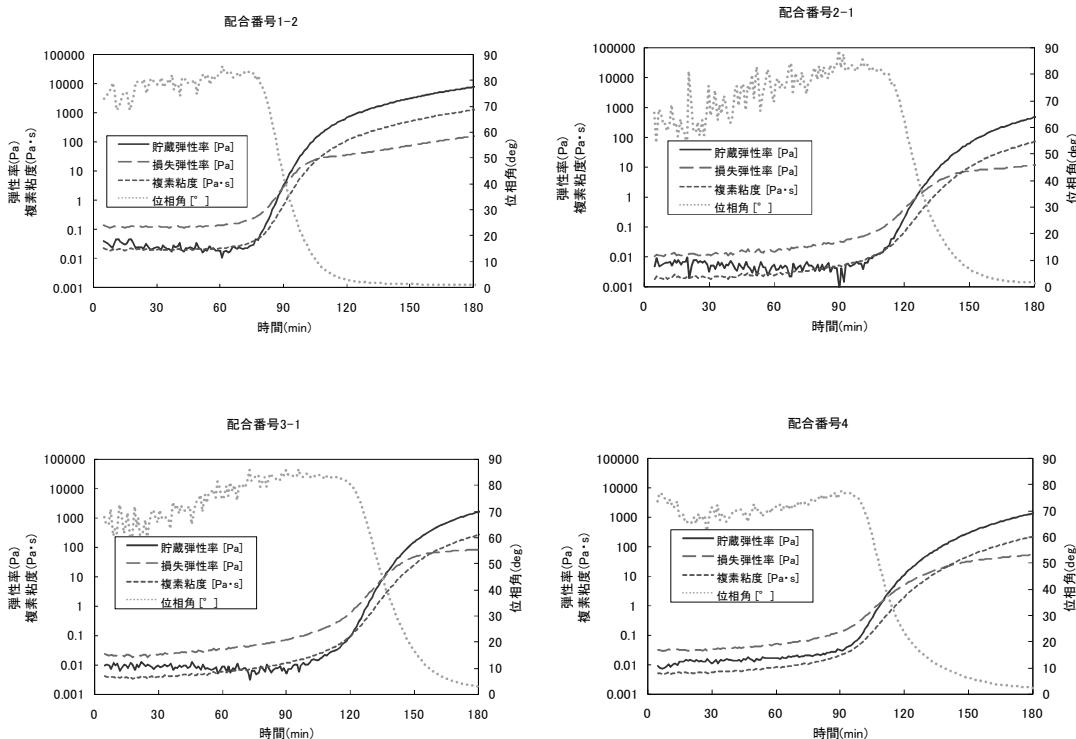


図 2.3-16 粘性の動的測定試験結果（2008 年度）

### 6) ろ過試験（2007 年度実施分）

透過開始から 3 分間の通過グラウト材料の浸透量の経時変化を図 2.3-17 に示す。

低アルカリ性セメントの配合、コロイダルシリカ（Hi シリカ）のみの配合および、配合番号 2～4 の配合のいずれにおいても、3 分間程度でグラウト材料の浸透量が大幅に低下し、ほぼ目詰まり状態に達した。

浸透性はゲルタイムが長い配合番号 4 が最も良く、Hi シリカ、配合番号 3、配合番号 2 の順に劣る。また、硬化促進剤（アクターα）の添加量が増えるほど、浸透性が低下する。

浸透後にろ過装置を分解し、フィルター上面を確認した結果を写真 2.3-13 および、写真 2.3-14 に示す。

全ての配合において、メッシュ上にシリカのゲル化物が生成した。このゲル化物が目詰まりの原因であるものと考えられ、微小亀裂の入り口において粒子の凝集等によりゲル化が促進している可能性がある。

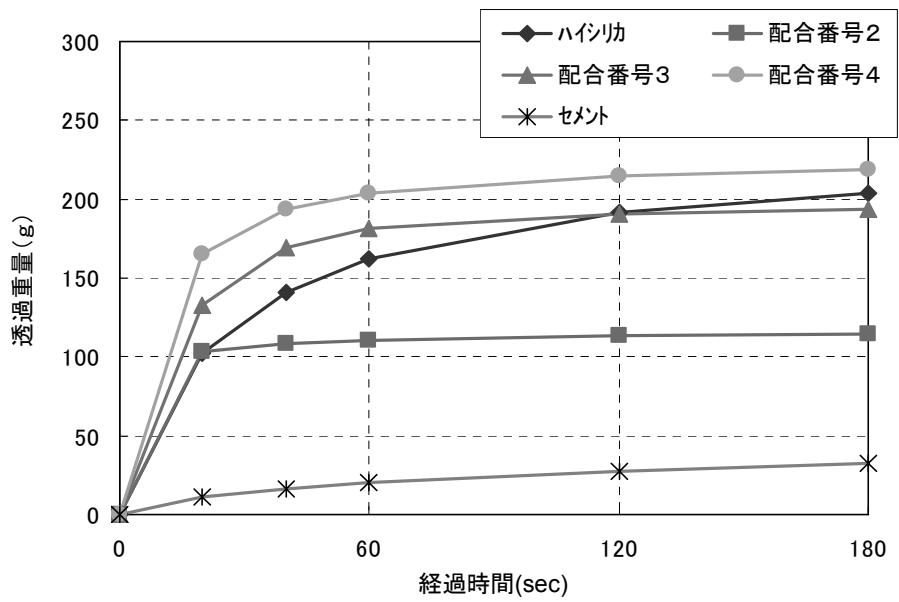


図 2.3-17 通過グラウト材料量



写真 2.3-13 溶液型（配合番号4）の透過後にできた堆積物



写真 2.3-14 超微粒子セメント透過後の状況（左）と透過したスラリー（右）

## 7) 三軸圧縮強度試験

### a. 2007 年度試験結果（配合番号 2）

2007 年度の三軸圧縮強度試験後の供試体の破壊状況を写真 2.3-15 に示し、三軸圧縮強度試験から得られたせん断応力とひずみの関係を養生期間ごとに図 2.3-18 示す。

供試体は一軸圧縮試験と異なり、せん断力により破壊されている。

強度は養生期間に応じて増加するが、7 日後以降の伸びは期待できない。7 日後以降の供試体はピーク強度をもつ破壊形態を示す。本材料は弱い拘束圧依存性がみられるものの、基本的に粘着力が支配的である。

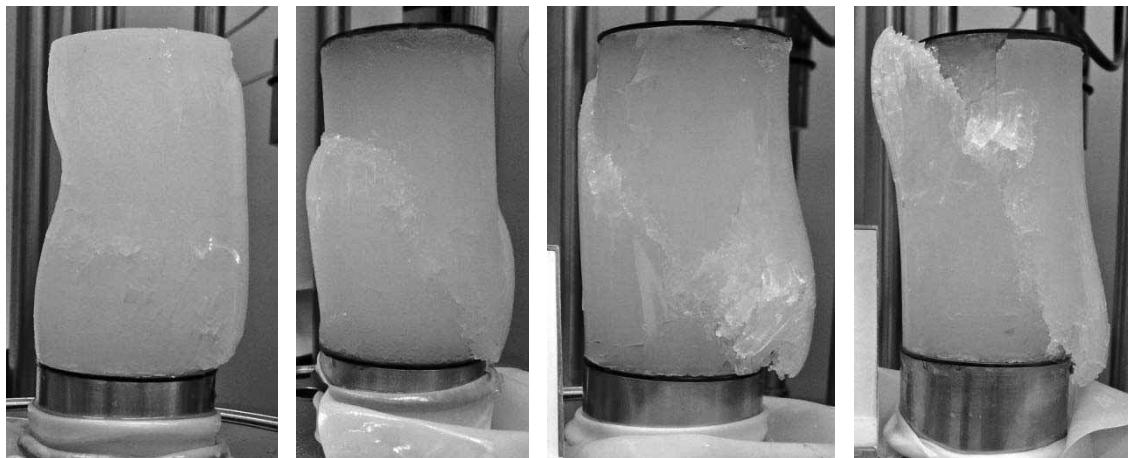


写真 2.3-15 三軸圧縮強度試験後の破壊状況（左より 1 日後、7 日後、14 日後、28 日後）

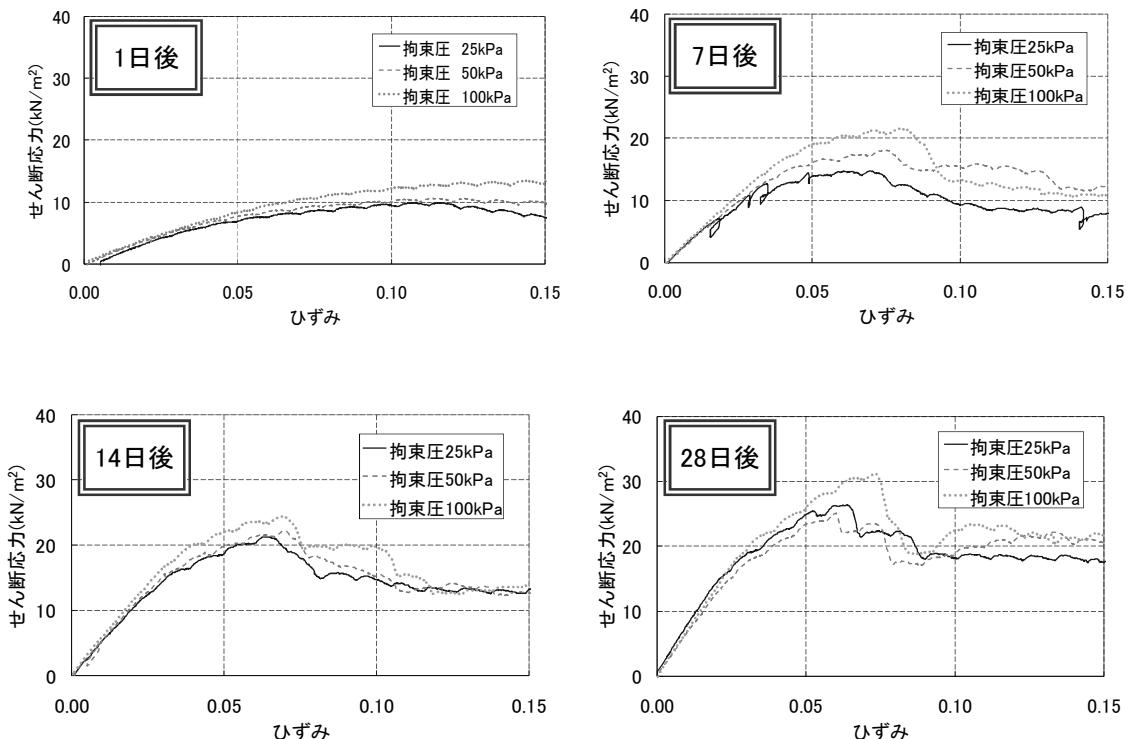


図 2.3-18 三軸圧縮強度試験におけるせん断応力-ひずみの関係（2007 年度）

b. 2008 年度試験結果（配合番号 1-2, 2-1, 3-1, 4）

2008 年度の三軸圧縮強度試験における最大せん断応力を表 2.3-24 に、これらの結果から描かれるモール円を図 2.3-19 に示す。

配合によりせん断強度の大小があるものの、最大せん断耐力は拘束圧に依存しない。このことから、三軸圧縮試験を行った範囲の拘束圧下では溶液型は内部摩擦角を持たない( $=0$ )材料と判断し、各配合の最大せん断応力を平均した値を、養生日数ごとの粘着力として表 2.3-24 に示した。

一軸圧縮強度に対して半分の値 ( $q_u/2$ ) と、粘着力を比較した結果を表 2.3-25 に示す。

材齢 28 日における三軸圧縮試験による粘着力は  $q_u/2$  の 1.4~1.6 倍程度であった。これは一軸圧縮試験では破壊形態が割裂破壊であったのに対し、三軸圧縮試験ではせん断破壊であり、破壊モードが異なることに起因するものと考える。

表 2.3-24 三軸圧縮強度試験 最大せん断応力のまとめ（2008 年度）

配合番号	グラウト材料中のシリカ濃度	拘束圧	1 日後		7 日後		28 日後	
			実験値 (kN/m <sup>2</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	実験値 (kN/m <sup>2</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	実験値 (kN/m <sup>2</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )
1-2 (Hi30)	24.7%	50kPa	16.5		19.3		27.9	
		100kPa	14.9	15.7	18.9	18.9	27.2	28.3
		150kPa	15.7		18.5		29.9	
2-1 (20AL)	16.3%	50kPa	6.5		8.8		9.2	
		100kPa	6.6	6.1	7.7	8.3	9.1	9.2
		150kPa	5.3		8.3		9.4	
3-1 (30S24)	24.7%	50kPa	27.0		34.5		48.7	
		100kPa	26.9	27.1	35.6	34.8	51.2	48.9
		150kPa	27.3		34.3		46.8	
4 (MP320T)	28.1%	50kPa	16.5		22.7		34.8	
		100kPa	16.7	16.4	22.4	22.0	33.7	34.7
		150kPa	16.0		21.0		35.6	

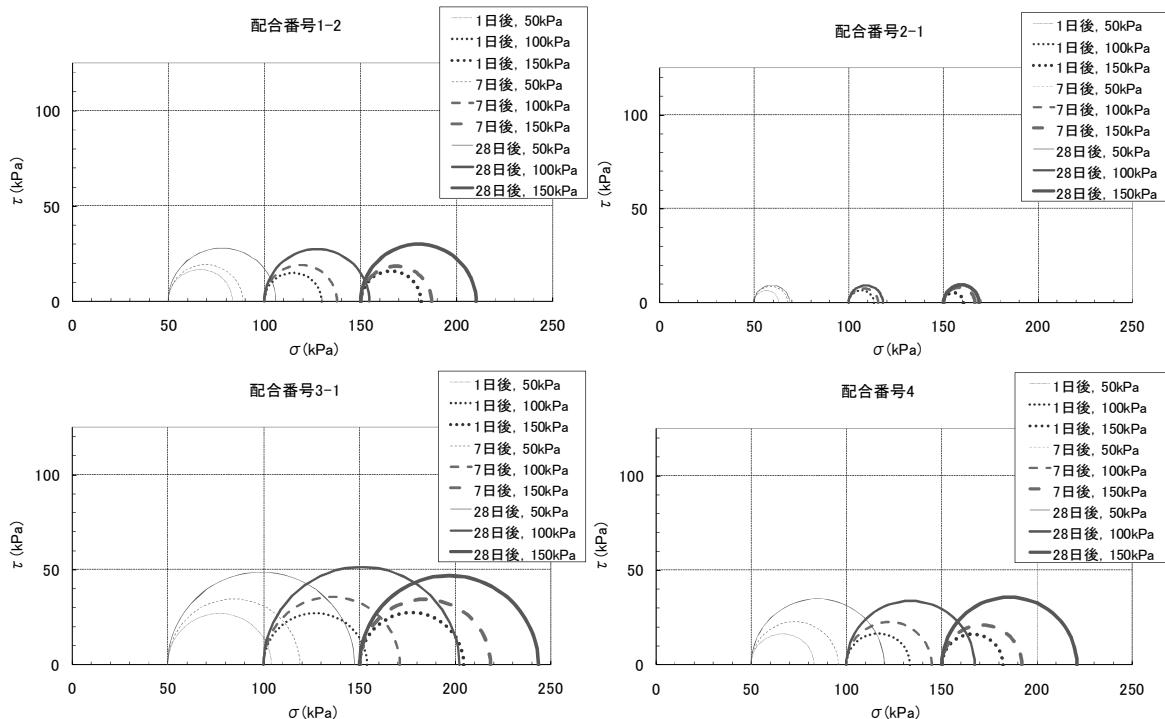


図 2.3-19 各配合におけるモール円 (2008 年度)

表 2.3-25 一軸圧縮強度試験結果と三軸圧縮強度試験結果の比較 (2008 年度)

材齢	1 日			7 日			28 日		
	配合番号	qu/2 (kN/m <sup>2</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	比率	qu/2 (kN/m <sup>2</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )	比率	qu/2 (kN/m <sup>2</sup> )	粘着力 (kN/m <sup>2</sup> )
1-2	9.1	15.7	1.7	13.1	18.9	1.4	18.3	28.3	1.5
2-1	3.1	6.1	2.0	4.3	8.3	1.9	6.4	9.2	1.4
3-1	15.4	27.1	1.8	27.2	34.8	1.3	30.0	48.9	1.6
4	6.3	16.4	2.6	17.3	22.0	1.3	21.3	34.7	1.6

### 8) 平行平板試験 (2007 年度実施分)

本試験では、配合番号 2、比較用として超微粒子セメント（水セメント比 10）の配合および、水道水の 3 種類の流体を用いた。

試験に用いたいずれの流体においても透過区間 500mm を 10 秒程度で透過したことから、浸透性の要求値の目安である 40μm を満足した。流体ごとの浸透性の違いは確認されなかった。

### 9) 地下水組成がグラウト材料に与える影響確認試験 (2008 年度実施分)

#### a. 養生水の種類による強度特性への影響確認試験

塩水系地下水、ブリーディング水（高アルカリ水）、イオン交換水により養生した各配合の供試体における一軸圧縮強さと弾性係数の試験結果を図 2.3-20、図 2.3-21 に示す。

塩水系地下水で養生した場合は、全配合においてイオン交換水で養生した場合より強度が高く、塩水系地下水に含まれる塩がゲルの強度を増加させた可能性がある。一方、ブリーディン

グ水に養生した場合は、強度が大きく低下した。

上記の傾向は、配合 4, 3-1, 1-2, 2-1 の順で強く、配合 2-1 が最も養生水の化学組成の影響を受けない結果となった。

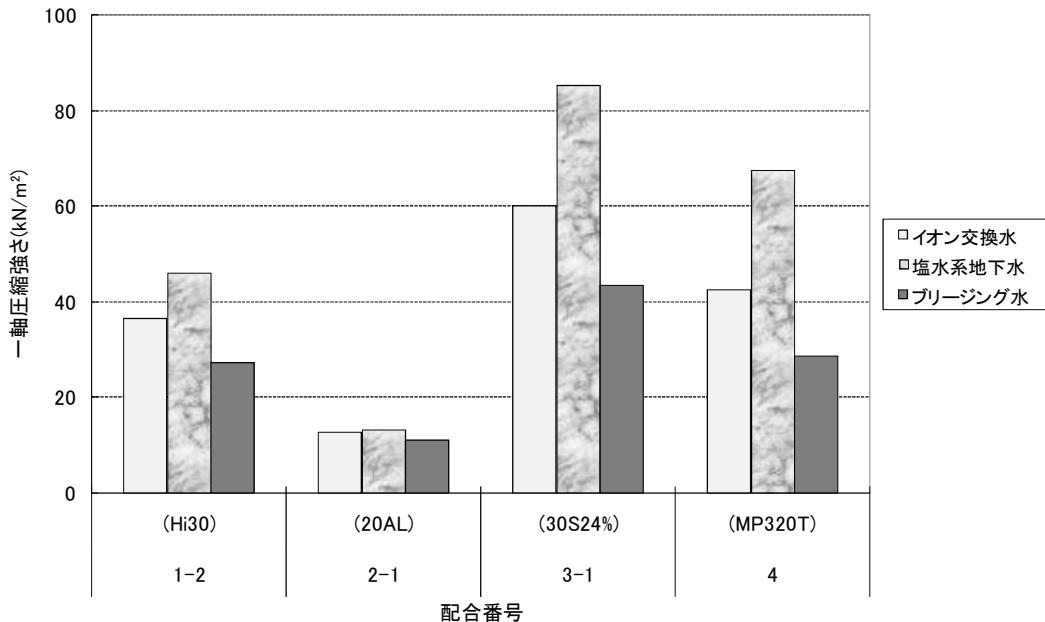


図 2.3-20 養生水の種類による 28 日後の一軸圧縮強さ（平均値）の比較（2008 年度）

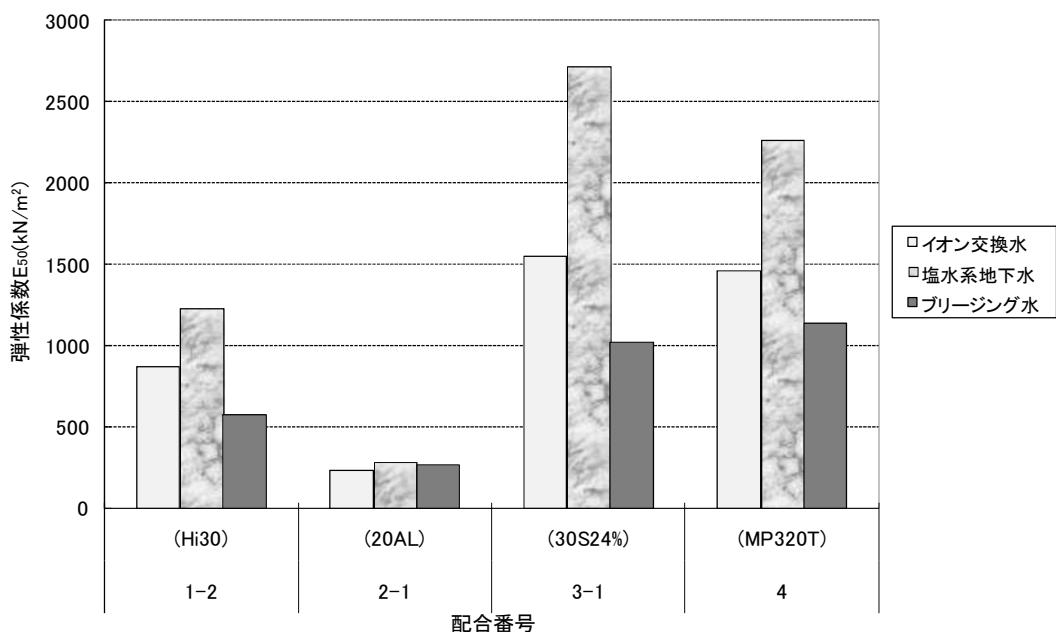


図 2.3-21 養生水の種類による 28 日後の弾性係数（平均値）の比較（2008 年度）

### b. 地下水の希釀によるゲル化特性（ゲルタイム）への影響確認試験

図 2.3-16 で示した標準配合の粘性試験結果とともに、各条件でのゲルタイムを表 2.3-26 に示す。

ゲルタイムは貯蔵弾性係数と損失弾性係数が同じになった時間と仮定した。標準配合に対してイオン交換水を 10vol% 添加して希釀した場合、ゲルタイムが 2 倍程度に伸びる。塩水系地下水で希釀した場合は、非常に短い時間でゲル化する。ブリーディング水で希釀した場合は、イオン交換水で希釀した場合と同じゲルタイムであり、ブリーディング水の化学組成がゲルタイムに与える影響が小さいと考える。

表 2.3-26 地下水の希釀によるゲルタイムの比較一覧（2008 年度）

	配合番号 1-2	配合番号 2-1	配合番号 3-1	配合番号 4
標準配合	93 分	126 分	136 分	110 分
イオン交換水で希釀	177 分	224 分	258 分	293 分
塩水系地下水で希釀	18 分	17 分	12 分	5 分
ブリーディング水で希釀	180 分	204 分	180 分	241 分

### 10) 水圧抵抗性試験

#### a. パイプを用いた押出し試験（2007 年度実施分）

押出し試験によるグラウト材料の抜け出し状況を写真 2.3-16 に示し、押出し実験の結果を表 2.3-27 に、押出し試験用パイプの内径ごとの平均付着強度（せん断抵抗）の関係を図 2.3-22 に示す。

せん断抵抗は、パイプの内径が細くなるほどが高くなる傾向を示した。



写真 2.3-16 パイプ押出し試験によるグラウト材料の抜け出し（2007 年度）

表 2.3-27 パイプ押出し試験の結果（2007 年度）

管の呼び径	内径 mm	長さ mm	7 日後		28 日後	
			押出し圧 kN/m <sup>2</sup>	せん断抵抗 kN/m <sup>2</sup>	押出し圧 kPa	せん断抵抗 kN/m <sup>2</sup>
1/2 インチ	16.7	100	50	2.1	20	0.8
		150	70	1.9	60	1.7
		200	130	2.7	50	1.0
3/8 インチ	12.8	100	350	11.2	370	11.8
		150	500	10.7	450	9.6
		200	500	8.0	770	12.3
1/4 インチ	9.1	100	600	13.7	400	9.1
		150	800	12.1	520	7.9
		200	1300	14.8	1200	13.7
5mm	5.0	300	1600	6.7	4000	16.7
		300	1900	7.9	3200	13.3

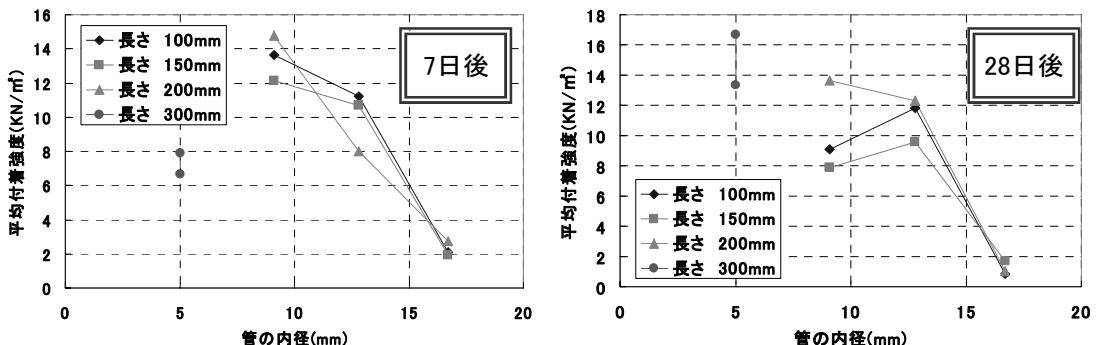


図 2.3-22 押出し試験用パイプの内径ごとの平均付着強度（せん断抵抗）の関係（2007 年度）

パイプ押し出し試験の結果、数十  $\mu\text{m}$ ～数 mm オーダーの岩盤亀裂中に注入された溶液型の平均付着強度は、材齢 28 日で  $10\text{kN/m}^2$  程度期待できる可能性がある。そこで、図 2.3-5 に示す流出抵抗性のモデルから、地下水圧とグラウト材料の付着強度のつり合いをもとに、必要改良範囲に関する試算を実施した。

ここで、想定パラメータを以下の通りとし、試算結果を図 2.3-23 に示す。

- ・湧水圧 : 10MPa
- ・岩盤亀裂開口幅 : 0.1～5mm
- ・平均付着強度 : 2.5, 5, 10, 15  $\text{kN/m}^2$

平均付着強度  $10\text{kN/m}^2$  が期待出来る場合、5mm の岩盤亀裂に対しても 2.5m 改良ゾーンを形成すれば、10MPa の水圧（地下 1000m 相当）に抵抗可能な結果となった（図中の黒丸内）。

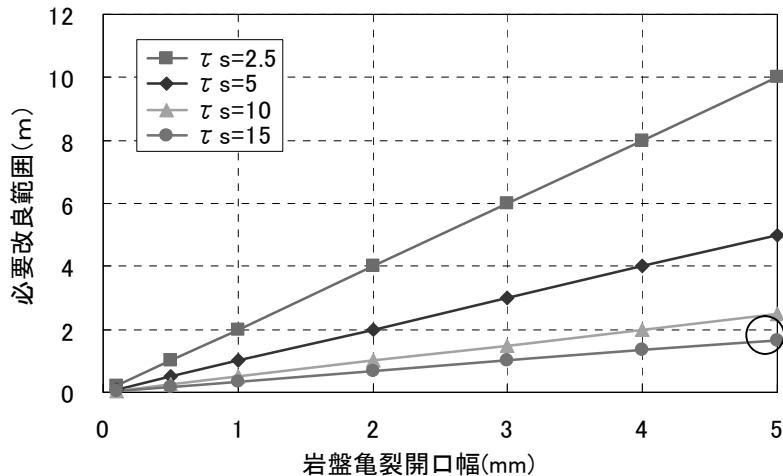


図 2.3-23 想定される平均付着強度ごとの岩盤亀裂開口幅と必要改良範囲の関係（2007 年度）

### b. 平行平板を用いた押し出し試験（2008 年度実施分）

平行平板を用いた押し出し試験の結果、破壊時の水圧と高水圧抵抗性検討モデルから算定した付着強度（せん断強度）の関係を図 2.3-24～図 2.3-26 に示す。

配合番号 1-2、配合番号 3-1 とともに試算モデルから得られるせん断強度は、三軸圧縮試験から得られた粘着力  $c$  よりも大幅に小さい結果となった。また、同条件下における実験結果についてもバラツキが大きい結果となっている。試験方法自体や水圧による押し出し抵抗に関する力学メカニズムについて、今後も検討する必要がある。

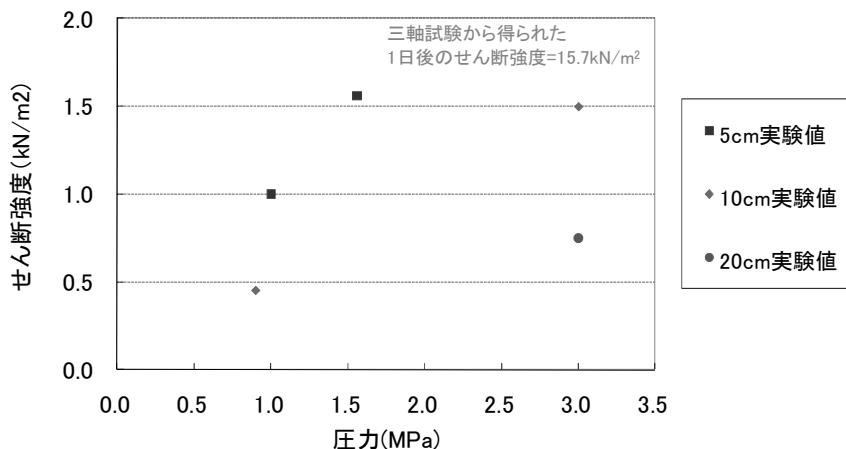


図 2.3-24 平行平板試験結果と試算結果の比較（配合番号 1-2, 100μm の場合）（2008 年度）

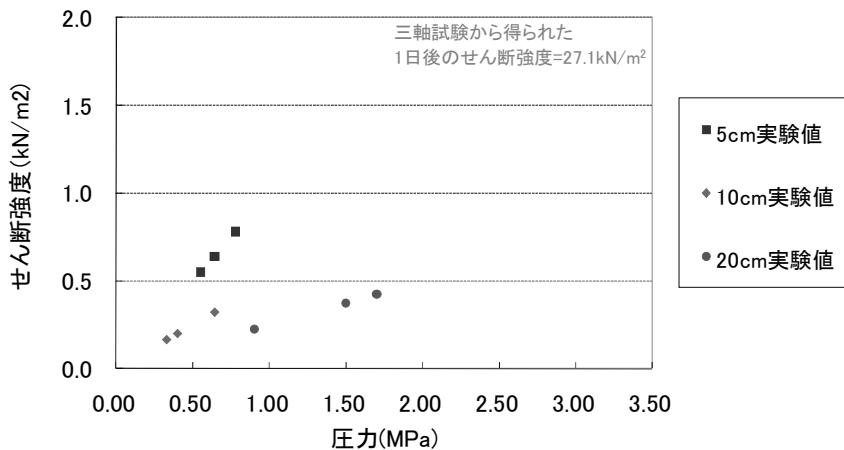


図 2.3-25 平行平板試験結果と試算結果の比較（配合番号 3-1, 100μm の場合）（2008 年度）

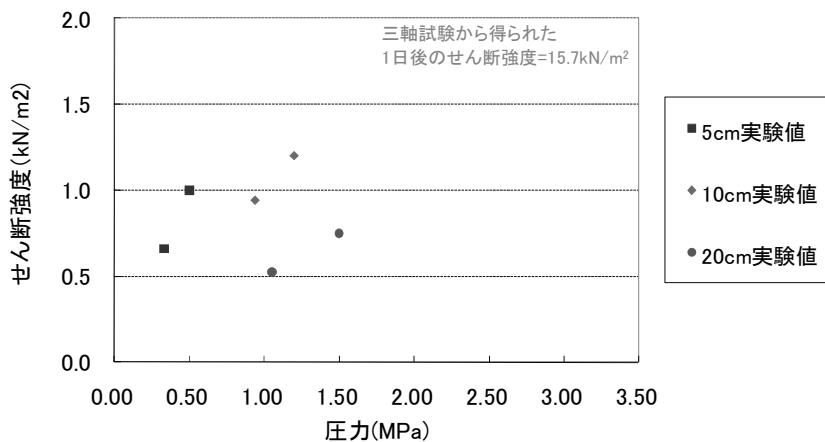


図 2.3-26 平行平板試験結果と試算結果の比較（配合番号 1-2, 200μm の場合）（2008 年度）

### 11) 耐久性試験（2008 年度実施分）

練混ぜ 1 ヶ月経過後の養生水の化学分析結果を表 2.3-28 に示す。

採取した作用水にシリカは、100～300mg/L 溶出（全シリカ量の 0.03～0.09%に相当）した。未反応のシリカが溶出した可能性が高いため、今後も継続的に計測する必要がある。

表 2.3-28 耐久性試験における 1 ヶ月後の作用水の状況（2008 年度）

測定項目	単位	配合番号 1-2	配合番号 2-1	配合番号 3-1	配合番号 4
pH	-	9.19	9.12	9.89	9.91
塩濃度	%	0.83	0.66	0.69	0.84
Si	mg/L	103	116	193	315
Na	mg/L	909	554	1224	2654
K	mg/L	2809	2386	1562	0
Cl	mg/L	3840	3020	3325	4495

### 2.3.5 まとめ

2007 年度から 2008 年度の 2 年間にわたって実施した溶液型の基礎物性試験から、原位置試験に適用可能な配合を選定した。

2007 年度は、溶液型の適用性に関する予備検討として、各種グラウト材料の中から耐久性のあるコロイダルシリカを 1 種類抽出した。これに対し、硬化促進剤の濃度を変化させた 4 配合により各種試験を行った。

まず、4 配合の低アルカリ性や強度特性を把握した後、施工を考慮した際に非現実的であるゲルタイム 5 分の配合を除き 3 配合を選定し、さらに粘性特性や浸透特性を確認した。この中から、本材料の適用性を把握するために保守的に考え、強度特性および浸透特性が比較的劣っていた 1 配合を選定して、地下水に対する抵抗性等の基礎物性を確認した。

溶液型は強度特性がセメント系材料より劣るもの、初期強度発現性に優れる材料であった。

2008 年度は、前年度に得られた本材料の特性を考慮して、シリカ濃度、表面の改質状況、シリカ粒子径、海外製品と異なる 9 種類のコロイダルシリカを用いた 10 配合により各種試験を行った。

最も優れた配合を選定するために基礎物性試験結果から総合評価を行った（表 2.3-29）。

本材料における要求値は明確ではないため、定性的に評価した。他の配合と比較して、とくに優れるものを「◎」、優れるものを「○」、劣っているものを「△」、とくに劣っており好ましくないものを「×」とした。

地層処分を対象としたグラウト材料として適用可能な配合として、配合番号 1-2, 2-1, 3-1, 4 を選定した。今後、耐久性について引き続き調査を行い、今回選定した 4 配合から 1 配合を選定する。

表 2.3-29 基礎物性試験結果のまとめ（2008）

配合	特徴	Si 濃度 (%)	止水性		養生水の影響 <sup>*1</sup>		希釀による影響 <sup>*2</sup>		耐久性
			強度特性	寸法安定性	塩水	ブリーディング水	イオン交換水	塩水	
1-1	Si 濃度小	16	△	×	—	—	—	—	—
1-2	Si 濃度中	24	○	○	○	○	○	×	○
1-3	Si 濃度大	32	○	◎	—	—	—	—	—
2-1	AI 改質	16	△	×	○	○	△	×	△
2-2	NH <sub>3</sub> タイプ <sup>°</sup>	16	△	×	—	—	—	—	—
2-3	NO <sub>3</sub> 安定	16	×	—	—	—	—	—	—
3-1	粒径小	24	◎	○	△	△	○	×	○
3-2	粒径小	16	○	×	—	—	—	—	—
3-3	粒径大	16	×	—	—	—	—	—	—
4	海外品	24	○	○	△	△	×	×	試験中

\*1：地下水環境の影響として、養生水が強度特性に与える影響を把握

\*2：地下水環境の影響として、希釀がゲルタイムへ与える影響を把握

## 2.4 超微粒子球状シリカグラウト材料

### 2.4.1 試験の概要

#### (1) 開発の目的

本研究では低アルカリ性のグラウト材料として、低アルカリ性セメントおよび溶液型を検討してきた。しかし、低アルカリ性セメントの最大粒径は  $15\mu\text{m}$  程度であり、開口幅が  $100\mu\text{m}$  未満の亀裂への浸透性に課題がある。また、溶液型の最大粒径は  $20\sim30\text{nm}$  とナノオーダーであり、ニュートン流体に近い挙動を示すが、材齢 28 日における強度がセメント系材料に比べて 2~3 オーダー小さい。そのため、低アルカリ性セメントより浸透性に優れ、溶液型より強度特性に優れるグラウト材料が求められた。

このような背景から、2008 年度より低アルカリ性セメントより粒子径が約 1 オーダー小さい超微粒子球状シリカ (Superfine silica powder, 以下、「SFP」という) を主材とする新たなグラウト材料の開発に着手した。以下に検討内容と試験結果についてまとめ、原位置への適用性を考慮した際に最適と考えられる配合を提示する上での今後の方針について示す。

#### (2) 構成材料

表 2.4-1 に構成材料の一覧を示す。主材として SFP、硬化材として超微粒子水酸化カルシウム (Superfine calcium hydroxide, 以下、「SFCa」という)、混和剤としてナフタレン系高性能減水剤 (以下、「SP」という) を使用した。

表 2.4-1 構成材料

構成材料			仕様	製造・販売	製品名称
主材	超微粒子球状シリカ	SFP	最大粒径 $1.0\mu\text{m}$ , 平均粒径 $0.3\sim0.8\mu\text{m}$	電気化学工業	SFP-20M
硬化材	超微粒子水酸化カルシウム	SFCa	平均粒径 $1.0\mu\text{m}$ 程度	鈴木工業	カルテック LT
混和剤		SP	ナフタレン系高性能減水剤	花王	マイティ 150
練混ぜ水		W	イオン交換水	—	—

SFP は、電子工業用材料として製造されている材料である。図 2.4-1 のように、高純度の天然珪石を微粉砕し高温火炎の中に溶射することで溶融と球状化を同時にを行い、回収後に粒度の調整を行った製品である。図 2.4-2 に SFP の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す。SFP は真球状であり、最大粒径約  $1\mu\text{m}$ 、平均粒径  $0.3\sim0.8\mu\text{m}$  である。

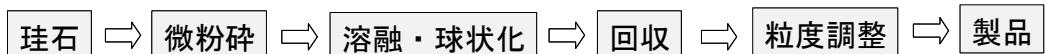


図 2.4-1 SFP の製造工程

硬化材として、開口幅  $100\mu\text{m}$  未満の亀裂への浸透性を考慮し、SFP に近い粒度分布を有する SFCa 粉体を選定した。SFCa の SEM 写真を図 2.4-3 に示す。SFP の主成分はシリカのため、常温において水が存在する場合、一般にポゾラン反応がおこる。形成される化合物は、セメント系材

料の硬化体において主要な化合物として観察されるカルシウムシリケート水和物（以下、C-S-H, ここで、C: CaO, S: SiO<sub>2</sub>, H: H<sub>2</sub>O）と考える。

主材および硬化材とも超微粒子粉体であることを踏まえ、凝集を避けるためにSPを添加することとした。文献調査から、放射性核種の移行評価上、比較的影響が小さいとされるナフタレンスルフォン酸系のマイティ150を選定した。遅延剤を含有するマイティ150Rについても使用を検討したが、強度発現を著しく遅延させることから使用しないこととした。

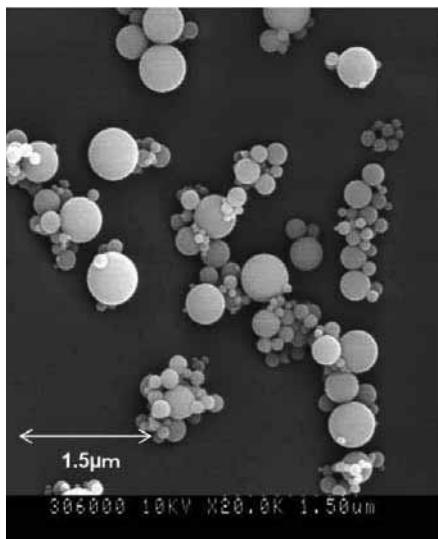


図 2.4-2 SFP の SEM 写真

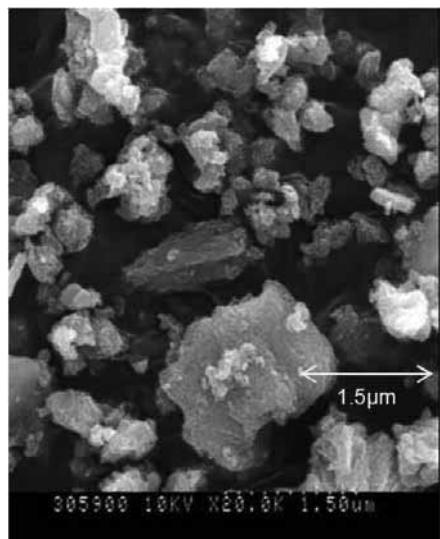


図 2.4-3 SFCa の SEM 写真

### (3) 目標とする性能

超微粒子球状シリカの開発にあたり、POSIVAが設定した低アルカリ性セメントの要求値（表2.2-2）を参考にして、暫定的に本材料における要求値を設定した（表2.4-2）。この要求値は、本材料の諸特性が明らかになり次第、適宜見直す必要がある。

表 2.4-2 室内試験における材料の要求値

性 能		要求値
施工性	流下時間	30 分後 $\leq 45\text{s}$
止水性	ブリーディング率	2 時間後 $\leq 2\%$
	圧縮強度	材齢 28 日 $\geq 4\text{MPa}$
低アルカリ性	pH	$\leq 11$

### (4) 試験項目

試験項目一覧を表2.4-3に示す。表中の配合番号の詳細については2.3.2で、各試験方法の詳細については2.3.3で述べた通りである。

表 2.4-3 基礎物性試験項目

試験項目			試験方法	条件	実施状況					
					2008年度 配合番号					
					1	2	3	4	5	6
(1) 基礎物性試験	1)漏斗流下試験	ファンネル流下時間	【JSCEF531-1999に準拠】	練上直後	○	○	○	○	○	○
				30分後	○	○	○	○	○	○
	2)粘性試験	降伏値	音叉型振動式粘度計 【JSCEF532-1999に準拠】	練上直後	-	○	○	○	○	○
				30分後	-	○	○	○	○	○
	3)ブリーディング試験	ブリーディング率		2時間後	○	○	○	○	○	-
	4)圧縮強度試験	一軸圧縮強度	【JSCE-G505-1999に準拠】	24時間後	○	○	○	○	○	-
				28日後	○	○	○	○	○	○
	5)pH測定試験	微粉浸漬液のpH	供試体を50℃の温水中で14日間養生後、粉碎した試料を液固比5:1で浸漬 72時間の浸透攪拌後、ガラス電極pHメータで測定	50℃養生 付ソ交換水	-	○	○	○	○	-

## 2.4.2 試験材料

### (1) 材料物性

#### 1) 測定方法

本材料の基礎物性試験にあたり、表 2.4-1 の主材と硬化材の粒度分布が所定の範囲内にあることを確認するため、粒度分布を測定した。測定手法はレーザー回折法とし、使用機器は、堀場製作所製の散乱式粒度分布測定装置 LA-920 を使用した。粉体の分散媒には水を使用し、超音波で 10 分間分散後に測定した。

#### 2) 測定結果

粒度分布測定結果の一例を表 2.4-4、図 2.4-4、図 2.4-5 にそれぞれ示す。

計測の結果、SFP と SFCa の 50%粒径  $D_{50}$  はそれぞれ  $0.464\mu\text{m}$ ,  $0.416\mu\text{m}$  と同程度である。SFP の粒度分布は、図 2.4-4 または図 2.4-5 から SFCa に比べて狭い範囲にあることが確認された。また、SFP の 95%粒径  $D_{95}$  は  $0.708\mu\text{m}$  であることから、SFP は粒径が  $1\mu\text{m}$  以下の粒子で構成される。一方、SFCa の  $D_{95}$  は  $1.304\mu\text{m}$  であり、わずかに  $1\mu\text{m}$  を超える粒子が含まれていることが確認された。しかし、SFCa は SFP に対して少量の使用が想定されるので、超微粒子球状シリカは、粒径がおおよそ  $1\mu\text{m}$  以下の粒子で構成されるグラウト材料といえる。

また、セメント系材料の粒度分布は、おおよそ  $1\sim100\mu\text{m}$  の範囲にあり<sup>23)</sup>、セメント系材料で最も粒度分布の小さい超微粒子セメント（または、低アルカリ性セメント）の平均粒径は数  $\mu\text{m}$  である。すなわち、超微粒子球状シリカは、セメント系材料よりも少なくとも 1 オーダー小さい粒度分布を有する材料といえる。

表 2.4-4 粒度分布測定結果

	任意%粒径 ( $\mu\text{m}$ )	
	SFP	SFCa
$D_5$	0.284	0.228
$D_{50}$	0.464	0.416
$D_{95}$	0.708	1.304

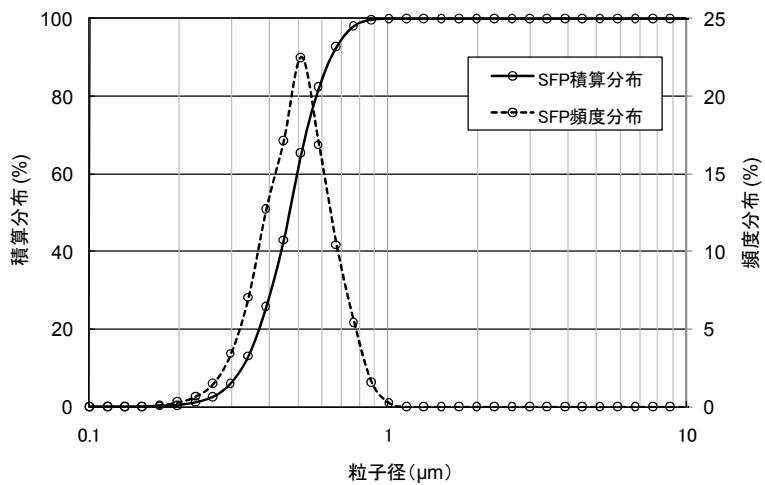


図 2.4-4 SPF の粒度分布図

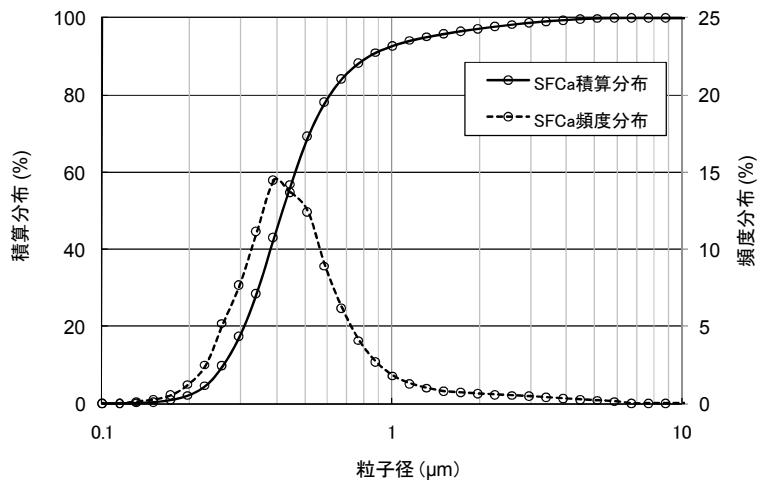


図 2.4-5 SFCa の粒度分布図

## (2) 練混ぜ方法

超微粒子粉体の練混ぜ時の取り扱いを容易にするため、主材（SFP）および硬化材（SFCa）をそれぞれスラリー状にした後に混合することにした。予備試験により、SFP は SP を添加しなくとも分散性が良好であったため、SFCa のスラリーにのみ SP を添加することとした。

## (3) 試験配合

表 2.4-5 に試験配合を示す。W/B および SP/B については、適切な流動性が確保できる範囲を予備試験により確認し、それぞれ 120%, 1.5% で一定とした。配合 1 は比較用とし、SFCa および SP を添加しない配合とした。

表 2.4-5 基礎物性試験の配合一覧

No.	配合			練混ぜ時の計量例					
	結合材構成比		W/B	SP/B	A 剤		B 剤		
	SFP	SFCa			SFP	W	SFCa	SP	W
	(%)	(%)	(%)	(%)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
1	100	0	120	0.0	100	120	0	0	0
2	95	5	120	1.5	95	95	5	1.5	25
3	90	10	120	1.5	90	90	10	1.5	30
4	85	15	120	1.5	85	85	15	1.5	35
5	80	20	120	1.5	80	80	20	1.5	40
6	70	30	120	1.5	70	70	30	1.5	50

B :binder (=SFP+SFCa)

### 2.4.3 試験方法

#### (1) 基礎物性試験

基礎物性試験における練混ぜやフレッシュ性状に関する試験については、すべて 20°C の恒温室で行った。

##### 1) 漏斗流下試験

土木学会規準 JSCE-F 531-1999 に従って、漏斗流下試験を行った。使用する漏斗は、一般にメントナイトスラリーの品質管理等に用いられているファンネル粘度計を用いることとし、流下時間の計測は練混ぜ直後および 30 分後とした。ファンネル粘度計は、吐出口径  $\phi 4.8\text{mm}$ 、容量  $500\text{cm}^3$  である。

##### 2) 粘性試験

音叉型浸透式粘度計（エー・アンド・デイ製）を用いて練混ぜ直後および 30 分後のグラウト材料の見掛け粘度を測定した。

##### 3) ブリーディング試験

土木学会規準 JSCE-F 532 に従って、ブリーディング試験を実施した。ブリーディング率の計測は、練混ぜ 2 時間および 24 時間後とした。

##### 4) 圧縮強度試験

土木学会規準 JSCE-G 505 に従って、圧縮強度を実施した。円柱供試体は、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$  のモールドに材齢 1 日まで 20°C の恒温室で養生した。その後、所定の材齢まで標準水中養生を行い、圧縮強度を計測した。

##### 5) pH 測定試験

硬化したグラウト材料の供試体を 50°C の温水中で 14 日間養生し測定を行った。養生後 50°C で乾燥し、粉碎後 1mm のふるい上の試料を 20°C のイオン交換水中に液固比 5 : 1 となるように浸漬した。その後、72 時間の振とう・攪拌後、浸漬液の pH をガラス電極 pH メータにより測定した。

## 2.4.4 試験結果

### (1) 基礎物性試験

#### 1) 漏斗流下試験

漏斗流下試験結果を表 2.4-6 に示す。

図 2.4-6 に示すように練混ぜ直後および 30 分後のグラウト材料において、SFCa 粉体構成比が 20%を超えると漏斗流下時間が著しく増加し、流動性が低下することから、SFCa 構成比が 20%以下の場合に適切な流動性が確保できる可能性が高いと考える。

練混ぜ 30 分後においては、SFCa 構成比が 20%以下であっても表 2.4-2 の漏斗流下時間の要求値 (45sec) を超えるため、SP/B または W/B を大きくして流動性を高める必要がある。ただし、W/B の増大は強度発現性を損なう可能性があるため、圧縮強度等との関係を考慮し設定する必要がある。

表 2.4-6 漏斗流下試験結果

No.	結合材構成比		流下時間 (sec)	
	SFP (%)	SFCa (%)	練混ぜ 直後	練混ぜ 30 分後
1	100	0	20.34	20.33
2	95	5	33.56	33.24
3	90	10	41.26	42.26
4	85	15	44.99	51.09
5	80	20	38.47	50.75
6	70	30	67.34	127.85

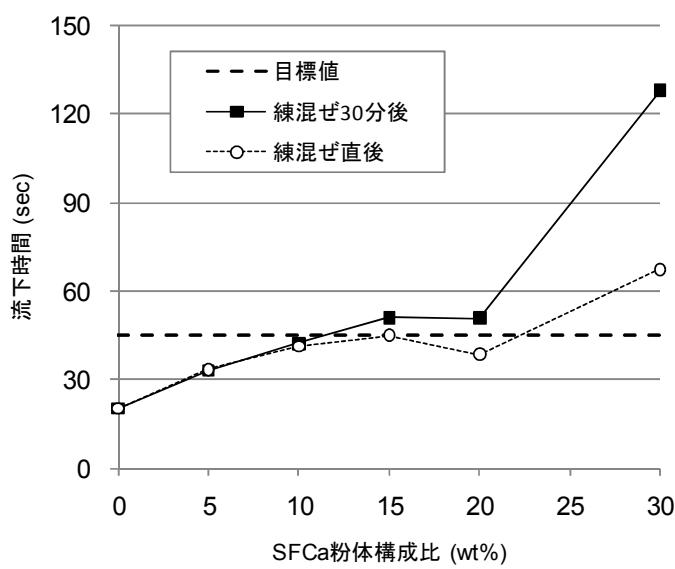


図 2.4-6 漏斗流下時間と SFCa 粉体構成比との関係

#### 2) 粘性試験

粘性試験結果を表 2.4-7 に示す。

多少のバラツキがあるものの、漏斗流下試験結果と同様に、SFCa 構成比が 20%を超えると見掛け

け粘度の増加が顕著であった。これは、漏斗流下試験結果と同様の傾向である。粘性試験に用いた音叉型浸透式粘度計ではビンガム流体の粘度を決定できないが、複数の配合間において流動性の相対比較をする場合には十分適用可能である。

粘性試験結果からも、SFCa構成比は20%以下が適切と推察される。

表 2.4-7 粘性試験結果

No.	粉体構成比 (%)		見掛け粘度 (mPa·s)	
	SFP	SFCa	練混ぜ 直後	練混ぜ 30分後
1	100	0	—	—
2	95	5	35.2	53.3
3	90	10	61.0	58.0
4	85	15	78.3	75.0
5	80	20	41.2	55.6
6	70	30	100.0	101.0

### 3) ブリーディング試験

ブリーディング試験結果を表 2.4-8 に示す。

全ての配合で練混ぜ 2 時間後のブリーディング率は 0% となり、表 2.4-2 のブリーディング率の要求値(練混ぜ 2 時間後で 2% 以下)を満足した。セメント系材料に比べて材料分離抵抗性が高く、練混ぜ 24 時間後においてもブリーディング率が 1% 程度以下と小さいことから、ブリーディングによる水みち形成の可能性は低いと考える。

表 2.4-8 ブリーディング試験結果

No.	結合材構成比 (%)		ブリーディング率 (%)	
	SFP	SFCa	練混ぜ 2時間後	練混ぜ 24時間後
1	100	0	0.00	0.00
2	95	5	0.00	1.00
3	90	10	0.00	1.22
4	85	15	0.00	0.61
5	80	20	0.00	1.11

### 4) 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果を表 2.4-9、図 2.4-7、図 2.4-8 に示す。

SFCa構成比に比例して圧縮強度が増加する。SFCa構成比が20%より大きい場合、表 2.4-2 の圧縮強度の要求値(材齢 28 日で 4MPa 以上)を満足し、SFCa構成比 30% 以上においても強度が増進する可能性がある。しかし、漏斗流下試験と粘性試験では、SFCa構成比が 30% 以上の場合に流動性が低下することから、強度発現性と流動性がトレードオフの関係にあり、両者の適切なバランスが求められる。

一方、SFCa構成比が 20% 以下の配合は、要求値(4MPa)には達しないものの数 MPa の圧縮強度を発現する。超微粒子球状シリカは、セメント系材料に近い強度特性を有すると考える。

表 2.4-9 圧縮強度試験結果

No.	結合材構成比 (%)		圧縮強度 (MPa)			
	SFP	SFCa	材齢 3 日	材齢 7 日	材齢 14 日	材齢 28 日
1	100	0	0.00	0.00	0.00	0.00
2	95	5	0.46	0.47	0.50	0.38
3	90	10	0.36	1.27	2.40	2.52
4	85	15	0.27	1.12	2.85	3.11
5	80	20	0.21	1.10	3.42	3.82
6	70	30	0.17	0.97	3.41	4.83

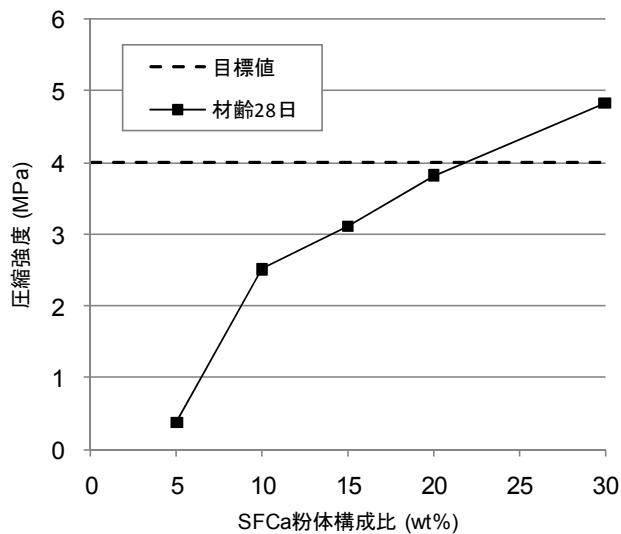


図 2.4-7 圧縮強度と SFCa 構成比の関係

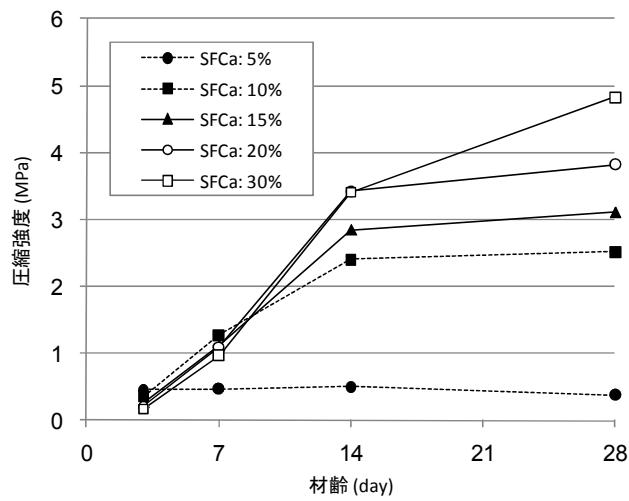


図 2.4-8 圧縮強度の経時変化

## 5) pH 測定試験

pH 測定結果を表 2.4-10 に示す。

SFCa 構成比が 5~20% の配合は、硬化体からの浸出水の pH がすべて 10.2 で一定の値となった。

SFCa により供給された水酸化カルシウムは、SFP の主成分のシリカとのポゾラン反応によりすべて消費された可能性がある。さらに、硬化体に形成された C-S-H ゲルの Ca/Si モル比等の化学的な性質が一定であったことが示唆される。

表 2.4-10 pH 測定結果

No.	結合材構成比 (%)		pH
	SFP	SFCa	
1	100	0	5.7
2	95	5	10.2
3	90	10	10.2
4	85	15	10.2
5	80	20	10.2

#### 2.4.5まとめ

2008 年度に実施した超微粒子球状シリカの基礎物性試験から以下の特性を得た。

超微粒子球状シリカは、最大粒径が 1μm 程度の粒度分布のため、セメント系材料が浸透困難な微細な亀裂にも浸透する可能性があり、SP/B が 1.5%程度であっても流動性を確保できる。

材齢 28 日の圧縮強度が数 MPa であり、セメント系材料に近い強度特性を有するとともに、練混ぜ 2 時間後のブリーディング率が 0%であり、材料分離抵抗性が高い。

また、硬化体からの浸出液の pH は 11 以下であり、低アルカリ性のグラウト材料である。

以上より、本材料は地層処分を対象としたグラウト材料として成立する可能性がある。今後、施工性・止水性に関する試験を行い、原位置への適用性を考慮した際に最適と考えられる配合を選定する。

### 3. まとめと今後の課題

本研究において、低アルカリ性セメント系グラウト材料（低アルカリ性セメント）と溶液型グラウト材料（溶液型）については2007年度より、超微粒子球状シリカグラウト材料（超微粒子球状シリカ）については2008年度より開発を進めてきた。その結果、低アルカリ性セメントについては最適配合を選定し、その他のグラウト材料についても基本特性を把握した。

しかし、我が国地層処分においては、具体的にどの程度までの亀裂開口幅をグラウト材料で止水すべきか十分な議論がなされておらず、グラウト材料に対する要求性能が確立していない。これまで海外のグラウト材料における要求性能等を参考にし、目安となる要求値等を設けてきたが、今後は各材料の特性や我が国地質環境を考慮した上で、材料ごとに設定していく必要がある。

また、浸透特性等は3材料を同じ試験装置や試験条件で横並びに評価し、それぞれの適用範囲を明確にしていく必要がある。

以下、各材料の研究成果を示す。

#### 3.1 低アルカリ性セメント系グラウト材料

各種室内試験により、原位置試験に適用可能な配合として、超微粒子普通ポルトランドセメント/シリカフィーム/球状シリカ/フライアッシュ=5/5/0/0、水結合材比125%，分散剤添加率5.5%を選定した。今後は原位置試験における適用性を調査し、改良および再検討を行う。

#### 3.2 溶液型グラウト材料

各種室内試験により、地層処分に適用可能な配合として4配合を選定した。しかし、練混ぜ1ヶ月経過後の養生水から、シリカが100～300mg/L溶出（全シリカ量の0.03～0.09%に相当）した。これは未反応のシリカが溶出した可能性が高いため、今後も継続的に計測する。

また、地下水組成による影響確認試験において、高アルカリ水がゲルタイムに与える影響は小さいものの、塩水の影響が大きい結果が得られたことから、塩水環境下に対応する配合検討も重要である。

#### 3.3 超微粒子球状シリカグラウト材料

各種室内試験により、地層処分に対する適用の可能性が示された。これまで、粘性特性と強度特性がトレードオフの関係にあることなどを確認できたことから、今後、さらに施工性・止水性に関する試験を行い、原位置への適用性を考慮した配合を選定する。

## 参考文献

- 1) 原子力委員会 (2005) : 原子力政策大綱
- 2) 土木学会 (2001) : ダム建設における水理地質構造の調査と止水設計.
- 3) Hansen, T-S., Roald, S., Nomeland, T. and Grant, B. (2003): Predictable and successful rock injection – the first time around, A new improved system for cost-effective control of water in-leakage during tunnel excavation may reduce the need for expensive sandwich lining systems, ICGGE-2003.
- 4) 米田俊一, 中川浩二 (1993) : 粒子径を変えた各種セメントグラウトの基礎的性質と浸透性比較, 土木学会論文集, No.462/VI-18, pp.101-110.
- 5) Emmelin, A., Brantberger, M., Eriksson, M., Gustafson, G. and Stille, H. (2007): Rock grouting, Current competence and development for the final repository, SKB, R-07-30.
- 6) 山田勉, 内藤守正, 小林保之, 新貝文昭 (2009) : 地層処分におけるグラウト技術の高度化開発 (その 2) グラウト材料の開発, 土木学会第 64 回年次講演会, CS5-002, pp.137-138
- 7) 核燃料サイクル開発機構(2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 分冊 2 工学技術の開発
- 8) 入矢桂史郎ほか(2002) : 幌延深地層研究センターにおけるコンクリート材料の施工性に関する研究 (II), JNC TJ8400 2002-013, pp.75-81
- 9) 入矢桂史郎, 竹田宣典, 十河茂幸(2003) : ポゾランを高含有した低アルカリ性コンクリートの開発, 大林組技術研究所報 No.66, pp.63-70
- 10) 小西一寛, 中山雅, 三原守弘, 吉田泰, 入矢桂史郎, 秋好賢治, 納多勝(2006) : 幌延深地層研究計画における低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの施工性に関する研究, JAEA-Research 2006-040, 59p
- 11) 三浦律彦, 納多勝, 小林保之, 山田勉(2008) : 低アルカリ性セメントグラウト材料の基礎物性に関する検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会 CS05-32, pp.231-232
- 12) 三浦律彦, 並木和人, 小林保之, 山田勉(2009) : 地層処分におけるグラウト材料の高度化開発 (その 3) -低アルカリ性セメント系グラウト材料の配合選定-, 土木学会第 64 回年次学術講演会, CS5-003, pp.139-140
- 13) Bodén, A., Sievänen, U. (2005): Low-pH injection grout for deep repositories. Summary report from a co-operation project between NUMO (Japan), Posiva (Finland) and SKB (Sweden), SKB R-05-40
- 14) Sievänen, U., Syrjänen, P., Ranta-aho, S. (2005): Injection Grout for Deep Repositories. Low pH Cementitious Grout for Larger Fractures. Subproject 3, Field Testing in Finland, Pilot Tests. Posiva Oy, Working Report 2004-47
- 15) Penetrability Meter, R20 Programme(2008): Field Testing of Grouting Materials, Posiva, Working Report 2007-102
- 16) Raivio, P. and Hansen, J.(2007): Technical Performance of Grouting Materials for ONKALO, Laboratory Tests 2006, Posiva Working Report 2007-76
- 17) Finnish Tunnelling Association (2003): Hard Rock Tunnel Grouting in Finland, Sweden, and Norway – Literature Study.

- 18) 吉田了三, 高橋則雄, 花田達雄(2008) : 超微粒子セメントの砂質地盤への浸透性と止水性に関する実験, 地盤工学研究発表会発表講演集 Vol.43, 2 の 1, pp.677-678
- 19) 山本浩志, 西垣誠, 吉岡進, 岸裕和(1996) : 開口亀裂におけるグラウトの進入・流動特性に関する研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会
- 20) GLO-85 (1985): Finnish Geotechnical Society
- 21) Arenius, M., Hansen, J., Juhola, P., Karttunen, P., Koskinen, K., Lehtinen, A., Lyytinen, T., Mattila, J., Partamies, S., Pitkänen, P., Raivio, P., Sievänen, U., Vuorinen, U. and Vuorio, M. (2008): R20 Summary Report: The Groundwater Inflow Management in ONKALO, the Future Strategy, POSIVA Working Report 2008-44
- 22) 新貝文昭, 杉山博一, 延藤遵(2009) : 地層処分におけるグラウト材料の高度化開発 (その 5) – 溶液型グラウト材料の適用性に関する試験 –, 土木学会第 64 回年次学術講演会, CS5-005, pp.143-144
- 23) 産業技術サービスセンター(1997) : 最新地盤注入工法技術総覧

This is a blank page.