

瑞浪超深地層研究所におけるグラウト技術の 開発及び高度化(その2)

(委託研究)

Development and Enhancement of Grouting Technologies in the Mizunami
Underground Research Laboratory (Part 2)
(Contract Research)

延藤 遵* 見掛 信一郎

Jun NOBUTO* and Shinichiro MIKAKE

地層処分研究開発部門

結晶質岩工学技術開発グループ

Crystalline Environment Engineering Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

瑞浪超深地層研究所におけるグラウト技術の開発及び高度化（その2）
（委託研究）

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット
延藤 遵*, 見掛 信一郎

（2008年2月6日受理）

日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」）東濃地科学センターでは、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の一環として超深地層研究所計画を進めている。

地層処分の概念は、「安定な地質環境に、性能に余裕を持たせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築する」というものである。そのため、処分場を建設するための工学技術の基盤整備のひとつとして、グラウト技術の高度化が必要と考えられる。

そこで、本研究では、平成17年度に引き続いて、坑道掘削時に遭遇する水みちに対する対策工法であるグラウトについて、その止水性能を確認し、さらに亀裂入り口におけるグラウト材料の浸透特性について研究を実施した。

具体的には、①高粘性グラウト材料の粘性特性の検討、②高圧目詰まり試験の実施、③グラウト材料の浸透特性の整理と成果の取りまとめ、を実施した。このうち、特に高圧目詰まり試験については、昨年度開発した試験装置を改良し、より実際のグラウトの注入条件に近いグラウト材料の浸透挙動を模擬して実験を実施した。その結果、注入圧力を段階的に上昇させることで、ある程度目詰まりを抑制することができ、高濃度な配合のグラウト材料を十分に注入できることが判明した。

本報告書は、清水建設株式会社が日本原子力研究開発機構との契約により実施した研究成果に関するものである。

東濃地科学センター（駐在）：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64

*清水建設株式会社 土木技術本部

**Development and Enhancement of Grouting Technologies
in the Mizunami Underground Research Laboratory (Part 2)
(Contract Research)**

Jun NOBUTO* and Shinichiro MIKAKE

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received February 6, 2008)

In the Tono Geoscience Center of Japan Atomic Energy Agency (hereafter, JAEA), Mizunami Underground Research Laboratory project has been conducted to develop a scientific and technological basis for geological disposal.

The concept of geological disposal is based on a multi-barrier system which combines a stable geological environment with an engineered barrier system (EBS). In order to develop an engineering basis for the construction of disposal system, the enhancement of grouting technologies among engineering technologies is needed.

In this study, the comprehensive performance of suspension type grouting materials to seal rock fractures encountered in excavation works at deep underground has been checked, and the clogging phenomenon at the entrance of rock fractures has been investigated following the previous year.

Research issues are as follows: study on rheology of high viscous grouting material, study of clogging phenomenon of suspension type grouting materials under high injection pressure, literature review on infiltration characteristics of grouting materials to point out research issues to be solved and summary of this research works to date. Among these, in high-pressure clogging test, prototype test equipment developed last year has been improved completely to simulate grout flow accurately in actual grouting scene. The test results indicate the possibility to prevent the clogging phenomenon of thick cement slurry by increasing the injection pressure gradually.

Keywords: High Viscous Grouting Material, High Injection Pressure, Infiltration Characteristics of Grouting Materials

This work was performed by the Shimizu Corporation under contract with Japan Atomic Energy Agency.

*Civil Engineering Technology Division, Shimizu Corporation

目次

1. 研究の目的	1
2. 研究の概要	5
2.1 グラウト材料の基本物性の確認	5
2.2 高粘性グラウト材料の粘性特性の検討	5
2.3 高圧目詰まり試験の実施	5
2.4 グラウト材料の浸透特性の整理と成果の取りまとめ	5
3. グラウト材料の基本物性の確認	7
3.1 試験の目的	7
3.2 分散方法に関する検討	8
3.2.1 使用材料	9
3.2.2 分散剤種類の検討	10
3.2.3 分散剤添加量の検討	20
3.2.4 攪拌方法の検討	26
3.3 基本物性確認試験	38
3.3.1 試験項目	38
3.3.2 使用材料	38
3.3.3 試験結果	41
3.3.4 超微粒子セメントの比較	47
3.3.5 水セメント比の影響の検討	49
3.3.6 強度試験	56
第3章参考文献	65
4. 高粘性グラウト材料の粘性特性の検討	66
4.1 検討の目的	66
4.2 粘性特性測定試験	67
4.2.1 使用材料	67
4.2.2 攪拌方法	68
4.2.3 試験配合	70
4.2.4 試験装置	71
4.2.5 試験項目	72
4.2.6 試験結果	74
4.3 考察	90
4.3.1 セメントグラウト	90

4.3.2 ベントナイトグラウト.....	92
第4章参考文献.....	94
5. 高圧目詰まり試験の実施.....	95
5.1 試験の目的.....	95
5.2 試験フロー.....	95
5.3 試験方法.....	97
5.3.1 使用材料.....	97
5.3.2 試験配合.....	97
5.3.3 測定項目.....	98
5.3.4 スリット試験装置.....	98
5.3.5 実験装置.....	102
5.3.6 注入圧力の載荷方法.....	105
5.3.7 目詰まり判定方法.....	106
5.4 試験結果.....	110
5.4.1 低圧加圧試験.....	110
5.4.2 高圧加圧試験.....	117
5.5 考察.....	126
5.5.1 低圧加圧試験.....	126
5.5.2 高圧加圧試験.....	129
6. 今後の研究の方向性の整理.....	134
7. まとめ.....	137
7.1 グラウト材料の基本物性の確認.....	137
7.2 高粘性グラウト材料の粘性特性の検討.....	137
7.3 高圧目詰まり試験の実施.....	137
7.4 グラウト材料の浸透特性の整理と成果の取りまとめ.....	137

CONTENTS

1. OBJECTIVES.....	1
2. OUTLINE	5
2.1 Study on basic grout property.....	5
2.2 Study on rheology of high viscous grouting materials.....	5
2.3 Clogging test under high injection pressure.....	5
2.4 Literature review of grout infiltration study.....	5
3. STUDY ON BASIC GROUT PROPERTY.....	7
3.1 Objective	7
3.2 Study on dispersion of grout.....	8
3.2.1 Test material.....	9
3.2.2 Study on type of super plasticizer.....	10
3.2.3 Study on volume of super plasticizer	20
3.2.4 Study on mixing method.....	26
3.3 Laboratory test for grout property	38
3.3.1 Test item.....	38
3.3.2 Test material.....	38
3.3.3 Test result	41
3.3.4 Comparison of superfine cements.....	47
3.3.5 Influence of water cement ratio.....	49
3.3.6 Strength Test	56
Reference of Chapter 3.....	65
4. STUDY ON RHEOLOGY OF HIGH VISCOUS GROUTING MATERIALS.....	66
4.1 Objective	66
4.2 Measurement of viscosity.....	67
4.2.1 Test material.....	67
4.2.2 Mixing method.....	68
4.2.3 Testing grout mixing ratio	70
4.2.4 Test apparatus.....	71
4.2.5 Test items	72
4.2.6 Result	74
4.3 Discussion	90
4.3.1 Cementitious grout.....	90
4.3.2 Bentonite grout.....	92

Reference of Chapter 4.....	94
5. CLOGGING TEST UNDER HIGH INJECTION PRESSURE.....	95
5.1 Objective.....	95
5.2 Test flow.....	95
5.3 Test method.....	97
5.3.1 Test material.....	97
5.3.2 Test grout mix.....	97
5.3.3 Measured items.....	98
5.3.4 Clogging test apparatus.....	98
5.3.5 Test equipment.....	102
5.3.6 Loading method of injection pressure.....	105
5.3.7 Criteria for clogging.....	106
5.4 Test result.....	110
5.4.1 Low pressure injection test.....	110
5.4.2 High pressure injection test.....	117
5.5 Discussion.....	126
5.5.1 Low pressure injection test.....	126
5.5.2 High pressure injection test.....	129
6. FUTURE RESEARCH PLAN.....	134
7. SUMMARY.....	137
7.1 Study on basic grout property.....	137
7.2 Study on rheology of high viscous grouting materials.....	137
7.3 Clogging test under high injection pressure.....	137
7.4 Literature review of grout infiltration study.....	137

1. 研究の目的

地層処分の概念は、「安定な地質環境に、性能に余裕を持たせた人工バリアを含む多重バリアシステムを構築する」というものである。処分場の建設に必要な工学技術の基盤整備に向け、グラウト技術の高度化が必要と考えられる。グラウト技術の高度化においては、処分場の建設時、作業時の湧水を低減するグラウト技術の基盤を整備することを念頭に、特に注入方法等の工学的な観点からの研究を行う。

平成 17 年度は、国内外の施工実績及び放射性廃棄物処分に関連したグラウト注入方法に関する既往研究を調査し、高い止水性能を確保するためのグラウト注入概念を整理し、さらに整理したグラウト注入概念に対して、止水性能及び経済性の観点から評価を実施した。次に、グラウト材料に対しては、高圧注入時における浸透性能の評価が可能となる室内試験方法について検討し、実際に試験装置を試作し、その適用性を評価した。また、より高い止水性能を確保するために、100 μm 以下の極めて微小な亀裂まで浸透可能なグラウト材料に関する現状の技術レベルを調査した。

これらの検討に引き続き、平成 18 年度は高い止水性能を有するグラウト技術の確立に向けて、以下の項目について研究を実施する。

- グラウト材料の基本物性の確認
- 高粘性グラウト材料の粘性特性の検討
- 高圧目詰まり試験の実施
- グラウト材料の浸透特性の整理と成果の取りまとめ

まず、高濃度グラウトの分散方法（分散剤の種類・添加量、攪拌方法）について検討し、適切な分散方法を選定した上で、グラウト材料の基本物性について室内試験により確認し、以降の試験に使用するグラウト配合を選定する。次に、粘性特性について詳細に測定することで、高濃度グラウト材料の粘性特性に与えるセメント種類の影響、水セメント比の影響、シリカフェームスラリーの影響、時間依存性、を把握する。次に、基本物性が確認されたグラウト材を用いて目詰まり試験を低圧（1MPa）と高圧（最大 5MPa）の注入圧を作用させて実施する。その結果より、グラウト物性と注入圧力がグラウト材料の亀裂入り口における目詰まり特性に与える影響について検討する。

今年度の研究内容と瑞浪深地層研究所におけるグラウト研究全体との関係を図 1-1に示す。

This is a blank page.

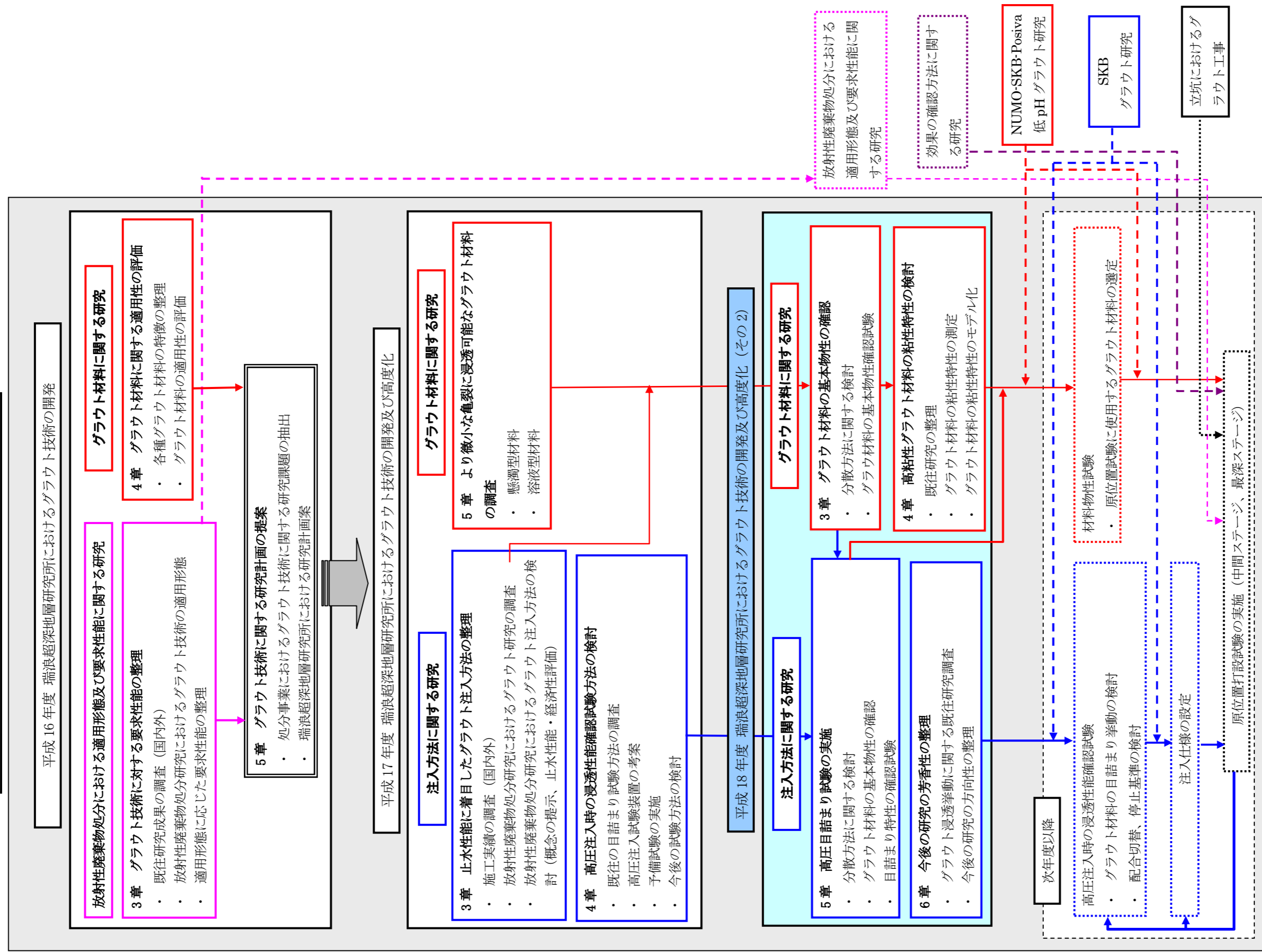


図 1-1 瑞浪超深地層研究所におけるグラウト研究全体における平成 18 年度研究項目の位置付け

2. 研究の概要

「1. 研究の目的」に示した個別の研究項目に関する概要を以下に述べる。

2.1 グラウト材料の基本物性の確認

超微粒子セメントに対して使用すべき分散剤及び攪拌方法について予備的に検討を実施し、ブリーディングの発生を抑えながら粘性を低下させる適切な分散方法（分散剤種類、添加量、攪拌方法）を選定する。その際に、特にグラウトエイド（シリカフェームスラリー）の混和の有無、混和量による影響に留意して検討を実施する。次に、普通セメント、超微粒子セメント、超々微粒子セメント、懸濁型特殊シリカを対象として、グラウト材料の粘性、ブリーディング特性、強度特性等の基本物性を確認し、以降の粘性特性の検討、及び高圧目詰まり試験に使用する材料及びグラウト配合を選定する。

2.2 高粘性グラウト材料の粘性特性の検討

昨年度の研究を通じて、高い止水性能を有する低 pH セメントグラウト材料や天然グラウト材料は、従来のダムやトンネルで使用されているグラウト材料に比べて、かなり高い粘性特性を有することが確認されている。これらの材料について粘性特性に関する既往研究を整理し、さらに、低 pH セメントグラウトを模擬した配合や超微粒な材料を含めて、グラウト材料の粘性を幅広い速度領域において測定することにより、今後利用するグラウト材料の粘性特性のモデル化手法について検討する。

2.3 高圧目詰まり試験の実施

グラウト工法により高い止水性を確保するためには、 100μ を下回る微小亀裂まで改良する必要があるが、これらの微小亀裂を懸濁型グラウト材料により改良する場合は、亀裂入り口における目詰まり現象が重要となる。昨年度は、この目詰まり現象を把握するために高圧のグラウト圧を載荷可能な試験装置を製作し、予備的な試験を実施した。今年度は、この試験装置を一部改良し、将来的には複数亀裂の模擬が可能となる試験装置を製作する。次に、単一亀裂を対象に、グラウト材料径、水セメント比、シリカフェームの有無及び混和量をパラメーターとし、本試験装置を用いて注入圧力を連続的に上昇させる高圧目詰まり試験を実施し、単一亀裂における亀裂入り口の目詰まり特性とグラウト物性及び注入圧力との関係を把握する。

2.4 グラウト材料の浸透特性の整理と成果の取りまとめ

配合切替や、ダメ押し注入等のグラウト停止基準を決定するためには、亀裂入り口のみならず亀裂内部におけるグラウト材料の浸透挙動、及び複数亀裂に対する浸透挙動の把握が必要となる。国内外においては、水セメント比の高い低濃度のセメント材料から水セメント比の低い高濃度高粘性のセメント材料に対して幅広く研究が実施されており、グラウト浸透特性に関する様々な浸透理論が存在しているのが現状である。そこで、これらのうち特に高濃度高粘性グラウト材料を対象とした既往研究を調査し、残されている技術的課題を整理する。さらに、本件においてこれ

までに実施してきた研究成果の取りまとめを行い、解決すべき課題を抽出し、これらの知見にもとづき次年度以降の研究計画を立案し、研究の方向性について整理する。

3. グラウト材料の基本物性の確認

3.1 試験の目的

以下の試験を実施し、以降の粘性特性の検討（4章）及び高圧目詰まり試験（5章）に使用する材料及びグラウト配合を選定する。

- 分散方法に関する検討：グラウトエイド（シリカフェームスラリー）に対して使用すべき分散剤及び攪拌方法について予備的に検討を実施し、ブリーディングの発生を抑えながら粘性を低下させる適切な分散方法（分散剤種類、添加量、攪拌方法）を選定する。
- 基本物性確認試験：普通セメント、超微粒子セメント、超々微粒子セメント、懸濁型特殊シリカを対象として、グラウト材料の物性を確認し、以降の試験に使用する材料及びその配合を選定する。

試験の手順としては、まずグラウト材料の分散方法に関する検討として、分散剤及び攪拌方法の検討を実施し、その後、基本物性確認試験を実施する。最後にこれらの試験結果よりグラウト材料及び配合の絞り込みを行う。

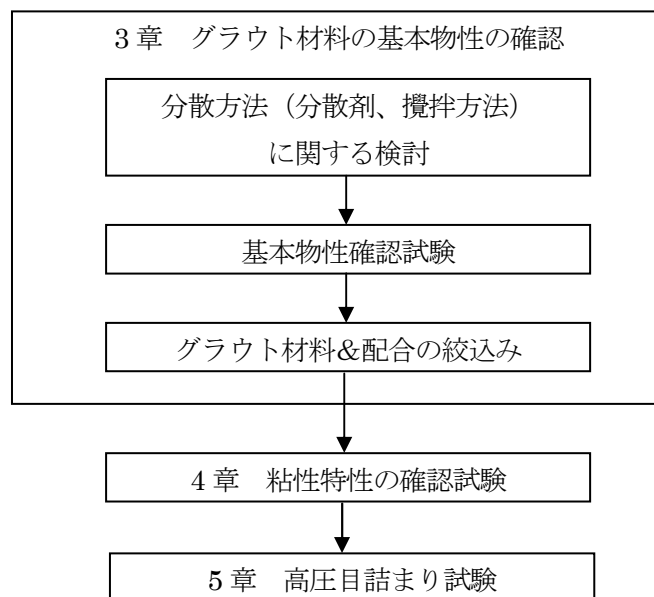


図 3.1-1 試験研究の流れ

3.2 分散方法に関する検討

昨年度実施した試験では、グラウトエイドを粉体量の5、10%混和した超微粒子セメントにナフタリン系分散剤を2.8%添加した場合は、ブリーディング量が70%以上と極めて高い結果となった。このため、高圧目詰まり試験においては、スリット上に材料分離したセメント材料が沈殿し、フィルターケーキが大量に生じるという結果となった（図 3.2-1参照）。

一方、グラウトエイドを多量に（粉体量の41%）混和した超微粒子セメントにナフタリン系分散剤を2.0%添加した場合は、ブリーディング量は1%と極めて小さいが、擬塑性流体となり、粘性（特に、降伏強度）が高いという問題点があった（表 3.2-1参照）。

そこで、グラウトエイドの添加量に応じて適切な分散方法を選定するために、図 3.2-2に示す基礎的な試験検討を実施した。



図 3.2-1 フィルターケーキの生成例¹⁾

表 3.2-1 平成 17 年度実施したグラウト物性試験結果¹⁾

	単位	配合 2	配合 3	配合 4
		w/c=1.6 (グラウトエイド : 0%)	w/c=1.6 (グラウトエイド : 10%)	w/c=1.6 (グラウトエイド : 41%)
超微粒子セメント	kg	20.000	20.000	20.000
グラウトエイド (スラリー)	kg	0.000	4.44	27.797
水	kg	32.000	33.333	40.339
分散剤	kg	0.560	0.622	0.678
体 積	L	39.123	43.682	67.413
単位重量	kg/m ³	1343	1337	1317
ブリーディング試験結果 (24h)	%	69	75	1
見掛粘度	mPas	2.5	3.1	223
1 軸圧縮強度 (MPa)	7 日	—	—	0.4
	28 日	—	—	8.6

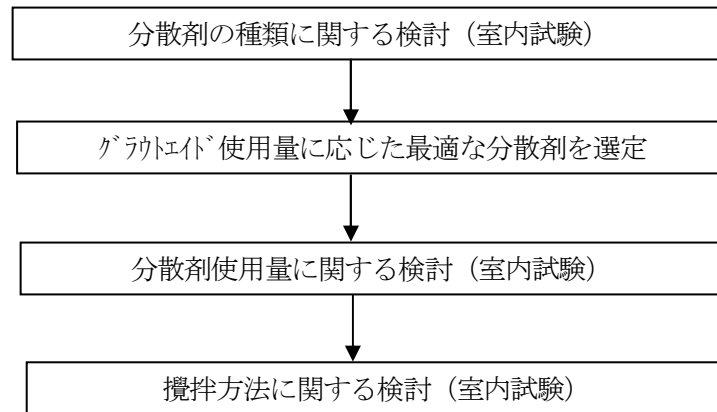


図 3.2-2 検討フロー

3.2.1 使用材料

セメントは昨年度と同様にA社製の超微粒子セメントを使用するものとした。分散剤としては、以下の4種類を使用した。

- セメント：超微粒子セメント
- 添加材：シリカフェームスラリー（グラウトエイド）
- 分散剤：メラミンスルホン酸系
 - ナフタリンスルホン酸系（遅延剤入り）
 - ナフタリンスルホン酸系（遅延剤無し）
 - ポリカルボン酸系



図 3.2-3 使用材料

(左図中上：超微粒子セメント、左図中下：グラウトエイド、右図：ポリカルボン酸分散剤)

3.2.2 分散剤種類の検討

(1) 試験項目

放射性廃棄物地層処分を対象としたグラウト材料に要求される要求性能は現状では明確ではない。一方、NUMO、SKB、Posiva による共同研究の中では、放射性廃棄物地層処分に使用する低 pH セメントグラウト材料に関する要求基準が設定されている（表 3.2-2、表 3.2-3参照）。なお、同表中ではグラウト材料の微小亀裂への浸透性能（目詰まり特性）は以下の指標で表されている。

- ・ b_{min} : グラウト材が全く浸透しない最小の亀裂開口幅
- ・ b_{crit} : グラウト材が全て浸透する最小の亀裂開口幅

表 3.2-2 材料に関する要求性能¹⁾

要求度	特性	要求値	試験方法
要求性能	pH	≤ 11	滲出試験
	浸透性能 b_{min}	≤ 80 μm	浸透試験（60分経過後） ペネトレーティメーター
	浸透性能 b_{crit}	≤ 120 μm	
望ましい性能	粘性	≤ 50mPas	60分経過後
	ブリーディング	≤ 10%	2時間経過後
	ワーカビリティ	≥ 60min	浸透性能と粘性より判断
	せん断強度	≥ 500Pa	フォールコン試験（6時間経過後）
	降伏強度	≤ 5Pa	60分経過後
	一軸圧縮強度	≥ 4MPa	28日強度

表 3.2-3 材料に関する要求性能（非公式修正版）¹⁾

要求度	特性	要求値	試験方法
要求性能	pH	≤ 11	滲出試験
	浸透性能 b_{min}	≤ 80 μm	浸透試験（60分経過後） ペネトレーティメーター
	浸透性能 b_{crit}	≤ 120 μm	
望ましい性能	粘性	設定せず	60分経過後
	ブリーディング	≤ 10%	2時間経過後
	ワーカビリティ	≥ 60min	マッシュコン試験
	せん断強度	≥ 2kPa	フォールコン試験
	降伏強度	設定せず	60分経過後
	一軸圧縮強度	≥ 8MPa (但し、他の性能が優れている場合は7MPaでも可)	28日強度

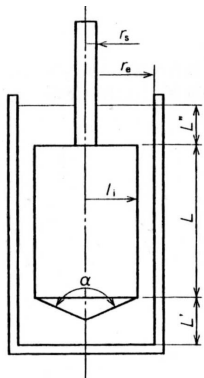
上記の要求基準は大きく以下の 5 項目に分類される。

- 低アルカリ度 (pH 値)
- 亀裂入り口における目詰まり特性
- 浸透性能 (粘性、ワーカビリティ)
- ブリーディング
- 強度特性 (初期強度、最終強度)

そこで、上記を参考に、今回の試験の中では以下の項目に関する試験を実施し、使用する材料の絞り込みを実施するものとした。

- ・ ブリーディング量 (3 時間、24 時間) : 土木学会規準「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率試験方法」(JSCE-1986) に準拠
- ・ 粘性測定 : ブルックフィールド社製回転粘度計 (測定治具 : 共軸二重円筒型、図 3.2-4 参照)
- ・ 浸透性 (鋼製メッシュ #80 (目開き $200\mu\text{m}$) に対する自重によるグラウト通過量) : 簡易目詰まり試験装置 (図 3.2-5参照、鋼製メッシュ : 参照、呼称については図 3.2-6 参照)
- ・ 強度特性 (3 時間、24 時間のせん断強度) : ベーンせん断試験装置 (図 3.2-7参照)

なお、亀裂への浸透性や亀裂入り口における目詰まり特性については目詰まり試験により再度詳細に確認し、低アルカリ度については次年度以降確認するものとした。



二重円筒システム



図 3.2-4 回転粘度計



鋼製メッシュ #80
(目開き = $200\mu\text{m}$)

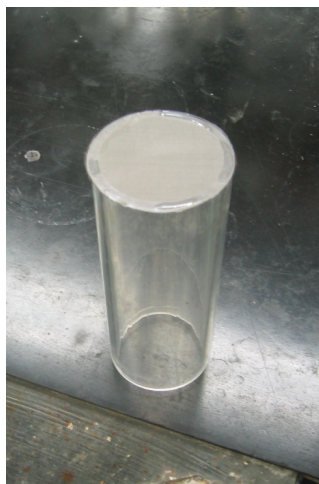


図 3.2-5 簡易目詰試験装置

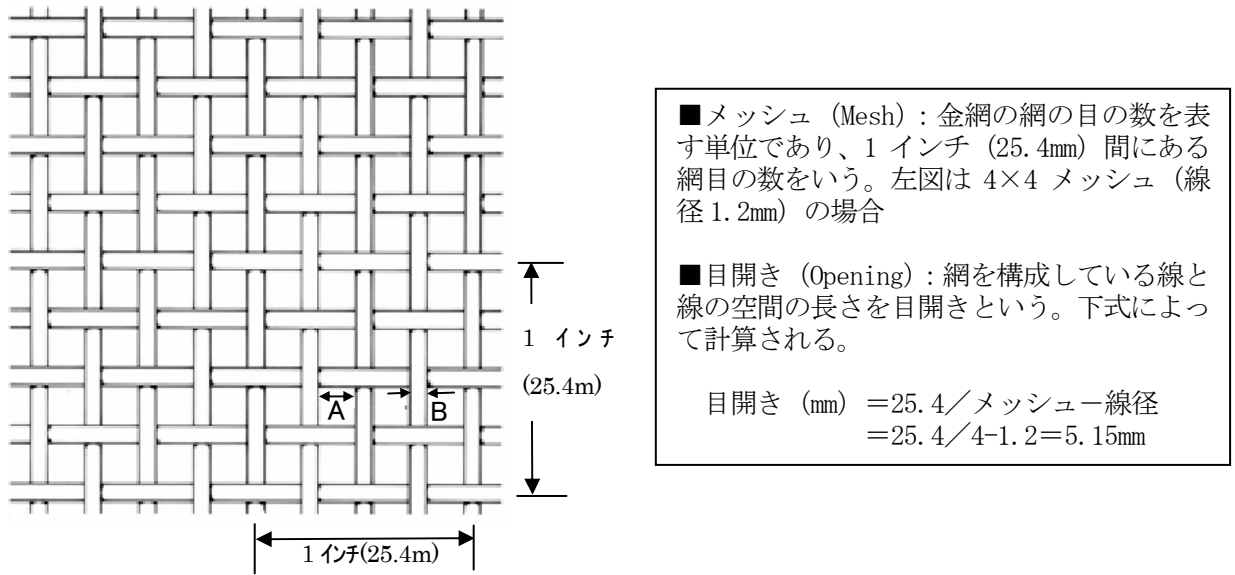


図 3.2-6 鋼製メッシュの呼び方



図 3.2-7 ベーンせん断試験装置

(左図：測定状況、右図：測定状況拡大図、右図：ベーン治具)

表 3.2-4 主要機器一覧表

装置	性能
ベーン試験器	D×d=30×30[mm] 最大測定せん断力：43[kN/m ²]
デジタル粘度計	最大せん断速度：264[1/s] せん断速度 200[1/s]における最大測定応力：65[dyne/cm ²]
ミキサー	最大回転数：1200[rpm] (トルク力 大) 最大回転数：3600[rpm] (トルク力 小) →粘性により最大回転数が低下
攪拌翼	Φ40～100[mm] 各形状取り付け可能(ファン、タービン、プロペラ等)

(2) 試験配合

分散剤の種類（メラミンスルホン酸系、ナフタリンスルホン酸系、ポリカルボン酸系）、グラウトエイドの添加の有無を変化させた以下の配合で試験を実施した（表 3.2-5参照）。なお、水粉体比については昨年度と同様に1.6とし、分散剤添加量はグラウトとして標準的な1.0%に固定した。

表 3.2-5 分散剤種類の検討に用いる配合

配合名	分散剤種類	GA 添加量	水粉体比	分散剤添加量
GA00MM10N*1	メラミンスルホン酸系	0%	1.6	粉体量の1%
GA10MM10N		10%		
GA00NF10N	ナフタリンスルホン系	0%		
GA10NF10N		10%		
GA00PC10N	ポリカルボン酸系	0%		
GA10PC10N		10%		
GA00NN10N	ナフタリンスルホン系 (遅延剤無し)	0%		
GA10NN10N		10%		

- *1：・最初の4文字（例：GA00）：グラウトエイド添加量
 ・5、6文字目（例：MM）：分散剤種類（MM：メラミン系、NF：遅延剤入りナフタリン系、PC：ポリカルボン酸系、NN：遅延剤無しナフタリン系）
 ・7、8文字目（例：10）：分散剤添加量（10⇒1.0%）
 ・9文字目（例：N）：攪拌方法（N：円形攪拌槽、φ68mmファン、回転速度800rpm）

(3) 攪拌方法

攪拌方法は、円形の攪拌槽、φ68の攪拌翼（図 3.2-8）を用いて、攪拌速度800rpmにより以下の攪拌を実施した（図 3.2-9参照）。

(i) グラウトエイド入り

水道水+分散剤+セメントを3分間攪拌した後、グラウトエイドを加えてさらに3分間攪拌する（合計6分間の攪拌）。

(ii) グラウトエイド無し

水道水+分散剤+セメントを3分間攪拌する。



図 3.2-8 使用する攪拌翼（ピッチドパドル翼）
 （左側：φ68mm、右側：φ100mm）



図 3.2-9 攪拌状況

(4) 試験結果

試験結果を表 3.2-6及び図 3.2-10～図 3.2-15に示す。

表 3.2-6 分散剤種類の検討試験結果

配合名	ベーン試験 (Pa)		ブリーディング率(%)		粘度 (mPa·s) *1		#80 透過率(%)
	3h	24h	3h	24h	粘度	温度 (°C)	
GA00MM10N	59	8963	16	17	39.0	25.3	97
GA10MM10N	40	2711	9	12	71.3	25.8	52
GA00NF10N	0	297	22	40	3.7	25.0	100
GA10NF10N	0	1385	18	29	14.8	25.0	96
GA00PC10N	20	6628	17	19	6.7	25.6	99
GA10PC10N	40	4076	6	7	39.2	24.4	52
GA00NN10N	20	14028	17	18	18.2	26.4	100
GA10NN10N	40	5026	16	16	24.7	24.4	42
グラウトエイト®単体	—	—	—	—	11.5*2	—	—

*1：せん断速度 22.4 (1/s) における見掛粘度

*2：振動式の粘度型粘度計による測定結果 (図 3.2-12参照)

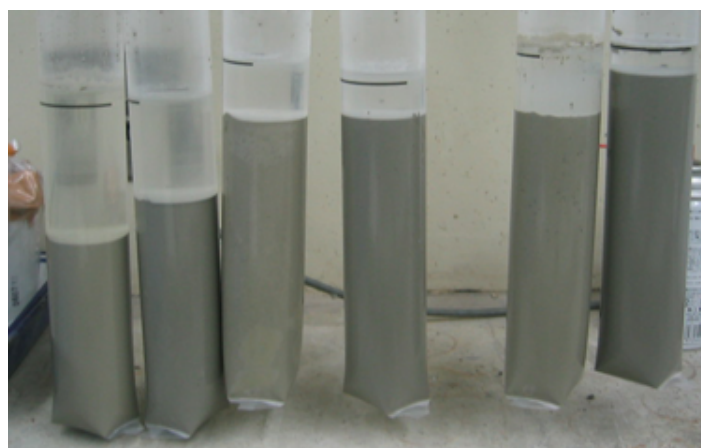


図 3.2-10 ブリーディング試験結果例
(左から、GA00NF10N, GA10NF10N, GA00MM10N,
GA10MM10N, GA00PC10N, GA10PC10N)

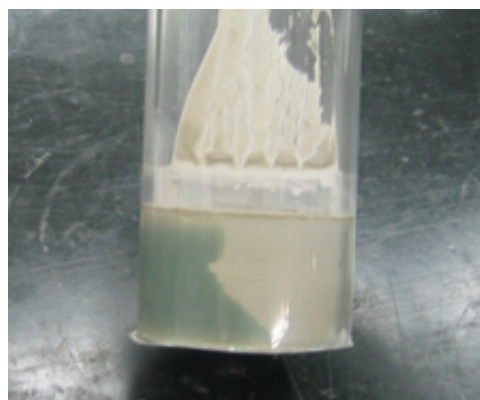


図 3.2-11 簡易目詰試験結果例
(GA10MM10N)

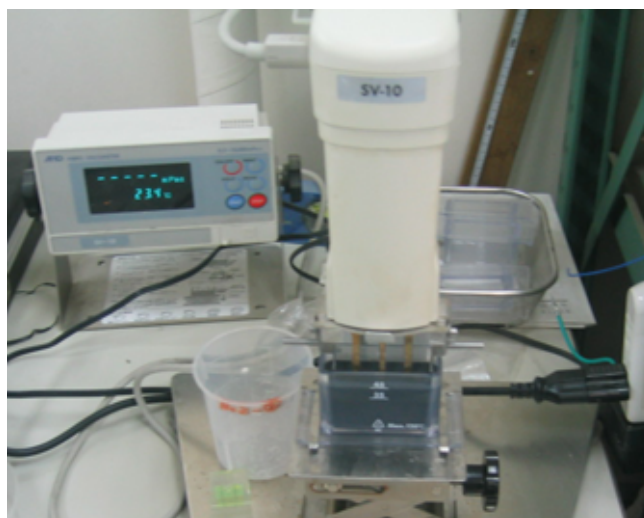


図 3.2-12 グラウトエイドの粘性測定状況 (振動型粘度計による)

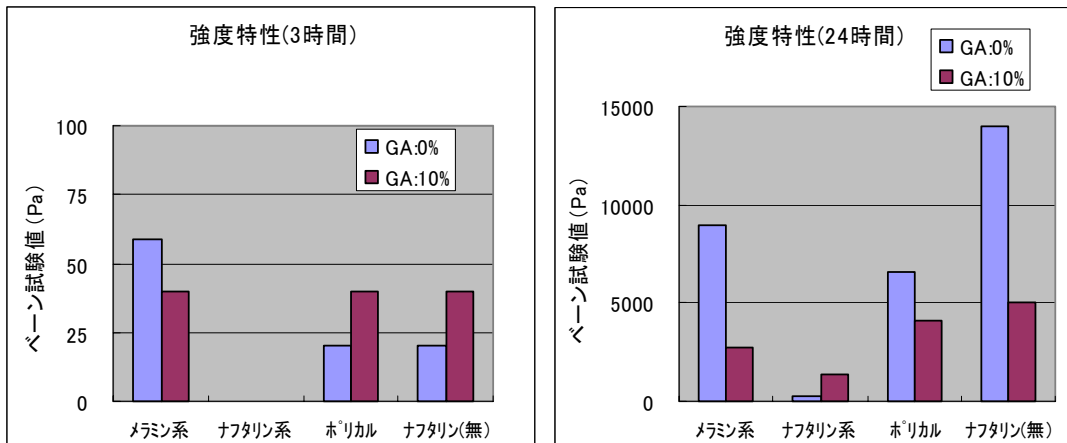


図 3.2-13 ベーンせん断試験結果

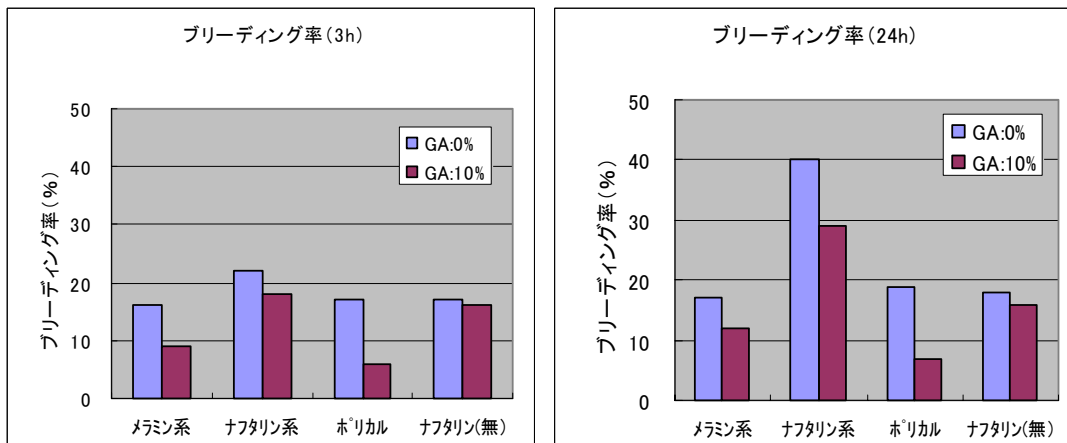


図 3.2-14 ブリーディング試験結果

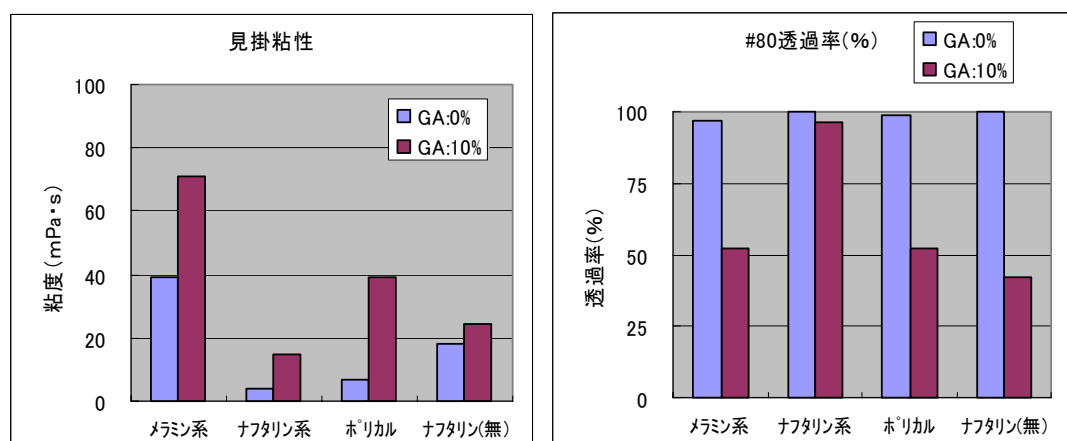


図 3.2-15 粘度、簡易目詰試験結果

上記の試験結果を、表 3.2-7に示すように配点することで、性能を比較して図 3.2-16、図 3.2-17に示す。

表 3.2-7 配点基準

	1	2	3	4	5
ベーン試験 (Pa)	2000未満	2000-4000	4000-6000	6000-8000	8000以上
ブリーディング率 (%)	40以上	30-40	20-30	10-20	10未満
粘度 (mPa・s)	80以上	60-80	40-60	20-40	20未満
透過率 (%)	30未満	30-50	50-70	70-90	90以上

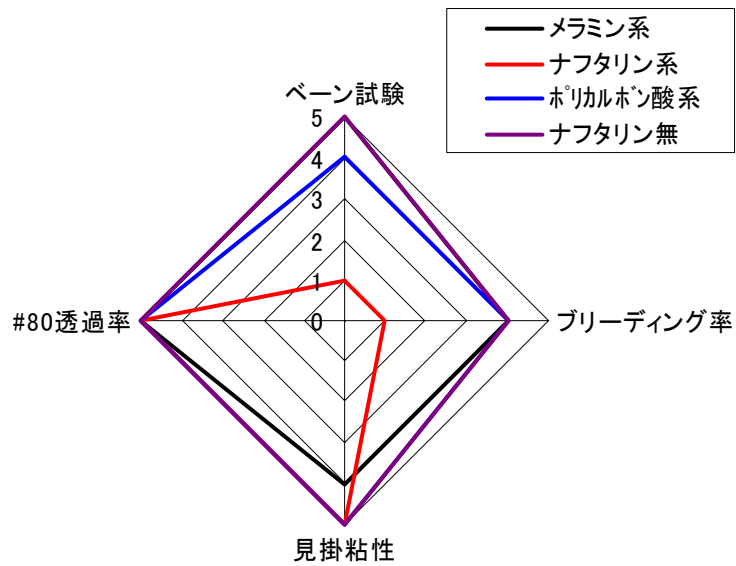


図 3.2-16 分散剤種類による性能比較図 (GA=0%)

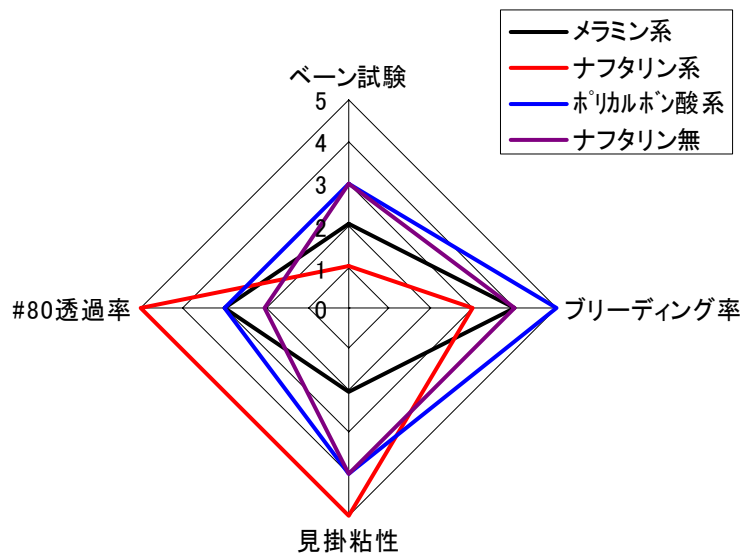


図 3.2-17 分散剤種類による性能比較図 (GA=10%)

上記の結果より以下のことが言える。

- ・ グラウトエイドを 10% 添加したことにより、ブリーディング量は有意に低下するというメリットがある。しかしながら、24 時間後のせん断強度が低下し、さらに粘性が上昇し、#80 (目開き量 200 μ m) 通過量が減少するというデメリットも存在する。
- ・ ナフタリン系分散剤 (遅延剤入り) は、粘性低減効果に優れており、メッシュ透過量も増大する。一方、初期せん断強度については、メラミン系とナフタリン系分散剤 (遅延剤無し) に比べて大きく劣ることがわかる。逆に、メラミン系とナフタリン系分散剤 (遅延剤無し) は、初期強度は高いが、粘性が高く、メッシュ透過量も低くなる。
- ・ ポリカルボン酸系分散剤は、グラウトエイドの有無に係わらず、全体的に優れており、ナフタリン系ほどの粘性低下は期待出来ないが、初期強度が高く、ブリーディングが小さい。

上記より、今後の実験で使用する分散剤は以下の通りとする。

- ・ グラウトエイドを使用しない場合：初期強度が高く、粘性が比較的低いポリカルボン酸系分散剤を使用
- ・ グラウトエイドを 10% 添加する場合：強度発現性が高く、粘性が比較的低いポリカルボン酸系分散剤を使用
- ・ グラウトエイドを 41% 添加する場合：昨年度の試験において、他の供試体に比べて、粘性が高く浸透性が大幅に悪いという結果が得られている。このため、最も粘性が低くメッシュ透過量の多いナフタリン系 (遅延剤入り) を使用

参考としてポリカルボン酸系分散剤を用いて、グラウトエイドを 10% 添加した GA10PC10N について、せん断速度を変えて粘性を測定した結果を図 3.2-18 に示す。同図に示すように、流動曲線は非ニュートン流体的挙動を示すことがわかる。また、今回使用したポリカルボン酸系分散剤には消泡機能が無いため攪拌時に気泡が発生するという軽微な問題はある (図 3.2-19 参照)。

グラウトエイドを使用した場合は、簡易目詰試験の後に、メッシュ上に堆積したケーキを水で洗い流すと、図 3.2-20 に示すような柔らかい大粒の残留物が確認され、グラウトエイドを 10% 添加した場合についても、グラウトエイド中のシリカフェームとセメントが凝集体を形成していることがわかる。

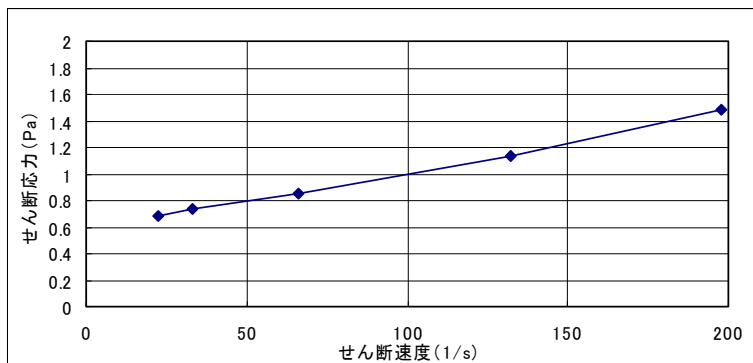


図 3.2-18 塑性粘度の測定結果 (配合 GA10PC10N)

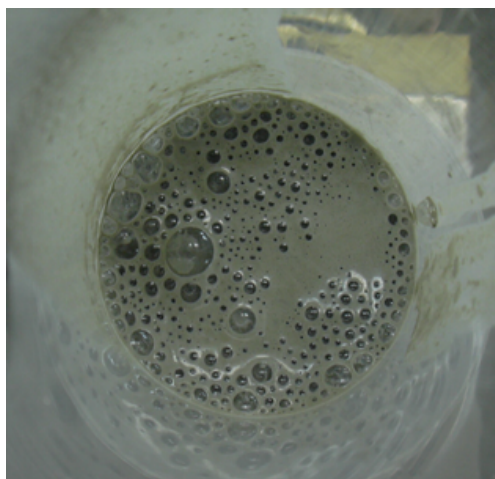


図 3.2-19 今回のポリカルボン酸系分散剤による練混ぜ状況 (気泡が出来ている)



図 3.2-20 メッシュ上の残留物の状況 (配合 GA10PC10N)

3.2.3 分散剤添加量の検討

前節で選定した分散剤について、グラウトエイドを0、10、41%添加した場合について、最適な分散剤の添加量について検討した。

(1) 試験項目

前項と同じ。

(2) 試験装置

前項と同じ。

(3) 試験配合

分散剤の添加量を変化させた以下の配合（表 3.2-8）で試験を実施した。

攪拌時間については、前節と同様に、グラウトエイドを使用する場合は、水道水+分散剤+セメントを3分間攪拌し、グラウトエイドを加えてさらに3分間攪拌した（合計6分間の攪拌）。また、グラウトエイドを使用しない場合は、水道水+分散剤+セメントを3分間攪拌した。

表 3.2-8 分散剤種類の検討に用いる配合

配合名	分散剤		グラウトエイド 添加量	水粉体比	攪拌方法
	種類	添加量			
GA00PC05N	ポリカル系	0.5%	0%	1.6	回転数： 800回転/分 攪拌翼種類： φ68mm
GA10PC05N			10%		
GA00PC15N		1.5%	0%		
GA10PC15N			10%		
GA41NF10N	ナフタリン系	1.0%	41%		
GA41NF20N		2.0%			
GA41NF30N		3.0%			

(4) 試験結果

試験結果を表 3.2-9及び図 3.2-21～図 3.2-26に示す。

表 3.2-9 分散剤種類の検討試験結果

配合名	ベン試験 (Pa)		ブリーディング率(%)		粘度 (mPa·s) *1		#80 通過率(%)
	3h	24h	3h	24h	粘度	温度 (°C)	
GA00PC05N	20	22971	19	19	12.2	24.0	99
GA10PC05N	0	8844	10	14	28.4	24.0	25
GA00PC15N	0	2137	29	37	3.5	24.1	100
GA10PC15N	0	9121	7	9	18.7	25.0	43
GA41NF10N	40	3245	0	1	—*2	25.6	14
GA41NF20N	20	2612	0	1	144.9	24.6	15
GA41NF30N	0	198	0	4	55.0	24.2	20

*1：せん断速度 22.4 (1/s) における見掛粘度

*2：レンジオーバーにより測定不能

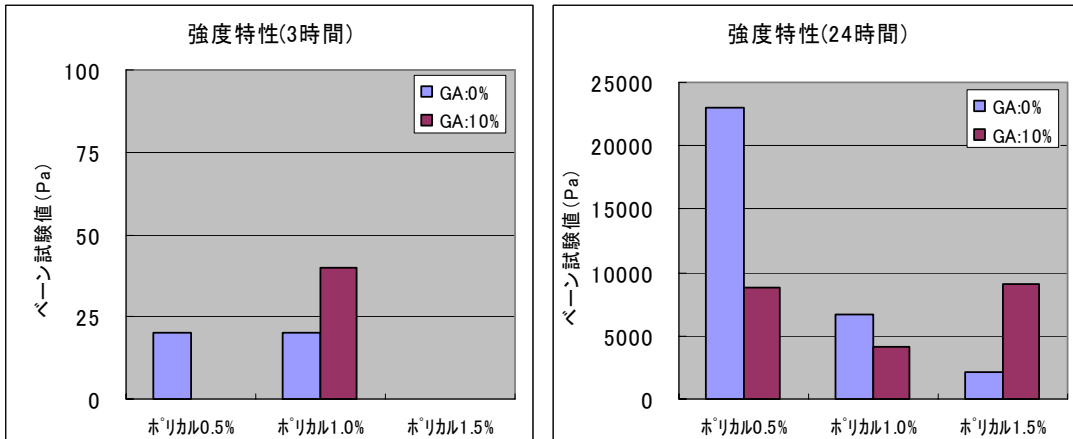


図 3.2-21 ベーンせん断試験結果 (GA : 0%、10%)

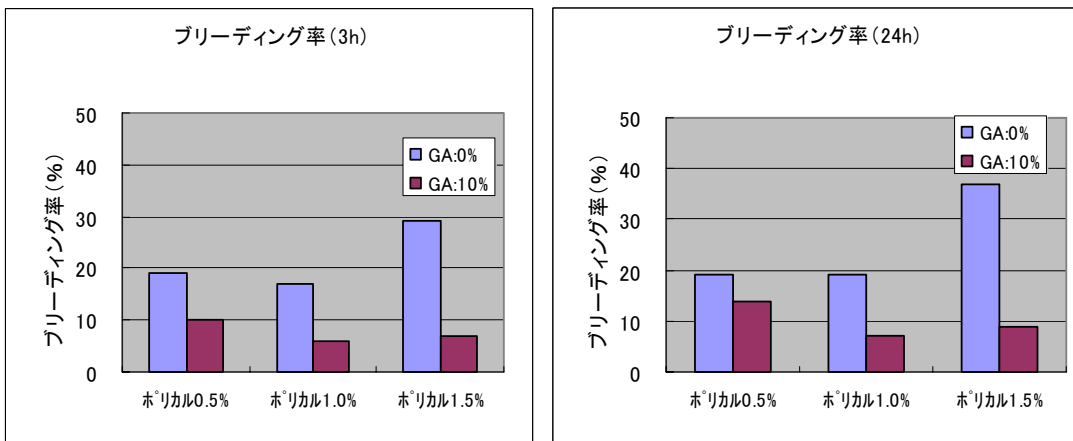


図 3.2-22 ブリーディング試験結果 (GA : 0%、10%)

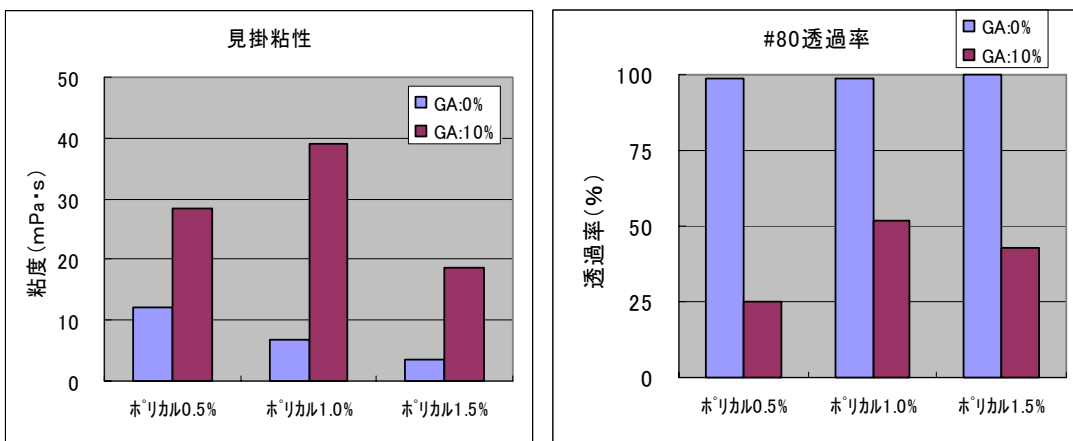


図 3.2-23 粘度、簡易目詰試験結果 (GA : 0%、10%)

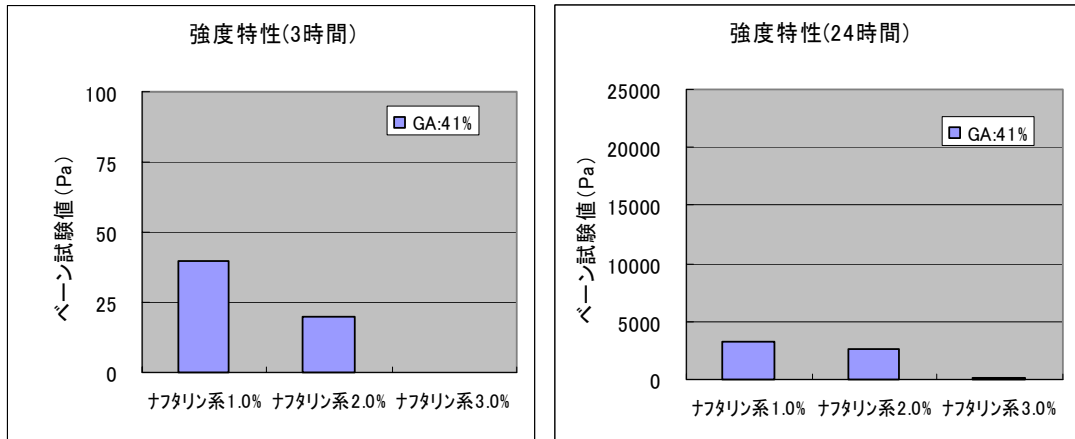


図 3.2-24 ベーンせん断試験結果 (GA : 41%)

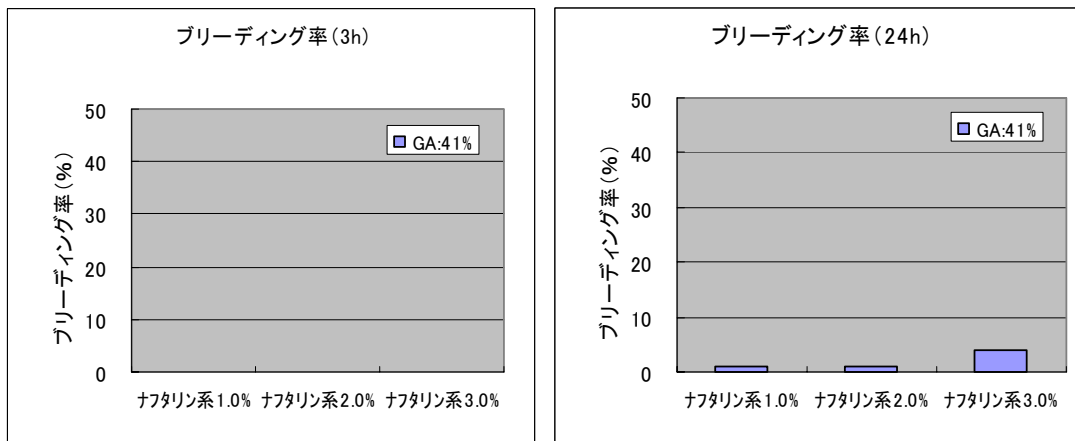


図 3.2-25 ブリーディング試験結果 (GA : 41%)

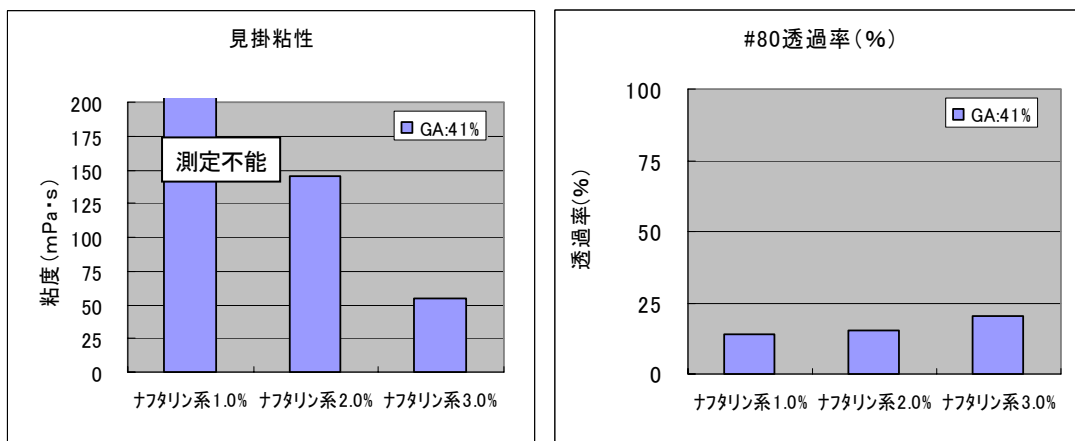


図 3.2-26 粘度、簡易目詰試験結果 (GA : 41%)

上記の試験結果を、表 3.2-7に示すように配点することで、性能を比較した結果を図 3.2-27、
 図 3.2-28、図 3.2-29に示す。

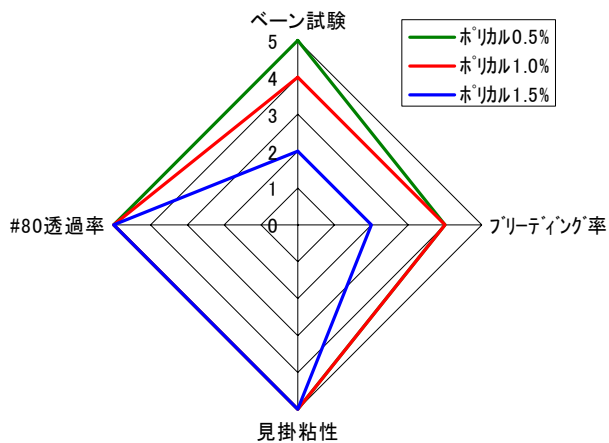


図 3.2-27 分散剤添加量の性能比較図 (GA=0%)

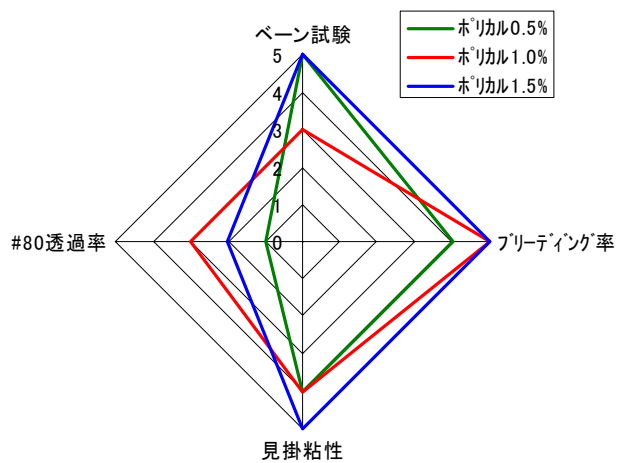


図 3.2-28 分散剤添加量の性能比較図 (GA=10%)

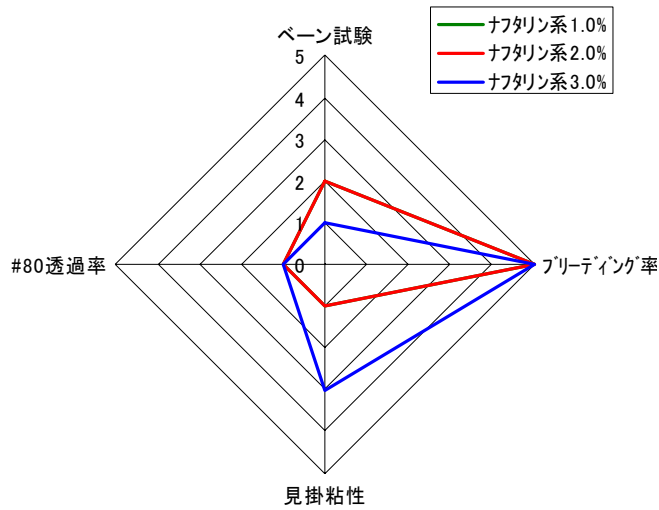


図 3.2-29 分散剤添加量の性能比較図 (GA=41%)

上記の結果より、以下のことが言える。

- ・ グラウトエイドを使用しない場合：初期強度に関しては、分散剤使用量に逆比例して初期強度が顕著に低下する。プリーディングについては、分散剤を 1.5%添加した場合のみ、プリーディングが 37%に増加しており、やや過分散状態になっている可能性がある。粘性に関しては、分散剤の使用量に比例して減少しているが、分散剤を 0.5%添加した場合においても、見掛粘度は $12.2\text{mPa}\cdot\text{s}$ と十分に小さい値となっている。また、鋼製メッシュに対する浸透率については、今回使用したメッシュサイズ（目開き量 $200\mu\text{m}$ ）では有意な違いは見られなかった。
- ・ グラウトエイドを 10%添加する場合：初期強度に関しては、分散剤使用量に係わらず初期強度はほぼ同等であった。プリーディングに関しては、分散剤を 1.0%添加した場合が最も優れているが、1.5%でもプリーディングが 10%以下となっており十分小さな値となっている。粘性は逆に分散剤を 1.0%添加した場合が一番大きい、浸透性に関しては逆に 1.0%が最も優れているという結果となった。また、分散剤を 1.5%添加した場合は、上澄み液にグラウトエイドが浮いており（図 3.2-30参照）、過分散状態になっているものと考えられる。
- ・ グラウトエイドを 41%添加する場合：初期強度に関しては、3%添加した場合は強度発現性が極端に劣るため、分散剤の過剰添加であることがわかる。一方、プリーディングに関しては全ケースにおいて優れている。粘性に関しては分散剤を 1.0%添加した場合は、今回使用したB型粘性計では測定レンジをオーバーしており、分散剤を 2.0%添加した場合でも粘性が $144.9\text{mPa}\cdot\text{s}$ と高すぎる。また、浸透性は分散剤を 3.0%添加しても改善されていない。このため、どの添加量においても十分な性能が得られていないため、次節における攪拌方法の検討において分散剤の添加量を決定するものとする。

上記より、分散剤添加量は以下の通りとした。

- ・ グラウトエイドを添加しない場合：平均的に優れているポリカルボン酸系分散剤 1.0%を採用する
- ・ グラウトエイドを 10%添加する場合：浸透性に最も優れているポリカルボン酸系分散剤 1.0%を採用する
- ・ グラウトエイドを 41%添加する場合：暫定的にナフタリン酸系分散剤 3.0%とし、次節において決定する



図 3.2-30 GA10PC15N の上澄み液
(上澄み液にグラウトエイドが浮いている状態)

3.2.4 攪拌方法の検討

一般的にスラリーの攪拌に使用する攪拌翼には、攪拌槽内のスラリー全体を流動させる液循環作用と速度勾配により局所的な混合を達成させるせん断作用がある。また、一般的には低粘性のスラリーでは、流れの慣性力が非常に良く効く範囲では ($Re > 1000$) 完全乱流状態の攪拌となるため、液循環作用の高いプロペラ翼やピッチドパドル翼が使用される (図 3.2-31参照)。一方、高粘性のスラリーでは、上記の翼では攪拌翼のごく近傍しか活発に流動しないため、停滞する部分が形成される。このため、高粘度スラリーの場合には翼径/槽径、翼幅 (翼高さ) / 液深の割合を大きくして攪拌作用が攪拌槽の全体に及ぶようにした上で、フラッタータービン等のせん断作用の高い攪拌翼が採用される (図 3.2-32参照) ②。



図 3.2-31 プロペラ翼 (左図) とピッチドパドル翼 (右図)



図 3.2-32 フラッタータービン翼 (左図) と DS インペラ翼 (右図)

次に、攪拌槽の形状によっても攪拌効果は異なっており、円形の攪拌槽と角型の攪拌槽を使用する場合には表 3.2-10に示すようなメリットとデメリットが存在する。

表 3.2-10 攪拌槽形状による特徴

攪拌槽形状	メリット	デメリット
円形形状	<ul style="list-style-type: none"> 耐圧性能に優れている。 	<ul style="list-style-type: none"> バッフル (邪魔板) を設けない場合、旋回流となり、攪拌効果が低い 液がローリングを起こすなど不安定となり、機械的トラブル (シャフトの折損など) の原因となる
角型形状	<ul style="list-style-type: none"> バッフル (邪魔板) が不要 場所の利用効率が低い 	<ul style="list-style-type: none"> 隅部において停滞部ができやすく攪拌不良の原因となる (隅部の面取り、R加工で対応可)

また、攪拌力は攪拌翼の回転速度と攪拌槽の寸法にも依存しており、様々な相似則が存在するが、グラウトミキサーに一般的に適用される相似則は単位体積当りの所要動力を一定とする³⁾以下の式である。

$$N^3 D^2 = \text{const.} \quad (\text{数式 3.2-1})$$

ここに、N：回転数/分

D：スケール代表寸法

図 3.2-20に示すようにグラウトエイドを添加する場合にはセメントとシリカフェームが凝集しやすいため、攪拌効果の高い攪拌方法を採用する必要がある。そこで、今年度の目詰まり試験においては図 3.2-33に示す角型攪拌槽 T-MG-50（実工事サイズ）を使用することを前提に、室内試験においても同様な角型の攪拌容器（室内試験サイズ）を利用することとする（図 3.2-34 参照）。

参考として、円形槽、円形槽（邪魔板付き）、角型槽における攪拌状況を図 3.2-35に示す。

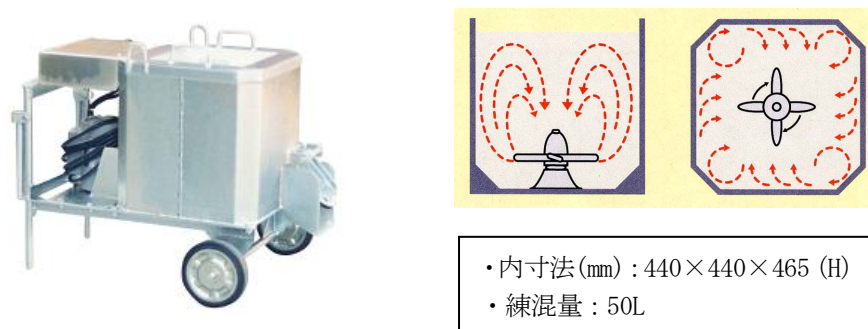


図 3.2-33 目詰まり試験で使用する角型攪拌槽（実工事サイズ）



図 3.2-34 室内における攪拌容器（室内試験サイズ）

円形攪拌槽
Φ100mmファン邪魔板無し



円形攪拌槽
Φ100mmファン邪魔板有り



角型攪拌槽
Φ100mmファン邪魔板無し



図 3.2-35 邪魔板及び攪拌槽による攪拌力の影響

(1) 試験配合

円形攪拌槽に邪魔板を付けない場合（前項で実施済み）、円形攪拌槽に邪魔板を付けた場合、角型攪拌槽を用いた場合の3種類の攪拌方法を用いて攪拌されたグラウト材の性能を比較することで、邪魔板及び攪拌容器の形状がグラウト材の性能に与える影響を検討した（表 3.2-11）。特に、角型攪拌槽を用いた試験においては、目詰まり試験において使用する角型ミキサーの寸法（440mm×440mm×465mm）を考慮して、相似則（数式 3.2-1 参照）に従い、以下の回転数を使用した。

- ・ 実機 1000 回転/分に相当：2080 回転/分
- ・ 実機 800 回転/分に相当：1660 回転/分

（角型槽の場合には攪拌翼のサイズ／攪拌槽寸法の比率を実機と合せて攪拌翼をφ68mm とする）

表 3.2-11 攪拌方法に関する検討

配合名	分散剤添加量	GA 添加量	水粉体比	攪拌方法
GA00PC10B	ポリカル系 1.0%	0%	1.6	回転数：800 回転/分 攪拌翼種類：φ100mm 2cm バッフル付
GA10PC05B	ポリカル系 0.5%	10%		
GA10PC10B	ポリカル系 1.0%			
GA10PC15B	ポリカル系 1.5%			
GA41NF10B	ナフタリン系 1.0%	41%		角型槽回転数 2080 回転/分 攪拌翼種類：φ68mm
GA41NF20B	ナフタリン系 2.0%			
GA41NF30B	ナフタリン系 3.0%			
GA41NF30S-2080	ナフタリン系 3.0%	41%		角型槽回転数 1660 回転/分 攪拌翼種類：φ68mm
GA41NF30S-1660	ナフタリン系 3.0%			

(2) 試験結果

試験結果を表 3.2-12及び図 3.2-36～図 3.2-47に示す。

表 3.2-12 分散剤種類の検討試験結果

配合名	ベン試験 (Pa)		ブリーディング率(%)		粘度 (mPa・s) *1		#80 通過率 (%)
	3h	24h	3h	24h	粘度	温度 (°C)	
GA00PC10B	20	6866	17	17	39.2	24.4	100
GA10PC05B	20	4056	6	6	65.6	24.6	84
GA10PC10B	40	7222	7	8	48.3	24.3	84
GA10PC15B	40	8726	5	7	17.0	24.8	73
GA41NF10B	59	6984	0	0	—*2	24.9	67
GA41NF20B	40	5184	0	0	—*2	24.4	89
GA41NF30B	20	198	0	2	60.5	24.4	92
GA41NF30S-2080	0	99	0	2	51.0	26.2	98
GA41NF30S-1660	0	99	0	3	63.3	26.5	98

*1：せん断速度 22.4 (1/s) における見掛粘度

*2：レンジオーバーにより測定不能

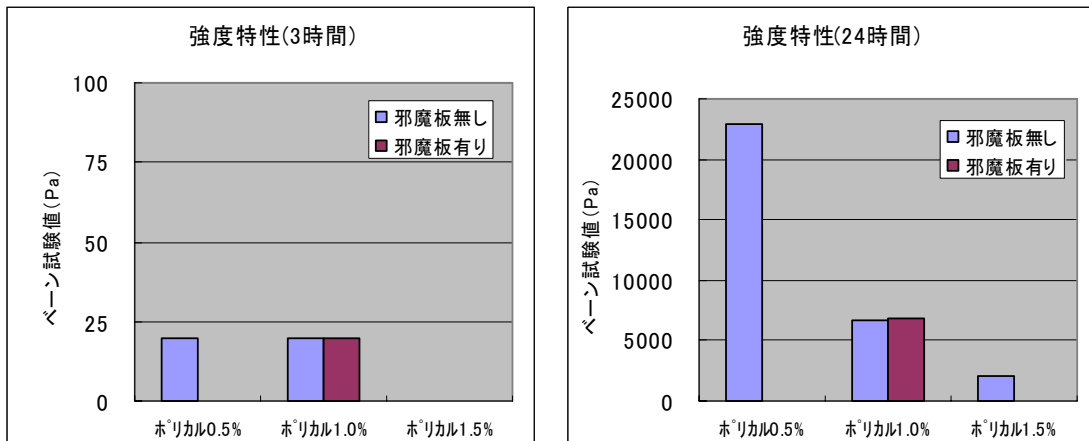


図 3.2-36 ベーンせん断試験結果 (GA : 0%)

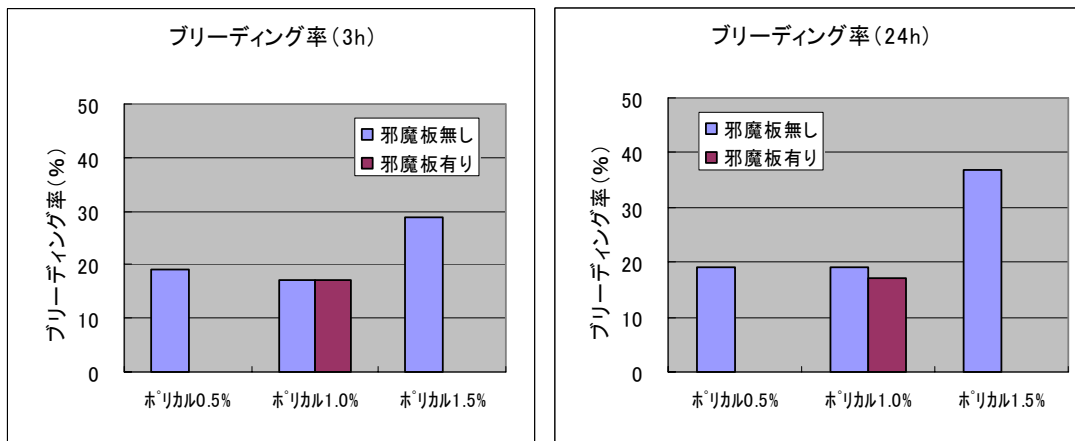


図 3.2-37 ブリーディング試験結果 (GA : 0%)

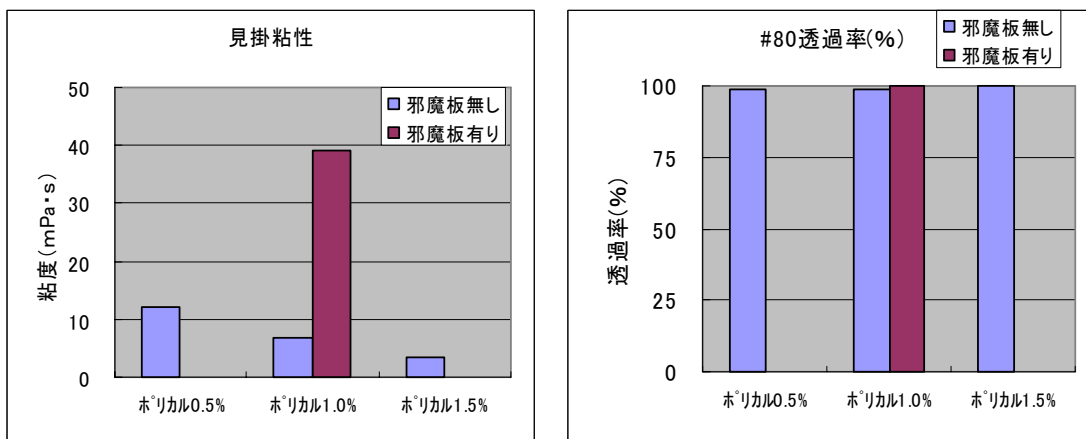


図 3.2-38 粘度、簡易目詰試験結果 (GA : 0%)

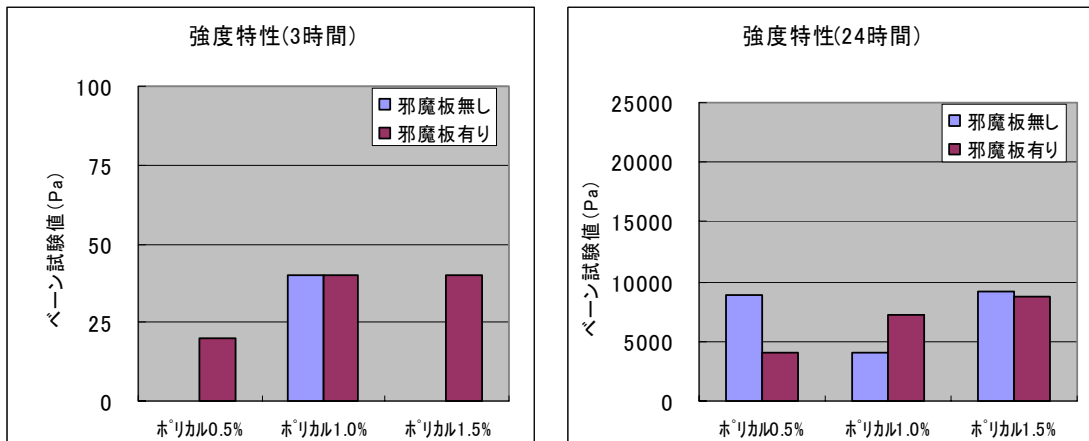


図 3.2-39 ベーンせん断試験結果 (GA : 10%)

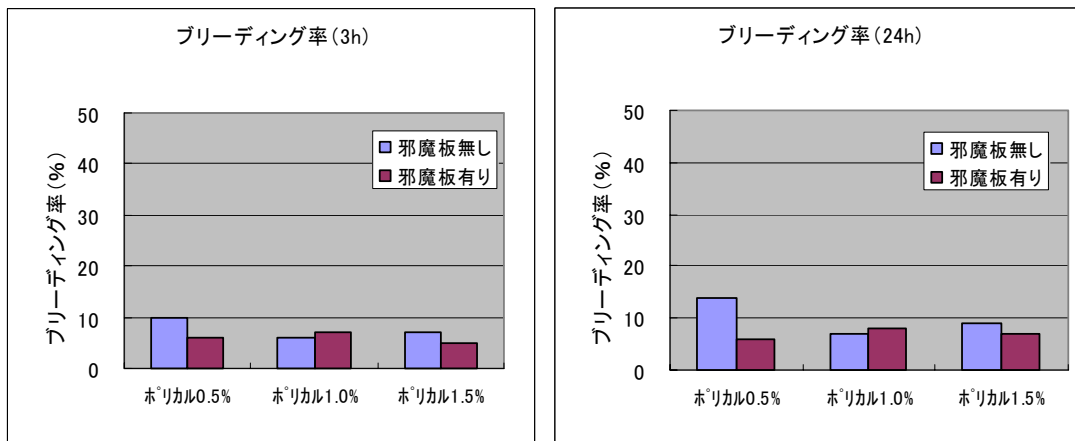


図 3.2-40 ブリーディング試験結果 (GA : 10%)

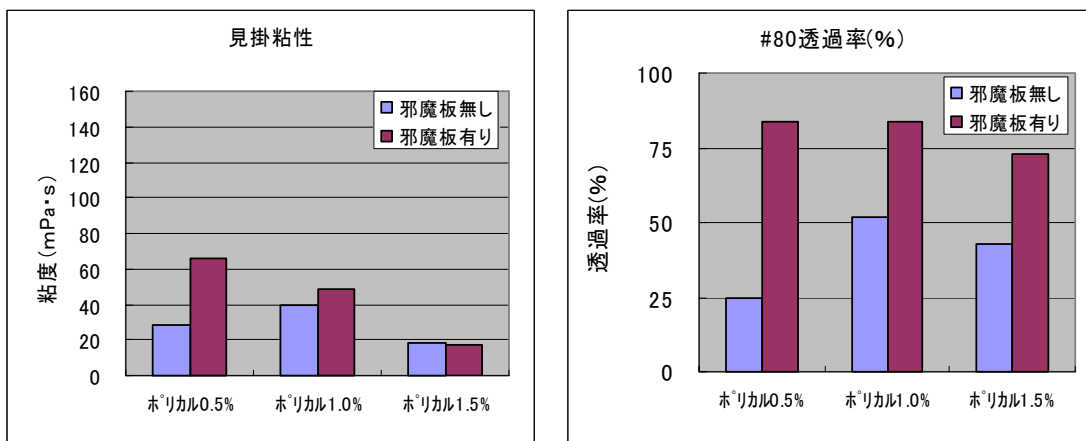


図 3.2-41 粘度、簡易目詰試験結果 (GA : 10%)

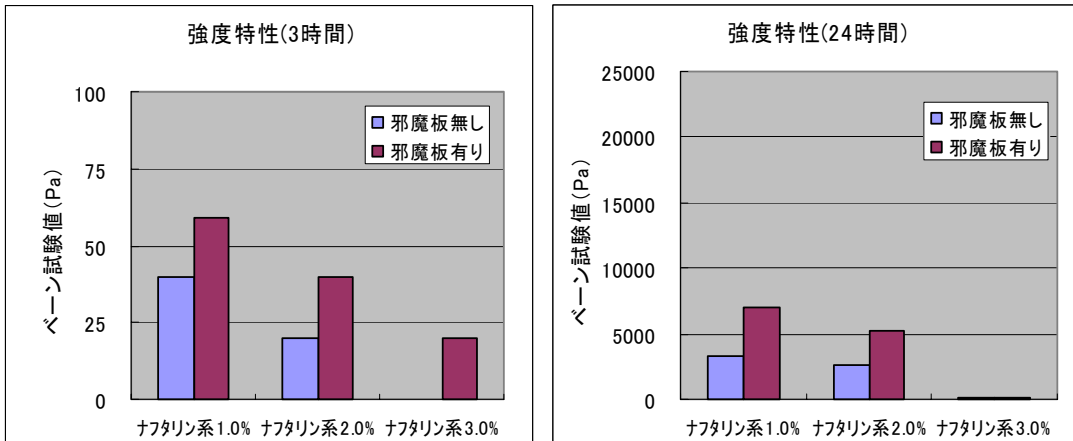


図 3.2-42 ベーンせん断試験結果 (GA : 41%)

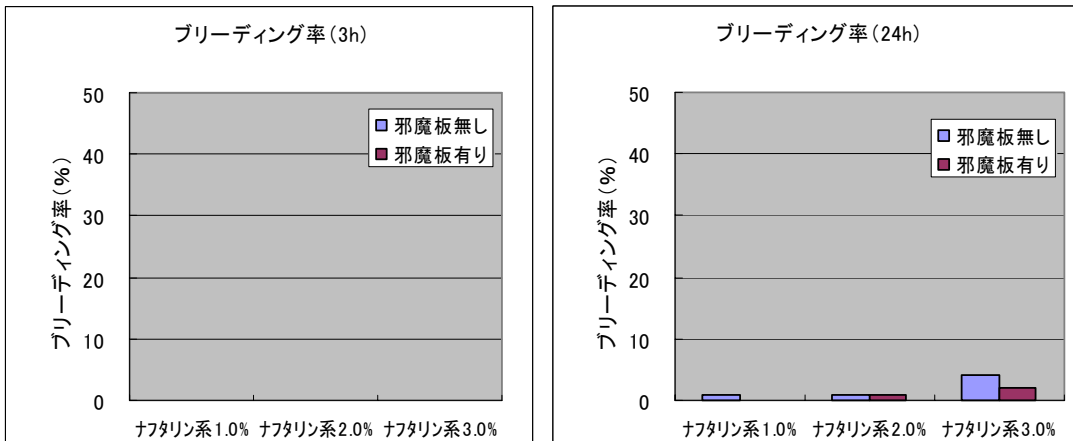


図 3.2-43 ブリーディング試験結果 (GA : 41%)

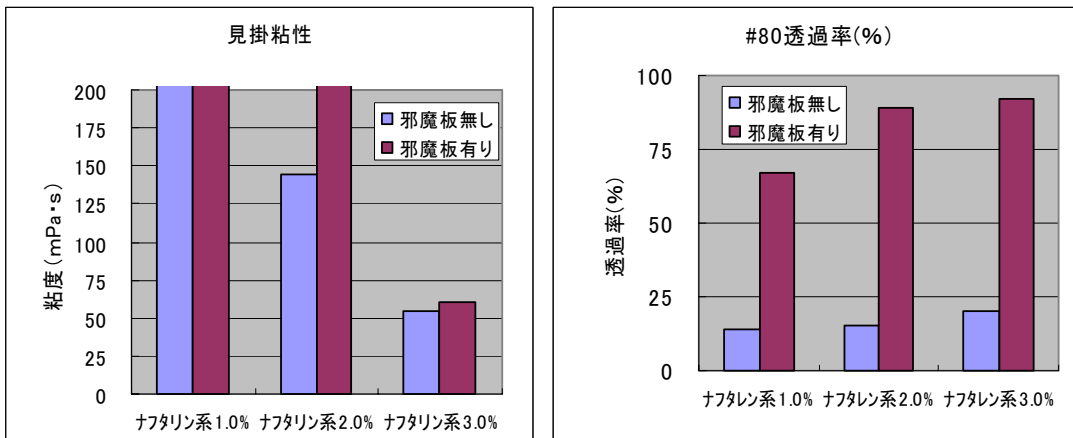


図 3.2-44 粘度、簡易目詰試験結果 (GA : 41%)

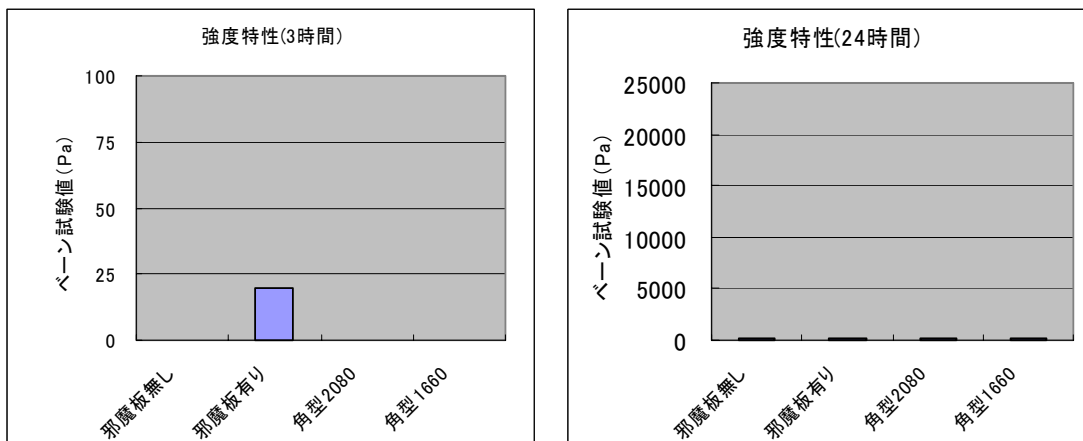


図 3.2-45 ベーンせん断試験結果 (GA : 41%、分散剤 3%)

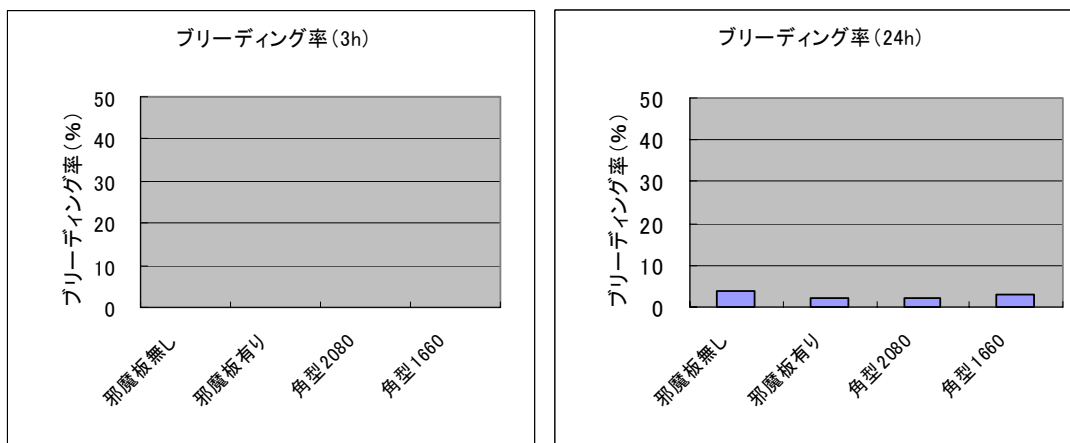


図 3.2-46 ブリーディング試験結果 (GA : 41%、分散剤 3%)

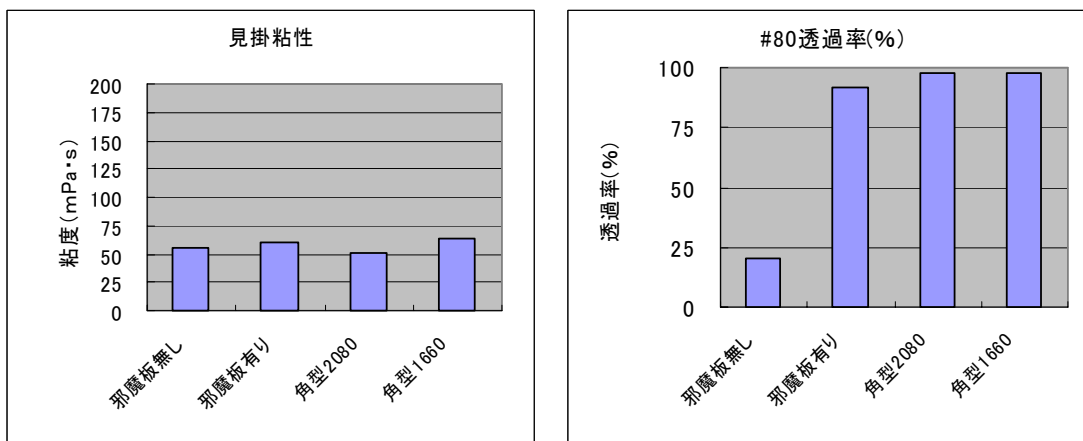


図 3.2-47 粘度、簡易目詰試験結果 (GA : 41%、分散剤 3%)

ペーンせん断試験、ブリーディング率、粘性、メッシュ透過性に関して比較した結果を、図 3.2-48~図 3.2-51に示す。

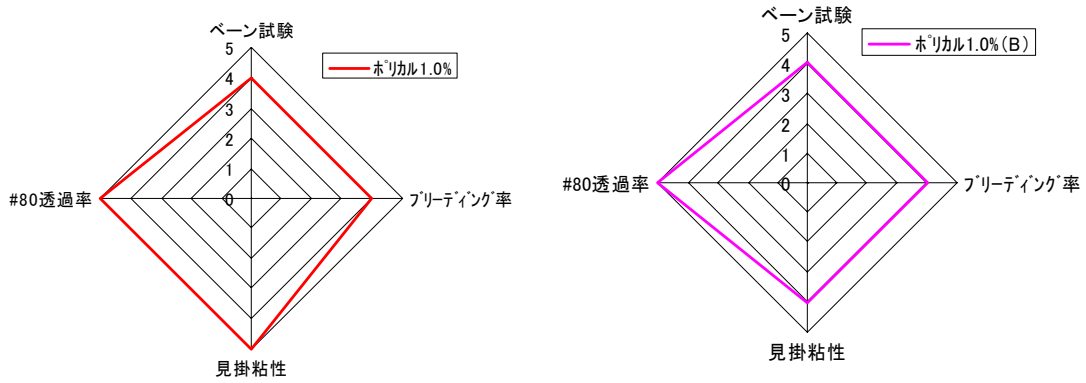


図 3.2-48 邪魔板影響の性能比較図 (GA=0%)

(左図：邪魔板無し、右図：邪魔板有り)

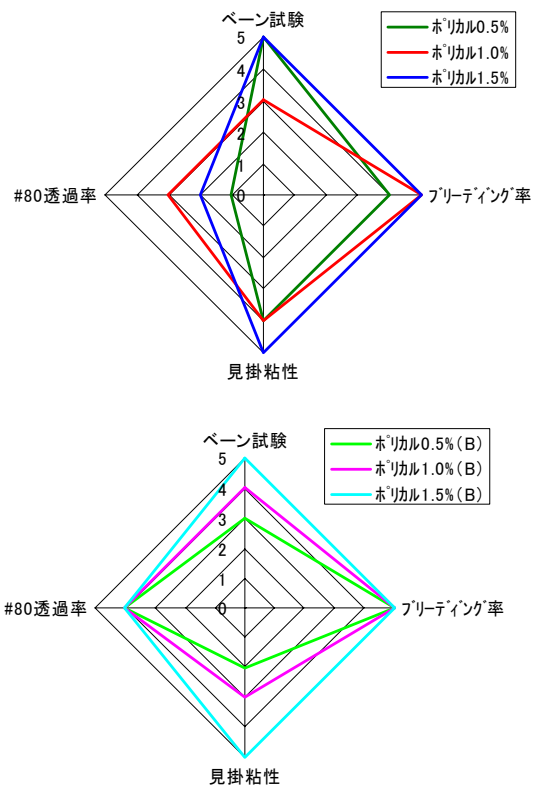


図 3.2-49 邪魔板影響の性能比較図 (GA=10%)

(上図：邪魔板無し、下図：邪魔板有り)

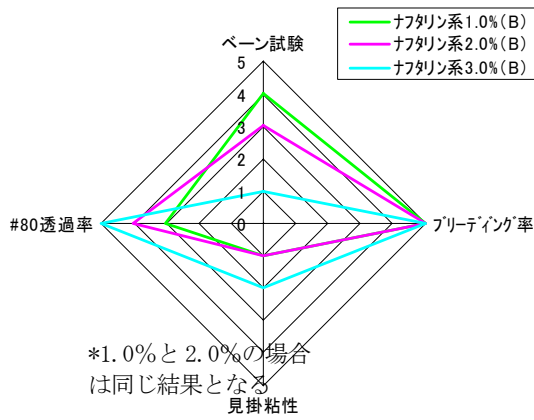
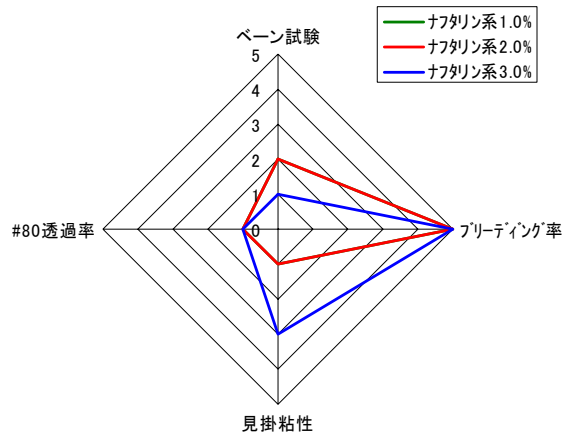


図 3.2-50 邪魔板影響の性能比較図 (GA=41%)

(上図：邪魔板無し、下図：邪魔板有り)

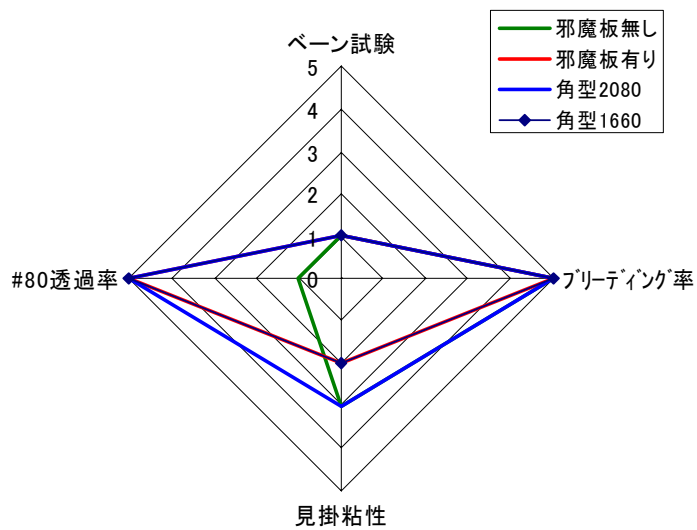


図 3.2-51 攪拌槽影響の性能比較図 (GA=41%、分散剤 3%)

上記の結果より、以下のことが言える。

- ・ 邪魔板の影響：グラウトエイド無しの場合は、見掛粘性が増加する以外に顕著な影響は見られず、邪魔板の使用によりグラウト材の特性が低下したことがわかる。グラウトエイドを10%添加した場合は、粘性は増加したが、メッシュ透過量が有意に増加しており、シリカフュームとセメントの凝集を抑制できた可能性がある。グラウトエイドを41%添加した場合は、初期強度が増加している上に、メッシュ透過量が大きく増加しており、邪魔板によりグラウト材の特性が大きく改良されたことがわかる。残留した凝集体の粒径も細かくなっており（図 3.2-52、図 3.2-53参照）、凝集が抑えられているのではないかと考えられる。但し、いずれのケースについても粘性は増加している。
- ・ 角型攪拌槽の影響：邪魔板を使用（攪拌翼φ100、攪拌速度 800rpm）した場合と、角型攪拌槽（攪拌翼φ68mm）を使用した場合でほぼ同等のグラウト材料が得られている。

上記より、今後の実験において角型攪拌槽（攪拌翼φ68mm、攪拌速度 1660rpm）を使用するものとする。

また、グラウトエイドを41%添加する場合は、分散剤を3%添加すると、攪拌方法を変えても十分な初期強度が得られなかった。そこで、2%と3%の間を取って分散剤使用量を以下のように設定する。

- ・ グラウトエイドを41%添加する場合：ナフタリン系分散剤 2.5%

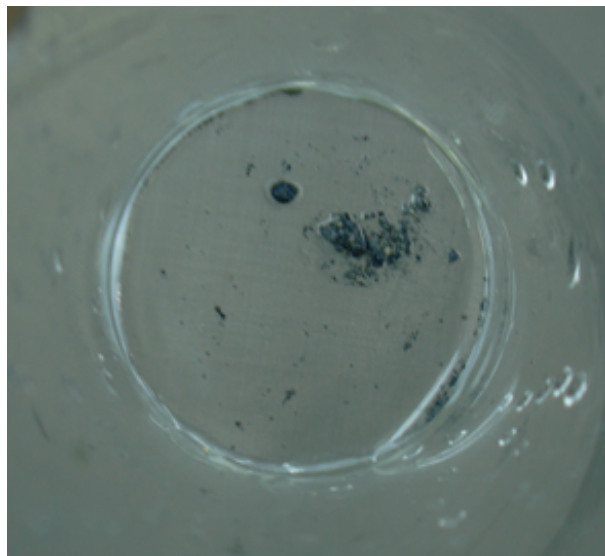


図 3.2-52 メッシュ上に残留したグラウト材 (GA41NF30N)
(右図は、メッシュ上に留ったグラウト材を洗浄した結果残留した凝集体:比較的粒径が大きい)

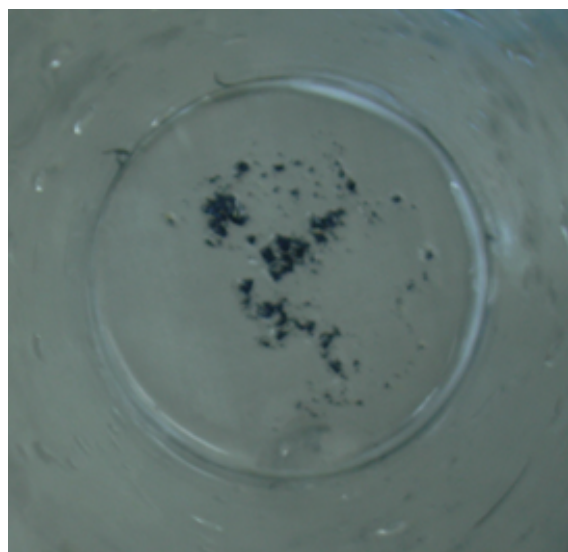
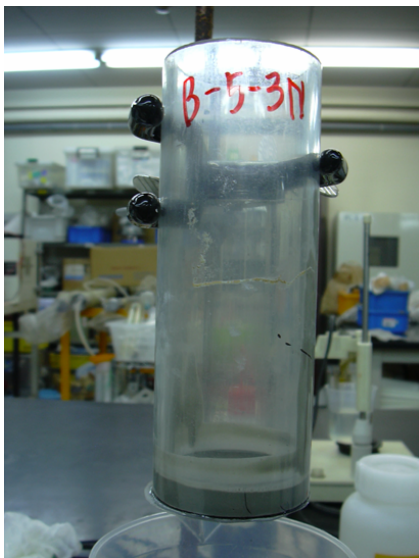


図 3.2-53 メッシュ上に残留したグラウト材 (GA41NF30B)
(右図は、メッシュ上に留ったグラウト材を洗浄した結果残留した凝集体:粒径が小さい)

3.3 基本物性確認試験

粘性特性試験及び目詰まり試験に使用する材料及びその配合を決定するために、セメント系材料に対して物性確認試験を実施した。

3.3.1 試験項目

分散方法に関する検討からの変更点を以下に示す。

<追加試験項目>

- ・ 一軸圧縮強度：7日強度、28日強度を測定する

<試験方法の変更点>

- ・ ベーンせん断試験：初期強度の測定は、6時間と24時間において実施するものとする。
(分散方法に関する検討では、3時間と24時間で実施したが、3時間経過時では発現強度が低すぎて、ベーンせん断試験機では有意な測定が困難であった。)
- ・ 簡易目詰まり試験：使用するメッシュサイズを以下に変更する。
(分散方法に関する検討では、#80(目開き量 200 μ m)を使用した。メッシュ透過性に関する有意な違いが把握出来なかったため、より目開き量の小さいメッシュを使用することとする。)
- ・ GA 0%、10%：#120(目開き量 132 μ m)
- ・ GA 41%：#100(目開き量 154 μ m)
- ・ 粘性測定：6種類のせん断速度(9.9、22.4、46.2、92.4、132、198(1/s))におけるせん断応力を測定し流動曲線を描くものとする。(分散方法に関する検討では、せん断速度 22.4(1/s)における見掛粘度を測定)

3.3.2 使用材料

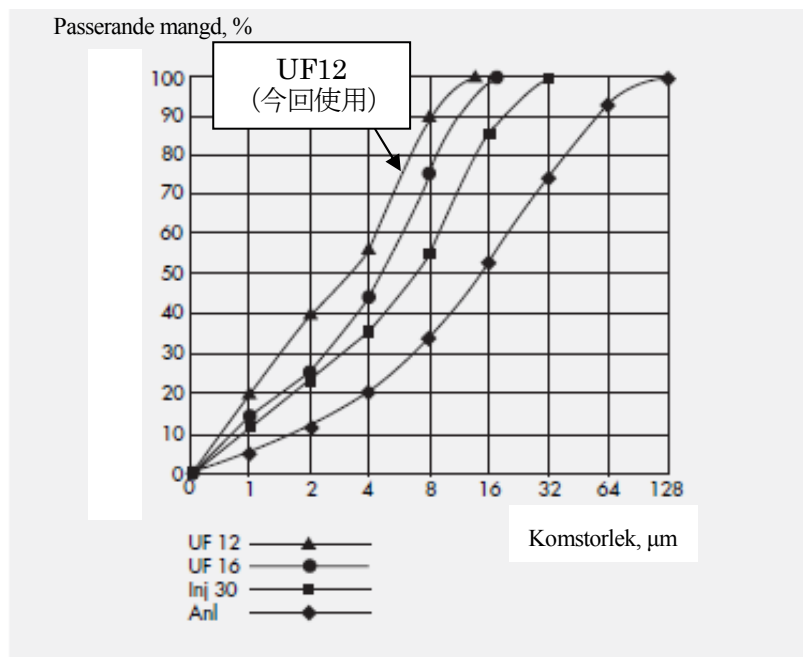
(1) セメント

- ・ 普通セメント：B社製高炉セメントB種
- ・ 超微粒子セメント：A社製、B社製、C社製、スウェーデン製
- ・ 超々微粒子セメント：A社製
- ・ 懸濁型特殊シリカ：D社製

超微粒子セメントについては、参考としてスウェーデン製 Ultrafin12(図 3.3-1参照)も使用した。

(2) 混和材/剤

- ・ シリカフェームスラリー：グラウトエイド(GA)
- ・ 分散剤：ナフタリン系(GA：41%の場合)、ポリカルボン酸系(GA：0%、10%の場合)より選定した1種



Example of particle size distribution.

SETTING TIME AND BET SPECIFIC SURFACE AREA

	Setting time (guideline value) (min)	BET specific surface area (guideline value) (m ² /kg)
Ultrafin 12	30	2200

PHYSICAL PROPERTIES

Compact density	approx. 3 100–3 200 kg/m ³
Bulk density	800–1 500 kg/m ³

CHEMICAL PROPERTIES

MgO max.	5.0 percent by weight
SO ₃ Chlorides,	max. 3.5 percent by weight
Chlorides, calculated as Cl	max. 0.1 percent by weight

図 3.3-1 スウェーデン Cementa 社製 Ultrafin12 (UF12) の特性
(Cementa 社 Ultrafin12 のパンフレットより抜粋)

(3) 試験配合

表 3.3-1に示す配合に関して試験を実施した。

超微粒子セメントに関しては、3種類の国産セメントを用いた試験を実施し、試験結果より今後の試験に使用する超微粒子セメントを1種類のみ選定した。

表 3.3-1 試験配合一覧（水セメント比：1.6）

セメント粒径	番号	セメント種類	グラウトエイド添加割合	分散剤
普通サイズ	1	高炉セメントB種	0%	添加無し
	2		10%	添加無し
	3		41%	ナフタリン系 2.5%
超微粒	4	A社製超微粒子セメント	0%	ポリカル系 1%
	5		10%	ポリカル系 1%
	6		41%	ナフタリン系 2.5%
	7	B社製超微粒子セメント	0%	ポリカル系 1%
	8		10%	ポリカル系 1%
	9		41%	ナフタリン系 2.5%
	10	C社製超微粒子セメント	0%	ポリカル系 1%
	11		10%	ポリカル系 1%
	12		41%	ナフタリン系 2.5%
超々微粒	13	A社製超々微粒子セメント	0%	ポリカル系 1%
	14		10%	ポリカル系 1%
	15		41%	ナフタリン系 2.5%
超微粒	16	D社製懸濁型特殊シリカ	0%	ナフタリン系 0.35%
超微粒 (参考)	17	スウェーデン Cementa 社製超微粒子セメント	0%	ポリカル系 1%
	18		10%	ポリカル系 1%
	19		41%	ナフタリン系 2.5%

なお、懸濁型特殊シリカについては、表 3.3-2に示す標準配合を用いる。

表 3.3-2 懸濁型特殊シリカの当試験における標準配合（1m³当たり）

	SKU	SKU-A	促進剤 (ソーダ灰)	分散剤 (マイティ 150R)	水
D社製	250kg	100kg	5kg	1.23kg	879kg

(4) 攪拌方法

角型攪拌槽（150mm×150mm）を用いて、回転数 1660rpm（φ68mm ファン）にて、以下の攪拌を実施

- ・ グラウトエイド添加せず：水＋分散剤＋セメントを 3 分間攪拌
- ・ グラウトエイド添加：水＋分散剤＋セメントを 3 分間攪拌した後、グラウトエイドを加えて 3 分間攪拌（合計 6 分間攪拌）

3.3.3 試験結果

物性確認試験結果を、表 3.3-3にまとめて示す。また、以下の要領で図に示す。

- ・ 初期強度：図 3.3-2
- ・ ブリーディング：図 3.3-3
- ・ 粘性測定結果（せん断速度 22.4 (1/s) における見掛粘性）：図 3.3-4
- ・ メッシュ透過率の測定：図 3.3-5

また、粘性測定結果については表 3.3-4と図 3.3-6にまとめて示す。

なお、上記の図中において測定値が測定装置の測定可能範囲を超えて測定不能となった場合は、図の上限値として表わしている。

- ・ 図 3.3-2より、初期強度に関しては高炉セメントと懸濁型特殊シリカが優れていることがわかる。また、グラウトエイドを 10%添加すると 6 時間経過時の初期強度が増加する場合（B 社製超微粒子セメント、スウェーデン製超微粒子セメント UF12）と、低下する場合（B 社製高炉セメント）が存在することがわかる。一方、41%添加する場合はほぼ全ケースにおいて強度発現が低下することがわかる。
- ・ 図 3.3-3より、A 社製超微粒子セメント、UF12、超々微粒子セメント、懸濁型特殊シリカのブリーディングが極めて小さいことがわかる。また、グラウトエイドを 10%添加するとブリーディングは大きく低下しており、全ケースにおいて 10%以下となっている。さらに 41%添加した場合は、ほぼノンブリーディング状態となっている。
- ・ 図 3.3-4より、UF12、超々微粒子セメント、懸濁型特殊シリカの見掛粘度が高いことがわかる。また、図 3.3-6上図よりこれらのグラウト配合はビンガム流動的挙動を示すことがわかる。またグラウトエイドを添加するとほぼ全ケースにおいてビンガム流動的挙動を示し、特に 41%添加するとせん断応力が大幅に増加していることがわかる。これらの粘性挙動については 4 章にて詳細に検討することとする。
- ・ 図 3.3-5より、UF12 以外の超微粒子セメントのメッシュ通過率が高いことがわかる。また、粒径分布の大きい高炉セメントのメッシュ通過率が低いことに加えて、粒径分布の小さい超々微粒子セメントについてもメッシュ通過率が低いことがわかる。

表 3.3-3 物性試験結果 (w/c=1.6)

配合	グラファイト添加量	分散剤	攪拌方法		ペン試験 [Pa]		ブレイディング率 [%]		粘度			透過量 [g] (200ml・1min)		
			攪拌時間 [min]	攪拌速度 [rpm]	6h	24h	3h	24h	ざり速度 [1/s]	粘度 [mPa・s]	温度 [°C]	メッシュ目開量	透過量	残留量
B社製 高炉セメント	0%	PC1.0%	3		-	-	69	69	1.24	22.8		191	60	76%
	0%	-		1660	3443	測定不能	44	44	11.6	22.9	22.4	163	106	61%
	10%		3+3		198	27660	8	8	108.5	23.6		166	100	62%
	41%	NA2.5%			40	9972	<1	<1	134.3	24.2		244	16	94%
A社製 超微粒子 セメント	0%	PC1.0%	3		79	6885	11	10	7.8	23.8		249	12	95%
	10%			1660	99	9834	4	5	75.7	25.1	22.4	192	66	74%
	41%	NA2.5%	3+3		20	1895	<1	<1	109.4	23.6		254	6	98%
	0%	PC1.0%	3		693	測定不能	33	45	3.0	22.7		263	2	99%
B社製 超微粒子 セメント	10%			1660	1266	測定不能	8	8	22.8	23.8	22.4	217	30	88%
	41%	NA2.5%	3+3		59	8112	<1	<1	91.9	24.0		257	6	98%
	0%	PC1.0%	3		198	21239	29	30	3.9	23.8		255	5	98%
	10%			1660	376	20201	2	2	58.9	23.9	22.4	190	62	75%
A社製 超々微粒子 セメント	41%	NA2.5%	3+3		119	3542	0	0	108.3	24.1		251	8	97%
	0%	PC1.0%	3		59	測定不能	1	2	63.9	25.2		216	47	82%
	10%			1660	79	測定不能	<1	<1	116.1	24.4	22.4	108	148	42%
	41%	NA2.5%	3+3		79	38622	0	0	測定不能	24.4		209	45	82%
D社製懸濁型 特殊シカ	0%	NA0.35%	3+3		4234	測定不能	2	2	57.5	26.3	22.4	237	7	97%
Ultrafin12	0%	PC1.0%	3		158	測定不能	2	<1	61.2	24.1		128	113	53%
	10%			1660	930	測定不能	<1	<1	152.6	22.6	22.4	82	169	33%
	41%	NA2.5%	3+3		40	42836	<1	<1	測定不能	21.3		155	121	56%

参考

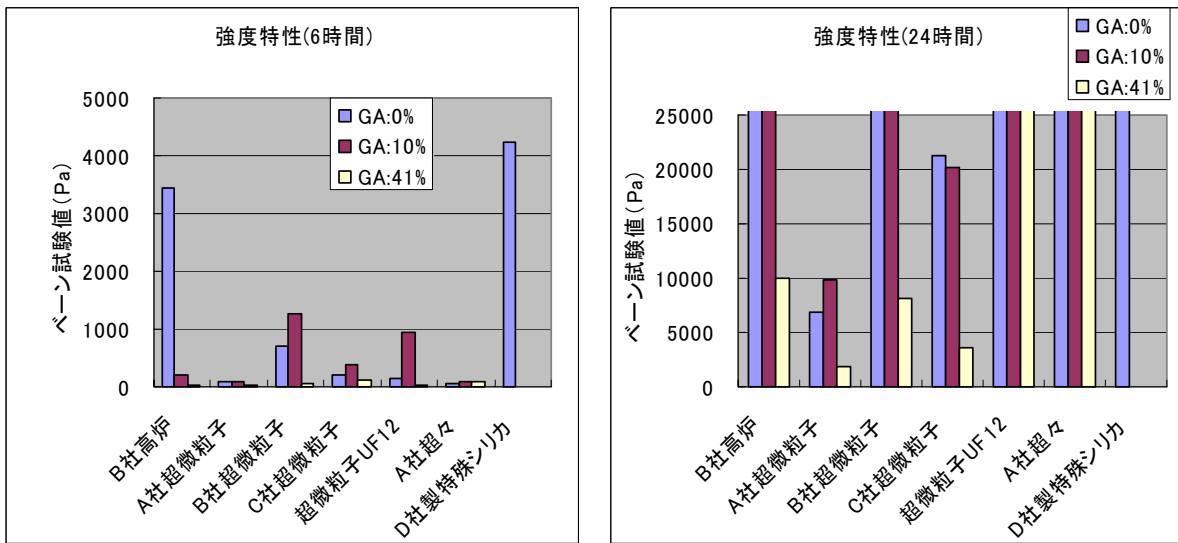


図 3.3-2 初期強度試験結果

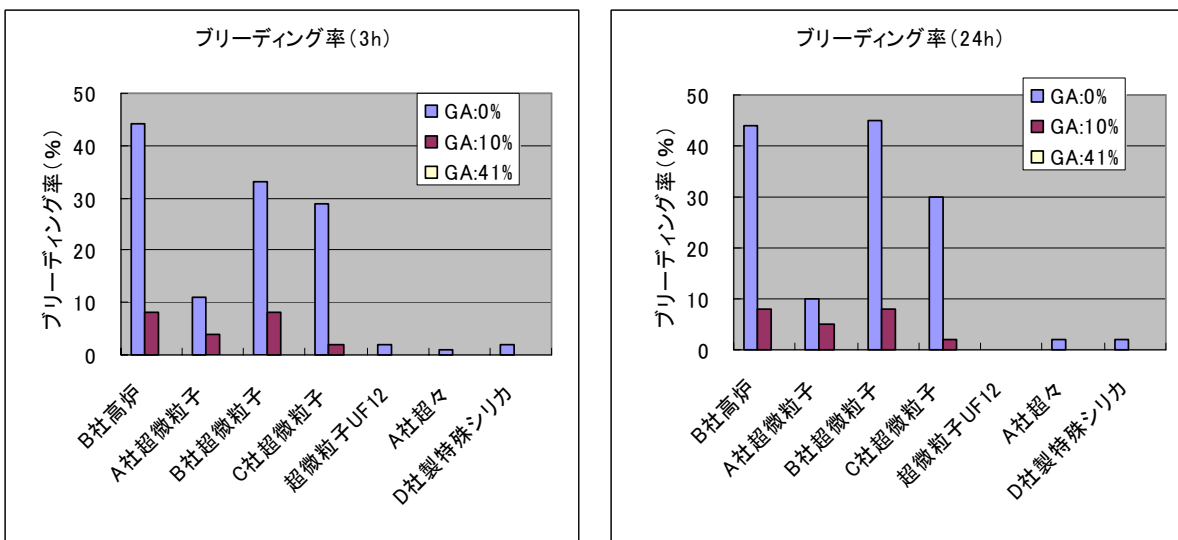


図 3.3-3 ブリーディング試験結果

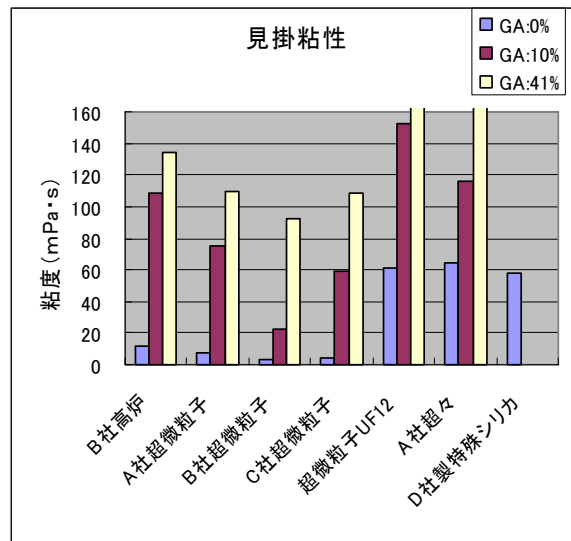


図 3.3-4 粘性測定結果 (せん断速度 22.4 (1/s))

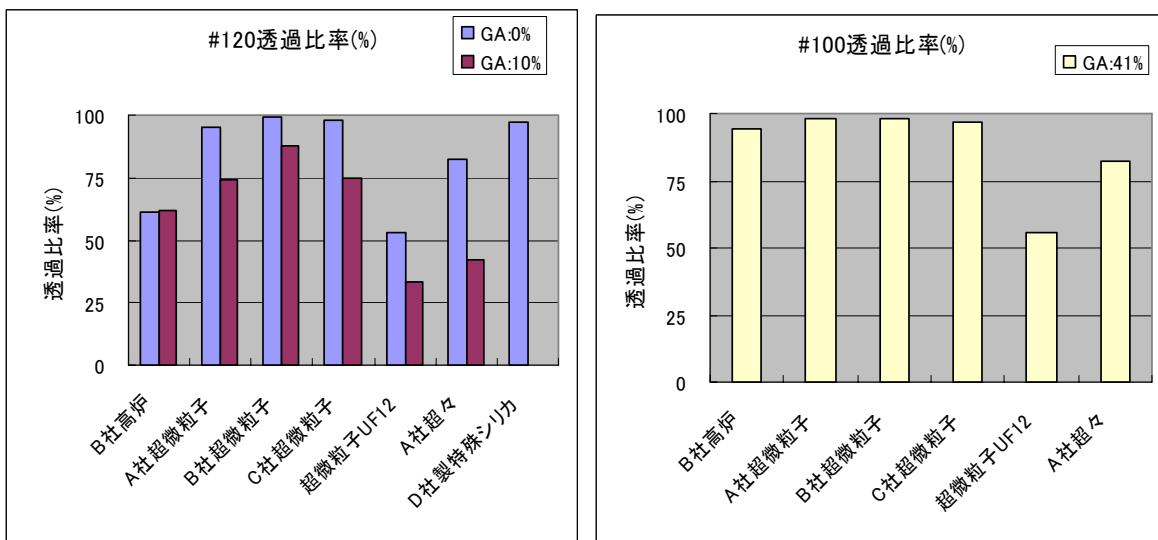


図 3.3-5 メッシュ透過率測定結果

(左図：#120 (目開き量 132 μm)、右図：#100 (目開き量 154 μm))

表 3.3-4 せん断応力測定結果 (w/c=1.6)

せん断速度[1/s]				198	132	92.4	46.2	22.4	9.9
せん断応力[Pa]	B社製 高炉セメント	GA:0%	PC : 1.0%	0.3	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
	B社製 高炉セメント	GA:0%	PC : 0%	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2
	B社製 高炉セメント	GA:10%	PC : 0%	-	3.7	3.3	2.8	2.5	2.1
	B社製 高炉セメント	GA:41%	NA : 2.5%	-	-	3.7	3.3	3.0	2.8
	A社製超微粒子	GA:0%	PC : 1.0%	0.6	0.5	0.4	0.2	0.2	0.1
	A社製超微粒子	GA:10%	PC : 1.0%	2.3	2.0	1.9	1.7	1.7	1.8
	A社製超微粒子	GA:41%	NA : 2.5%	3.4	3.4	2.7	2.4	2.2	2.1
	B社製超微粒子	GA:0%	PC : 1.0%	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0
	B社製超微粒子	GA:10%	PC : 1.0%	1.4	1.1	0.9	0.6	0.5	0.4
	B社製超微粒子	GA:41%	NA : 2.5%	3.2	2.8	2.5	2.2	2.1	1.9
	C社製超微粒子	GA:0%	PC : 1.0%	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1
	C社製超微粒子	GA:10%	PC : 1.0%	2.3	2.0	1.7	1.5	1.3	1.3
	C社製超微粒子	GA:41%	NA : 2.5%	3.8	3.3	3.0	2.6	2.4	2.3
	A社製超々微粒子	GA:0%	PC : 1.0%	1.9	1.8	1.6	1.4	1.4	1.4
	A社製超々微粒子	GA:10%	PC : 1.0%	3.5	3.1	2.9	2.7	2.6	2.6
	A社製超々微粒子	GA:41%	NA : 2.5%	-	-	-	-	-	-
D社製特殊ソカ	-	NA : 0.35%	2.255	1.975	1.775	1.5	1.285	1.15	
参考									
せん断応力[Pa]	Ultrafin12	GA:0%	PC : 1.0%	2.285	1.87	1.67	1.48	1.35	1.345
		GA:10%	PC : 1.0%	-	-	3.82	3.57	3.43	3.39
		GA:41%	NA : 2.5%	-	-	-	-	-	-

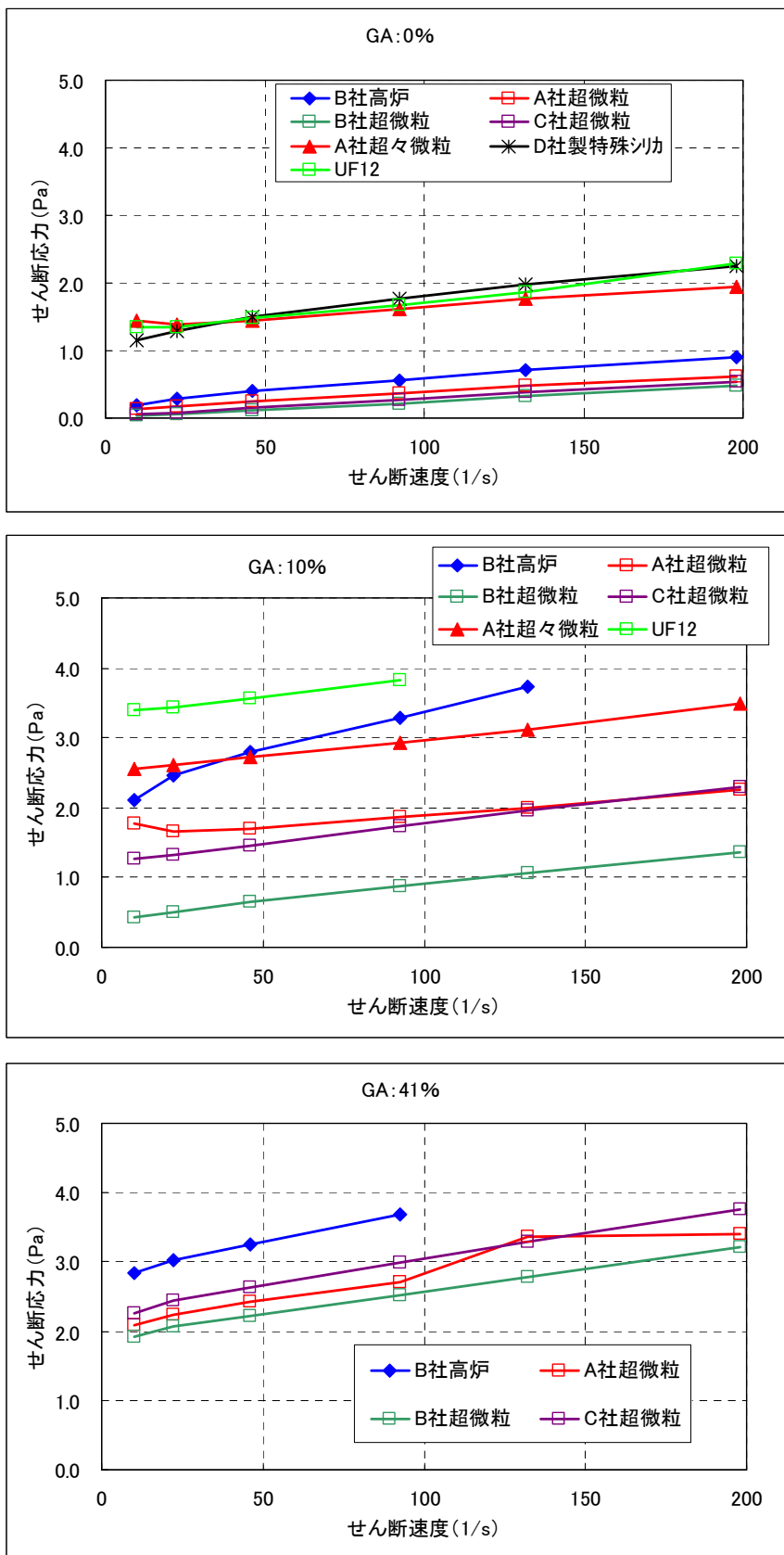


図 3.3-6 粘性測定結果 (流動曲線)
 (上: GA 0%、中: GA 10%、下: GA 41%)

3.3.4 超微粒子セメントの比較

超微粒子セメントグラウト ($w/c=1.6$) の性能を、表 3.3-5に示すように配点することで、性能を比較してその結果を図 3.3-7～図 3.3-9に示す。

表 3.3-5 配点基準

	1	2	3	4	5
ベーン試験 (Pa) (24 時間経過時)	2000 未満	2000-4000 未満	4000-6000 未満	6000-8000 未満	8000 以上
ブリーディング率 (%)	40 以上	30-40 未満	20-30 未満	10-20 未満	10 未満
粘度 (mPa·s)	80 以上	60-80 未満	40-60 未満	20-40 未満	20 未満
透過量 (g)	100 未満	100-150 未満	150-200 未満	200-250 未満	250 以上

これらの図より以下のことがわかる。

- グラウトエイドを添加しない場合
 - ・ 初期強度に関しては B 社製、C 社製、UF12 が優れている。
 - ・ 粘性に関しては、ほぼ日本の 3 製品はほぼ同様であるが、UF12 は粘性が大幅に高い。
 - ・ ブリーディングに関しては、日本の 3 製品中 A 社製が優れており、グラウトエイドを添加しない場合でも 24 時間経過時のブリーディング量が 10%となっている。また、UF12 は 0%であり極端に低ブリーディングであることがわかる。
 - ・ メッシュ透過率は、日本の 3 製品はほぼ同等であるが、UF12 は大きく劣ることがわかる。
- グラウトエイドを添加する場合
 - ・ 初期強度に関しては、B 社製 > C 社製 > A 社製の順で優れていることがわかる。
 - ・ ブリーディングに関しては、グラウトエイドを 10%添加した場合においても、全製品で 24 時間後のブリーディング量が 10%以下となっており、極めて優れていることがわかる。さらに、41%添加した場合は、ほぼノンブリーディング状態となっている。
 - ・ 粘性に関しては、10%添加した場合は B 社製が有意に低く、最も優れていることがわかる。41%添加した場合は、全製品ともにほぼ同様に粘性が高いことがわかる。

上記を総合的に判断すると、グラウトエイドを添加しない場合は、国内製品は、グラウト材料としては 1 長 1 短があり、ほぼ同等と言える。一方、グラウトエイドを使用する場合は、B 社製超微粒子セメントが最も優れているように考えられるが、昨年度問題となったグラウトエイド 41%添加時については大きな差が見られない。

そこで、昨年度の検討結果と比較できるように、今後の検討には昨年度と同様に A 社製超微粒子セメントを使用するものとする。

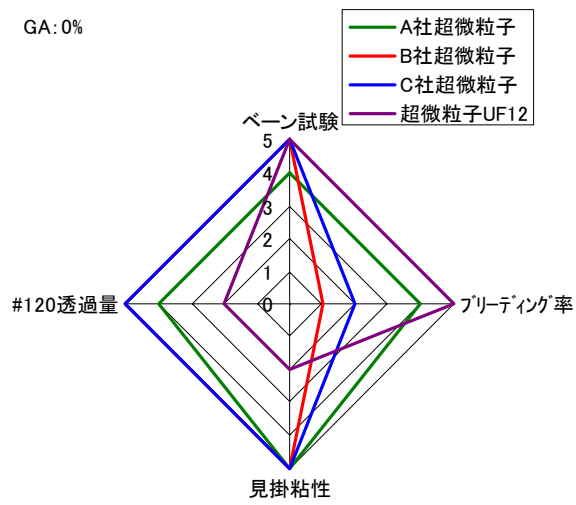


図 3.3-7 超微粒子セメントの性能比較図 (GA=0%)

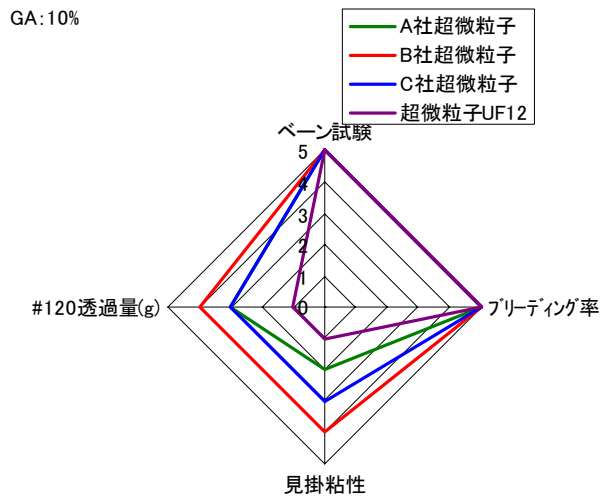


図 3.3-8 超微粒子セメントの性能比較図 (GA=10%)

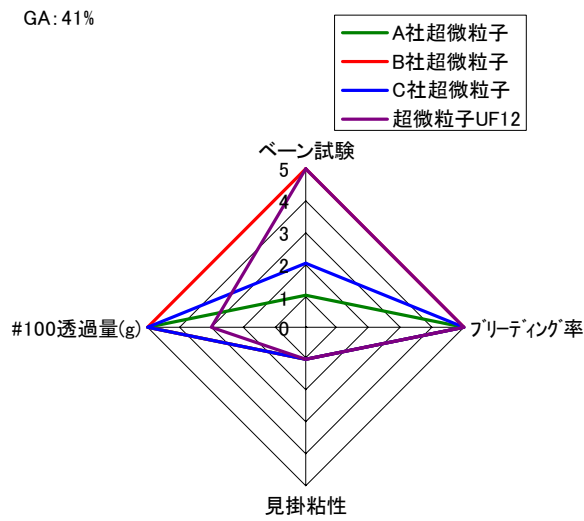


図 3.3-9 超微粒子セメントの性能比較図 (GA=41%)

3.3.5 水セメント比の影響の検討

これまでの試験はすべて水セメント比を 1.6 に固定して実施してきた。その試験結果より、高炉セメントと超微粒子セメントに関しては、粘性が小さくメッシュ透過率が高いため、もう少し水セメントを低減することが可能であると思われる。一方、超々微粒子セメントとスウェーデン製超微粒子セメント UF12 に関しては、強度発現性には優れるが、粘性が高くメッシュ透過率が低いため、水セメント比を高めた方が良いように思われる。そこで、以下のように水セメント比を変えて物性確認試験を実施し、水セメント比の影響を把握することとする。

- ・ B 社製高炉セメント、A 社製超微粒子セメント : $w/c=1.0$
- ・ A 社製超々微粒子セメント、スウェーデン製超微粒子セメント UF12 : $w/c=2.0$

(1) 試験結果

高炉セメント及び超微粒子セメントについて水粉体比を 1.0 とした場合の試験結果を、表 3.3-6 に示す。また、水セメント比 1.6 の場合と比較して図 3.3-10～図 3.3-13 に示す。一方、超々微粒子セメント、UF12 について水粉体比を 2.0 とした場合の試験結果を、表 3.3-7 に示す。また、同様に水セメント比 1.6 の場合と比較して図 3.3-14～図 3.3-17 に示す。

さらに、粘性試験については、高炉セメントと超微粒子セメントのせん断応力測定結果を表 3.3-8 と図 3.3-18 に、超々微粒子セメントと UF12 の測定結果を表 3.3-9 と図 3.3-19 に示す。

- ・ 図 3.3-10～図 3.3-13 より、高炉セメントと超微粒子セメントの水セメント比を 1.6 から 1.0 に低減したことにより、初期強度が高まり、ブリーディングが低減されるという正の効果の反面、見掛粘性が高まり、メッシュ透過率が低減した負の面があることがわかる。特に、高炉セメントにグラウトエイドを 10% 添加した場合の初期強度の増加、超微粒子セメントにグラウトエイドを添加しない場合のブリーディングの低減に与える影響が大きいことがわかる。
- ・ 図 3.3-18 より、水セメント比を 1.0 に低減した場合は、グラウトエイドを添加しなくても高炉セメント、超微粒子セメントともに降伏強度を有する可能性があるように見える。また、グラウトエイドを添加した場合は、低せん断速度領域において、せん断速度を低下させるとせん断応力が逆に増加している。これらの現象については、4 章において詳細に検討する必要がある。
- ・ 図 3.3-14～図 3.3-17 より、超々微粒子セメントと UF12 の水セメント比を 1.6 から 2.0 に増加したことにより、初期強度が下がり、ブリーディングが増加するという負の効果があるが、ブリーディングについては水セメント比が 2.0 の場合でも 10% 以下であり十分に小さいことがわかる。また、見掛粘性が低下し、メッシュ透過率が増加するという正の効果が確認されている。図 3.3-19 では、特に超々微粒子セメントに関して水セメント比を高めた粘性低減効果が顕著に現れている。上記より、グラウト材料としての性能を総合的に判断すると、超々微粒子セメントに関しては水セメント比を 2.0 に高めた方がグラウト材として優れていると考えられる。

表 3.3-6 物性試験結果 (w/c=1.0)

配合	グラウト添加量	分散剤	攪拌方法		ヘン試験 [Pa]		フリートング率 [%]		粘度			透過量 [g] (200ml・1min)		
			攪拌時間 [min]	攪拌速度 [rpm]	6h	24h	3h	24h	せん断速度 [1/s]	粘度 [mPa・s]	温度 [°C]	メッシュ目開量	透過量	残留量
B社製 高炉セメント	0%	-	3	1660	4531	-	25	27	49.6	23.2	132 μm	113	183	38%
	10%		3+3		1622	-	2	2	-	22.4	22.8	109	186	37%
	41%	NA2.5%			178	-	0	0	-	-	23.0	154 μm	239	40
A社製 超微粒子 セメント	0%		3	1660	139	23426	1	4	18.9	23.1	132 μm	293	3	99%
	10%	PC1.0%	3+3		435	-	<1	2	22.4	129	23	201	97	67%
	41%	NA2.5%			99	14760	0	<1	-	-	23	154 μm	266	26

表 3.3-7 物性試験結果 (w/c=2.0)

配合	グラウト添加量	分散剤	攪拌方法		ヘン試験 [Pa]		フリートング率 [%]		粘度			透過量 [g] (200ml・1min)		
			攪拌時間 [min]	攪拌速度 [rpm]	6h	24h	3h	24h	せん断速度 [1/s]	粘度 [mPa・s]	温度 [°C]	メッシュ目開量	透過量	残留量
A社製 超々微粒子 セメント	0%		3	1660	0	測定不能	4	7	31.1	22.0	132 μm	250	6	98%
	10%	PC1.0%	3+3		20	測定不能	1	4	63.7	22.3	189	58	77%	
	41%	NA2.5%			20	9992	0	0	測定不能	測定不能	22.8	154 μm	253	12
Ultrafin12	0%		3	1660	0	16739	3	10	45.2	24.8	132 μm	152	76	67%
	10%	PC1.0%	3+3		198	21270	2	2	83.3	23.2	93	156	37%	
	41%	NA2.5%			20	14424	<1	2	測定不能	測定不能	22.5	154 μm	222	40

参考

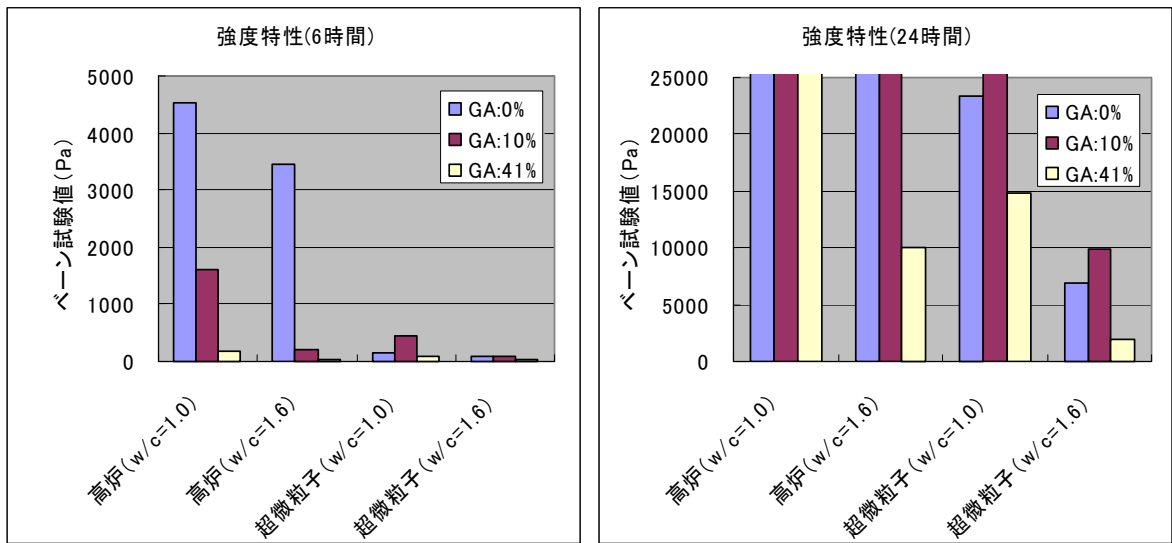


図 3.3-10 ベーンせん断試験結果

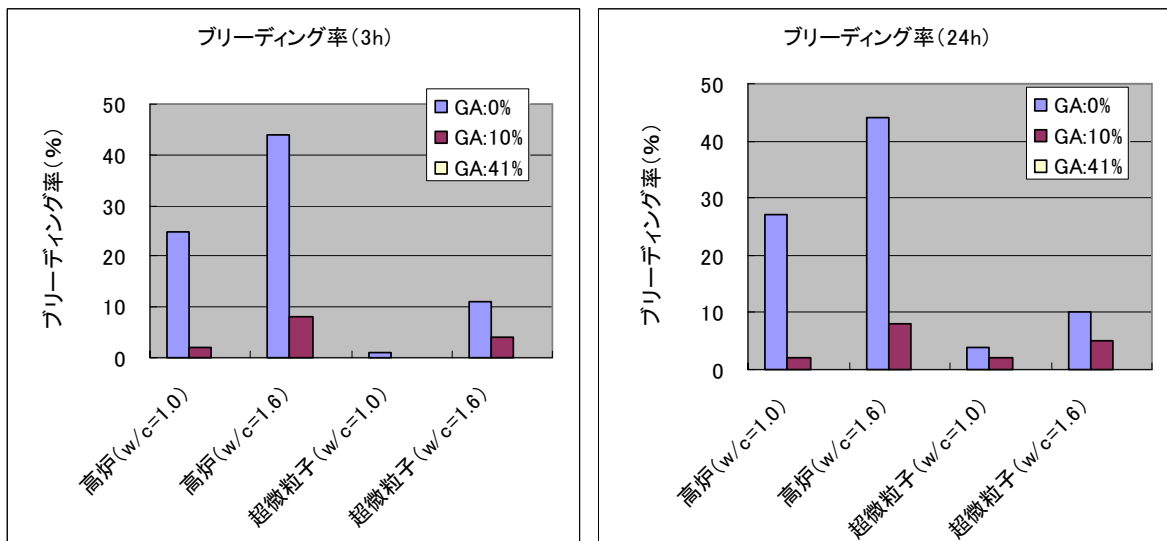


図 3.3-11 ブリーディング試験結果

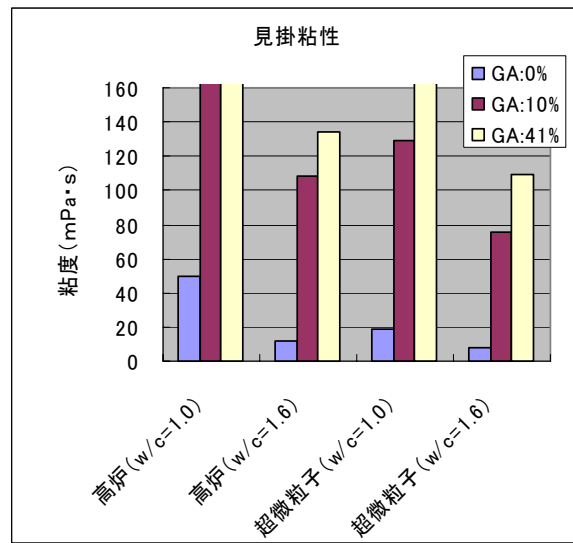


図 3.3-12 見掛粘性測定結果（せん断速度 22.4 (1/s)）

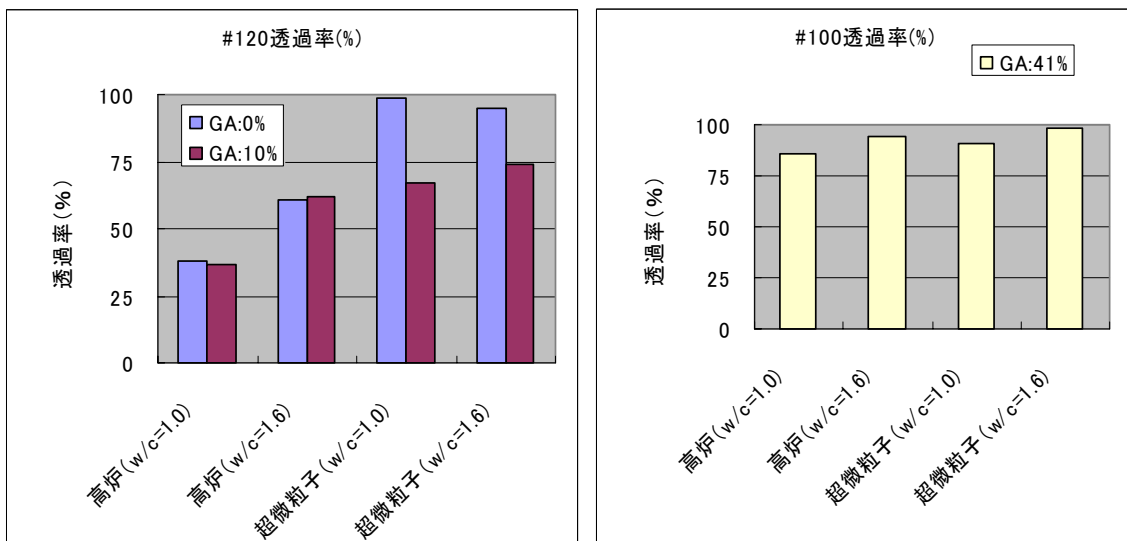


図 3.3-13 メッシュ透過率測定結果

(左図：#120 (目開き量 132 μm)、右図：#100 (目開き量 154 μm))

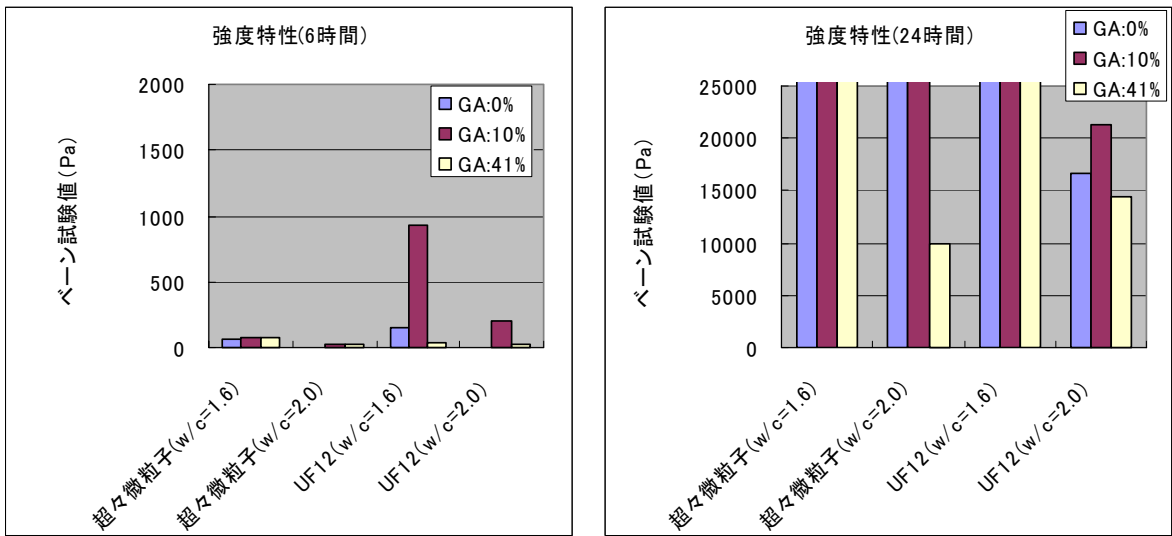


図 3.3-14 ベーンせん断試験結果

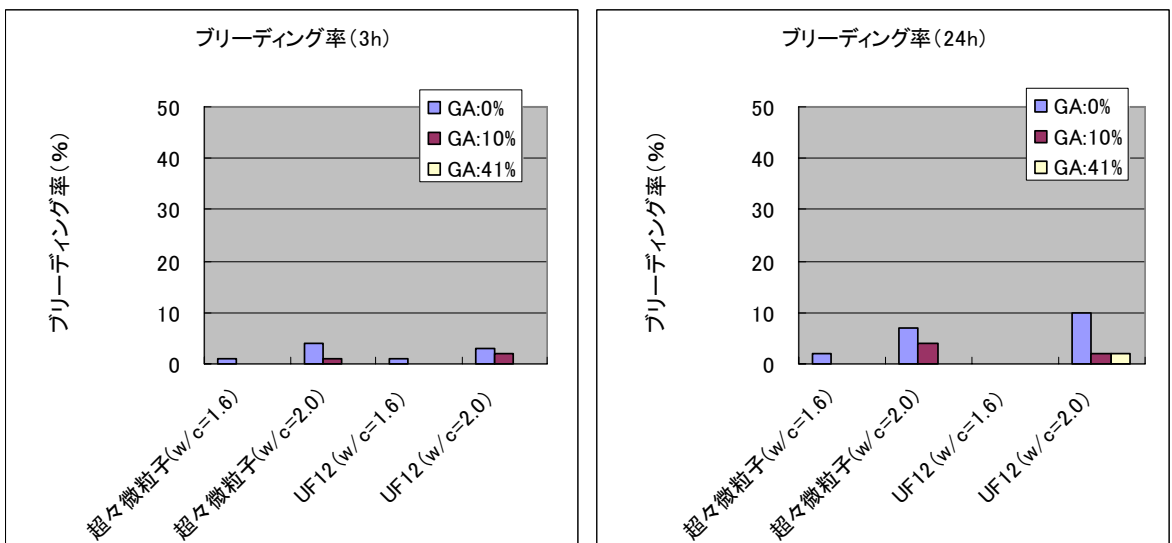


図 3.3-15 ブリーディング試験結果

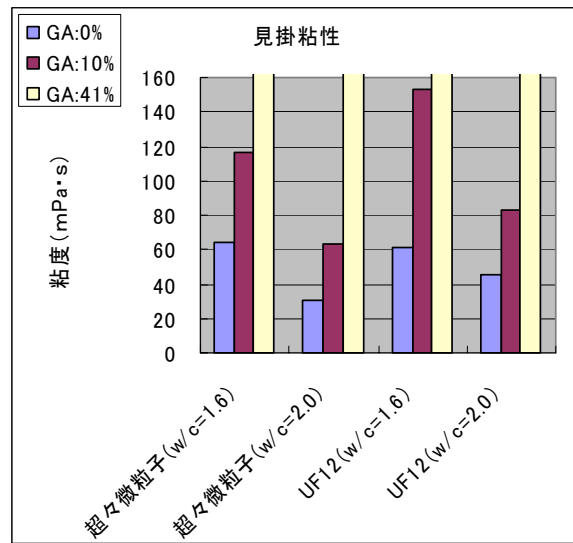


図 3.3-16 粘性測定結果（せん断速度 22.4 (1/s)）

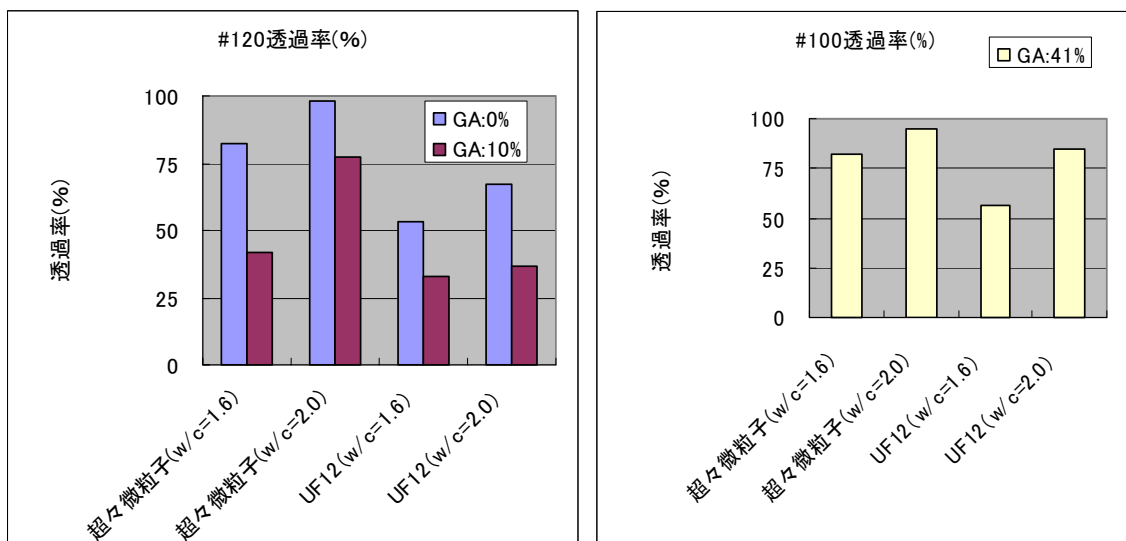


図 3.3-17 メッシュ透過量測定結果

(左図：#120（目開き量 132 μ m）、右図：#100（目開き量 154 μ m）)

表 3.3-8 せん断応力測定結果 (w/c=1.0 と 1.6 の比較)

せん断速度[1/s]				198	132	92.4	46.2	22.4	9.9
せん断応力[Pa]	B社製高炉セメント (1.0)	GA:0%	PC:0%	2.4	2.0	1.8	1.4	1.1	0.9
	B社製高炉セメント (1.6)	GA:0%	PC:0%	0.9	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2
	A社製超微粒子 (1.0)	GA:0%	PC:1.0%	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4	0.4
	A社製超微粒子 (1.6)	GA:0%	PC:1.0%	0.6	0.5	0.4	0.2	0.2	0.1
	A社製超微粒子 (1.0)	GA:10%	PC:1.0%	3.5	3.1	2.9	2.7	2.8	3.0
	A社製超微粒子 (1.6)	GA:10%	PC:1.0%	2.3	2.0	1.9	1.7	1.7	1.8
	A社製超微粒子 (1.0)	GA:41%	NA:2.5%	-	-	-	-	-	-

表 3.3-9 せん断応力測定結果 (w/c=1.6 と 2.0 の比較)

せん断速度[1/s]				198	132	92.4	46.2	22.4	9.9
せん断応力[Pa]	A社製超々微粒子 (1.6)	GA:0%	PC:1.0%	1.9	1.8	1.6	1.4	1.4	1.4
	A社製超々微粒子 (2.0)	GA:0%	PC:1.0%	1.2	1.1	0.9	0.8	0.7	0.7
	A社製超々微粒子 (1.6)	GA:10%	PC:1.0%	3.5	3.1	2.9	2.7	2.6	2.6
	A社製超々微粒子 (2.0)	GA:10%	PC:1.0%	2.2	1.9	1.7	1.5	1.4	1.4
	UF12 (1.6)	GA:0%	PC:1.0%	2.3	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3
	UF12 (2.0)	GA:0%	PC:1.0%	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9
	UF12 (1.6)	GA:10%	PC:1.0%	-	-	3.8	3.6	3.4	3.4
	UF12 (2.0)	GA:10%	PC:1.0%	2.8	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8

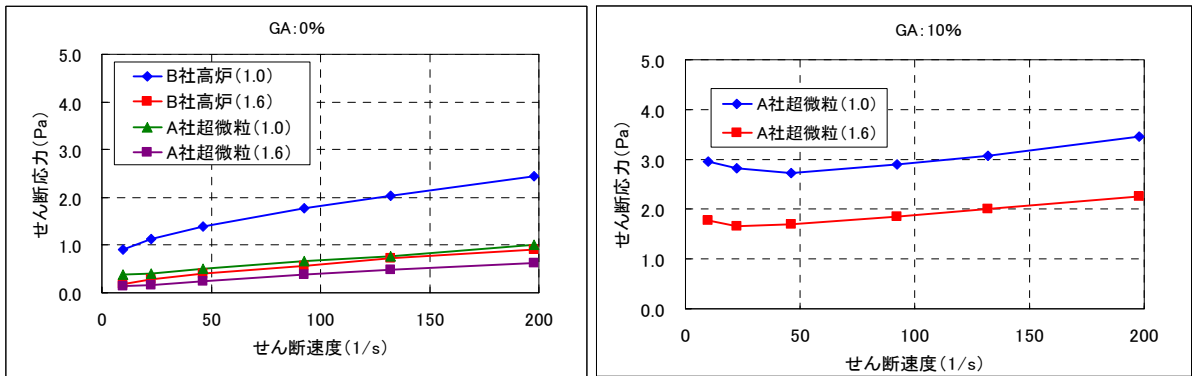


図 3.3-18 粘性測定結果 (B社製高炉セメントとA社製超微粒子セメント)
(左: GA 0%、右: GA 10%)

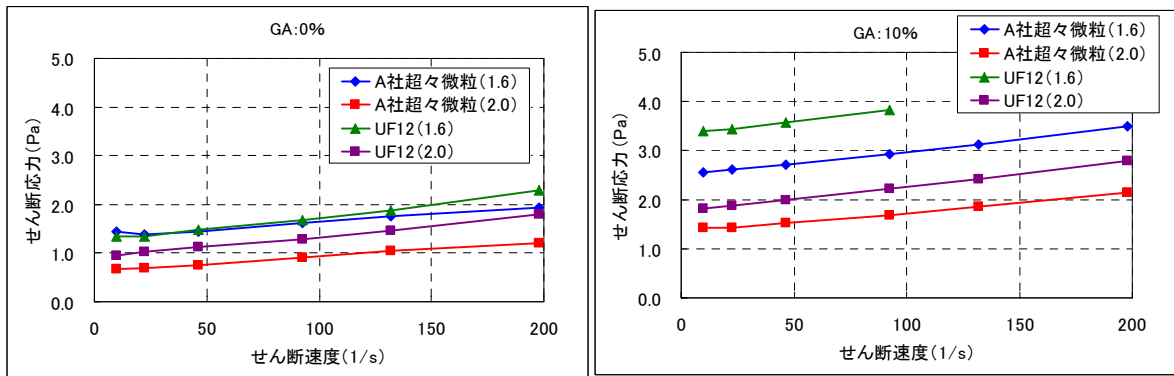


図 3.3-19 粘性測定結果 (A社製超々微粒子セメントとCementa製UF12)
(左: GA 0%、右: GA 10%)

3.3.6 強度試験

(1) 試験方法

7日及び28日経過時の一軸圧縮強度を測定する。供試体は、ブリーディング袋に高さ40cmまでグラウト材を入れて、室内にて養生する。所定の日数（7日、28日）経過時に、ブリーディング袋から取り出し、下端を5cmカットして廃棄し、残った円筒を下部より10cmずつ切断して試験供試体とする。また、上端についてはも3cm以上カットして廃棄する。この結果、ブリーディングが小さい場合には、上部、中部、下部の3体の供試体が作成できるが、ブリーディングが大きい場合は、供試体数が2体或いは1体のみとなる。なお、UF12については、入手できたセメント量の都合から、28日強度を1体のみ作成している。

(2) 試験結果

一軸圧縮強度結果を、水セメント比1.6のケースは表3.3-10に、水セメント比1.0のケースは表3.3-11に、水セメント比2.0のケースは表3.3-12にそれぞれ示す。

また、以下の要領で図に示す。

- ・ 高炉セメントの一軸圧縮強度：図 3.3-20
- ・ 超微粒子セメントの一軸圧縮強度：図 3.3-21
- ・ 超々微粒子セメントの一軸圧縮強度：図 3.3-22
- ・ UF12の一軸圧縮強度：図 3.3-23
- ・ 水セメント比1.6の場合の7日強度（セメント種類の違いを比較）：図 3.3-24
- ・ 水セメント比1.6の場合の28日強度（セメント種類の違いを比較）：図 3.3-25
- ・ 一軸試圧縮試験（28日強度）破壊状況（高炉セメント）：図 3.3-26
- ・ 一軸試圧縮試験（28日強度）破壊状況（A社製超微粒子セメント）：図 3.3-27
- ・ 一軸試圧縮試験（28日強度）破壊状況（A社製超々微粒子セメント）：図 3.3-28
- ・ 一軸試圧縮試験（28日強度）破壊状況（スウェーデン製超微粒子セメントUF12）：図 3.3-29
- ・ 一軸試圧縮試験（28日強度）破壊状況（懸濁型特殊シリカ）：図 3.3-30

さらに、グラウトエイド添加量、水セメント比、セメント種類が一軸圧縮強度に与える影響を確認するために、一軸圧縮強度の平均値を比較して以下の要領で図示する。

- グラウトエイド添加量の影響
 - ・ 水セメント比=1.0の場合：図 3.3-31
 - ・ 水セメント比=1.6の場合：図 3.3-32
 - ・ 水セメント比=2.0の場合：図 3.3-33
- 水セメント比の影響：
 - ・ 高炉セメント：図 3.3-34
 - ・ 超微粒子セメント：図 3.3-35
 - ・ 超々微粒子セメント：図 3.3-36
 - ・ スウェーデン製超微粒子セメント：図 3.3-37

これらの図表より、以下のことがわかる。

- セメント種類の影響
 - ・ 図 3.3-24と図 3.3-25より、スウェーデン製超微粒子セメント UF12 は全体的に強度が低く、逆に超々微粒子セメントは強度が高いことがわかる。また、供試体の上部、中部、下部の強度のバラツキは小さく比較的均質な強度分布を有することがわかる。
- グラウトエイドの影響
 - ・ 高炉セメント：図 3.3-20、図 3.3-31、図 3.3-32より、グラウトエイドを 41%添加した方が 10%添加した場合より強度が増加しているケースがあり、少なくとも 41%添加することにより強度が大きく低下する傾向は見られない。
 - ・ 超微粒子セメント：図 3.3-21、図 3.3-31、図 3.3-32より、グラウトエイドの添加量と強度は反比例の関係にあることがわかる。特に、41%添加した場合の 7 日強度は大きく低下しており、グラウトエイドと相性が悪いと言える。
 - ・ 超々微粒子セメント：図 3.3-22、図 3.3-32、図 3.3-33より、グラウトエイドの添加量と強度は反比例の関係にある。但し、その強度低下傾向は超微粒子セメントの場合ほど顕著ではない。
 - ・ スウェーデン製超微粒子セメント UF12：図 3.3-23、図 3.3-32、図 3.3-33より、グラウトエイドを添加したことにより 28 日強度が大きく増加していることがわかる。特に、水セメント比 2.0 の場合にこの傾向が顕著であり、水セメント比 1.6 の場合よりも高強度となっている。
 - ・ 水セメント比の影響：図 3.3-34と図 3.3-35より、高炉セメントと超微粒子セメントは水セメントが 1.0 から 1.6 に増えると一軸圧縮強度が大きく低下しているが、超々微粒子セメントと UF12 については、水セメント比 1.6 と 2.0 の間にあまり大きな差が生じていないことがわかる。これは、まず第一にセメント種類の違いに起因することが考えられる。しかしながら、水セメント比が 1.0 から 1.5 程度に増加する際のグラウト物性の変化は、1.5 から 2.0 における変化よりも通常大きいと言われており、今回の試験結果からだけでは断定的なことは言えない。今後の更なる検討が必要である。
- 破壊状況：図 3.3-26～図 3.3-30より、全ケースにおいて水セメント比が低い方がより脆性的な破壊形態を示している。また、UF12 (図 3.3-29) と国産の A 社製超微粒子セメント (図 3.3-27) を供試体の色を比較すると、両者は大きく異なっており、UF12 は普通ポルトランドセメントの色を示しており、普通ポルトランドセメントをベースに粒径を調整して作成されているものと想定される。一方、A 社製の超微粒子セメントの色は、高炉セメント (図 3.3-26) に近く、粒径調整に加えて高炉スラグ等により成分を調整しているものと思われる。

表 3.3-10 一軸圧縮強度試験結果 (水セメント比=1.6)

	固化体長さ [cm]	単位体積重量σ7[kg/dm ³]			一軸強度σ7[kN/m ²]			単位体積重量σ28[kg/dm ³]			σ28[MPa]		
		上部	中部	下部	上部	中部	下部	上部	中部	下部	上部	中部	下部
高炉B0%	25	-	1.56	1.68	プリーディング	3349	7427	-	1.56	1.68	-	10.526	11.733
高炉B10%	39	1.39	1.39	1.41	1428	1821	1821	1.39	1.4	1.42	5.322	6.106	6.162
高炉B41%	41	1.34	1.34	1.33	3378	3120	3120	1.34	1.35	1.34	7.924	7.727	8.531
超微粒子0%	29	-	1.50	1.56	プリーディング	5500	8066	-	1.54	1.54	-	16.469	21.102
超微粒子10%	39	1.38	1.38	1.41	3445	4473	4473	1.38	1.39	1.4	11.153	9.806	14.381
超微粒子41%	41	1.34	1.34	1.34	790	801	801	1.34	1.34	1.36	10.263	10.422	9.588
超々微粒子0%	41	1.34	1.35	1.37	6952	6103	5923	1.34	1.34	1.36	14.129	14.54	13.011
超々微粒子10%	41	1.31	1.30	1.31	4921	5887	5854	1.3	1.3	1.3	10.315	11.449	9.702
超々微粒子41%	41	1.33	1.33	1.34	4318	4806	4384	1.34	1.33	1.34	9.98	8.123	5.806
UF12 0%										1.21			1.757
UF12 10%										1.19			2.824
UF12 41%										1.35			5.939
懸濁型特殊シリカ	41	1.28	1.27	1.28	4773	5003	4960	1.29	1.29	1.28	6.78	6.366	5.229

表 3.3-11 一軸圧縮強度試験結果 (水セメント比=1.0)

	固化体長さ [cm]	単位体積重量σ7[kg/dm ³]			一軸強度σ7[kN/m ²]			単位体積重量σ28[kg/dm ³]			σ28[MPa]		
		上部	中部	下部	上部	中部	下部	上部	中部	下部	上部	中部	下部
高炉B0%	32	-	1.67	1.76	プリーディング	8233	12732	12732	1.63	1.69	1.74	15.412	20.235
高炉B10%	41	1.52	1.54	1.55	7950	7577	8317	1.51	1.53	1.52	20.003	20.69	18.947
高炉B41%	41	1.48	1.48	1.47	12282	12367	12299	1.47	1.48	1.48	20.495	14.906	19.528
超微粒子0%	40	1.54	1.55	1.56	13428	13114	13827	1.57	1.6	1.62	26.265	25.516	28.444
超微粒子10%	41	1.49	1.50	1.51	11865	12116	11424	1.53	1.53	1.53	24.412	23.737	27.152
超微粒子41%	41	1.47	1.48	1.48	5661	5981	6341	1.48	1.48	1.48	20.844	17.088	22.82

表 3.3-12 一軸圧縮強度試験結果 (水セメント比=2.0)

	固化体長さ [cm]	単位体積重量σ7[kg/dm ³]			一軸強度σ7[kN/m ²]			単位体積重量σ28[kg/dm ³]			σ28[MPa]		
		上部	中部	下部	上部	中部	下部	上部	中部	下部	上部	中部	下部
超々微粒子0%	40	1.32	1.32	1.33	3519	3543	4808	1.33	1.33	1.34	11.412	10.364	12.204
超々微粒子10%	41	1.27	1.28	1.29	3749	3846	4142	1.3	1.3	1.3	9.052	10.16	8.102
超々微粒子41%	42	1.28	1.29	1.28	3662	2951	3203	1.29	1.28	1.28	7.665	7.577	8.047
UF12 0%	40	1.16	1.18	1.24	231	236	213			1.23			0.545
UF12 10%	39	1.23	1.23	1.25	223	244	258			1.20			1.437
UF12 41%	32	1.30	-	1.30	335	-	352			1.29			6.3

計量なし

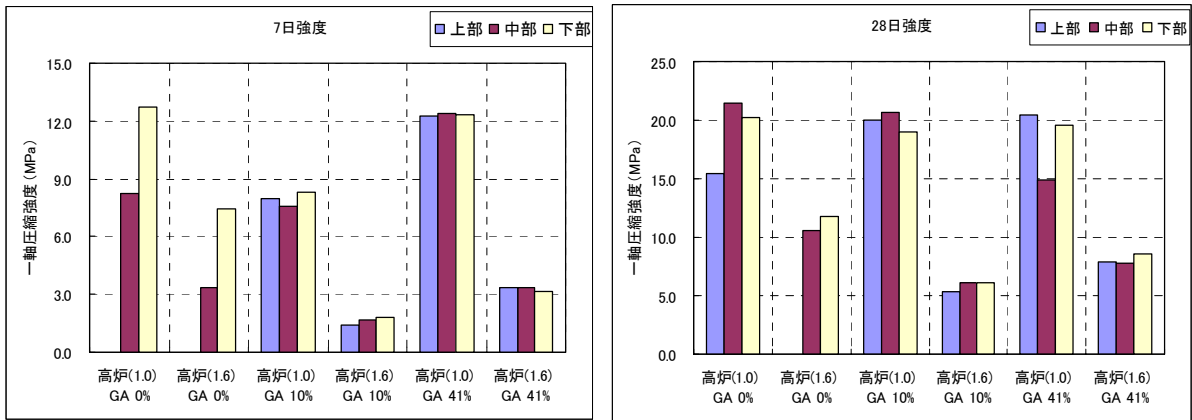


図 3.3-20 一軸圧縮強度 (高炉セメント)
(左図：7日強度、右図：28日強度)

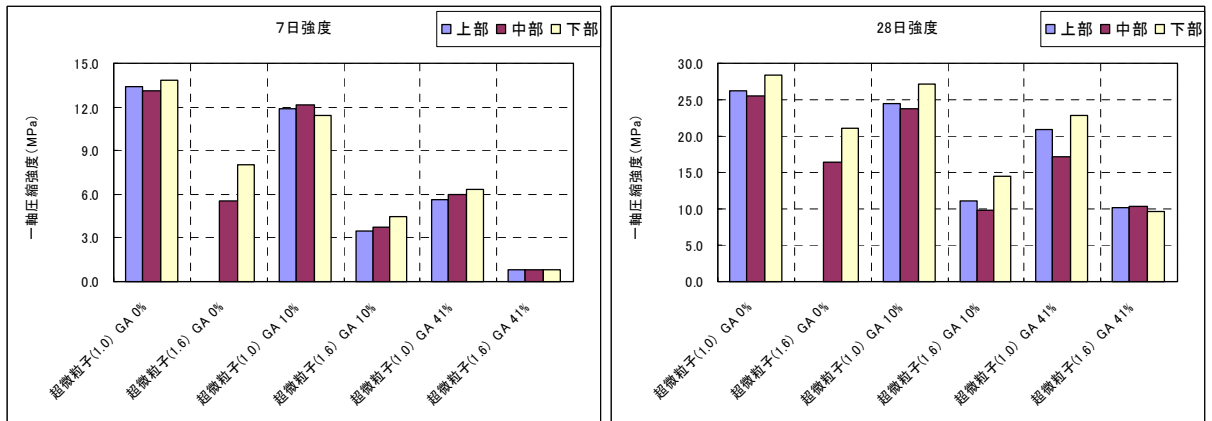


図 3.3-21 一軸圧縮強度 (超微粒子セメント)
(左図：7日強度、右図：28日強度)

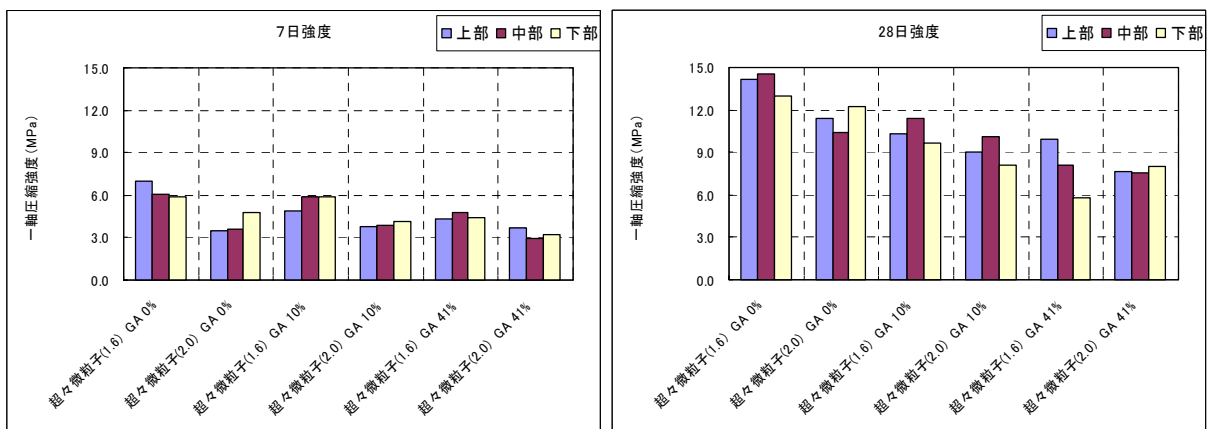


図 3.3-22 一軸圧縮強度 (超々微粒子セメント)
(左図：7日強度、右図：28日強度)

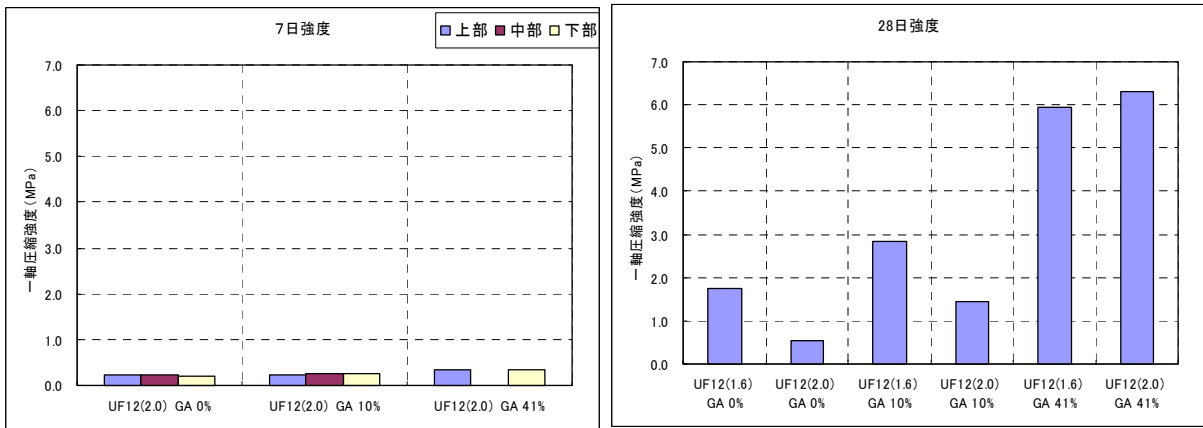


図 3.3-23 一軸圧縮強度 (UF12)
(左図：7日強度、右図：28日強度)

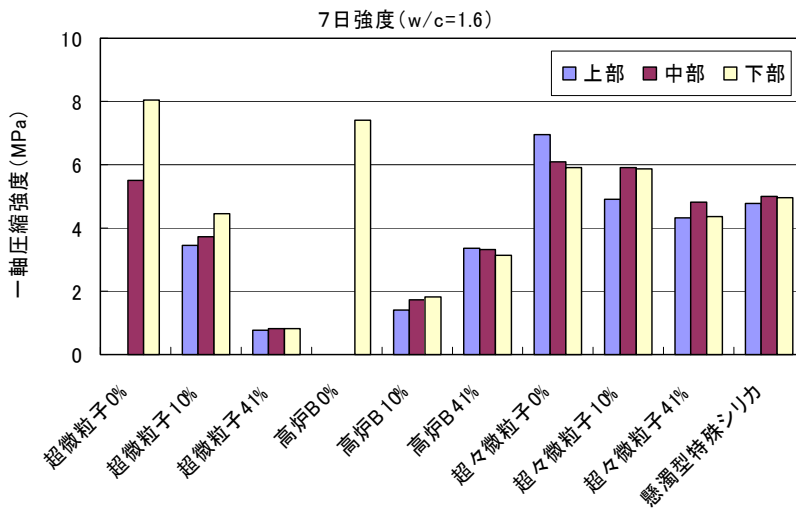


図 3.3-24 一軸圧縮強度 (7日強度、水セメント比=1.6)
(D社製懸濁型特殊シリカについては、水セメント比=2.5)

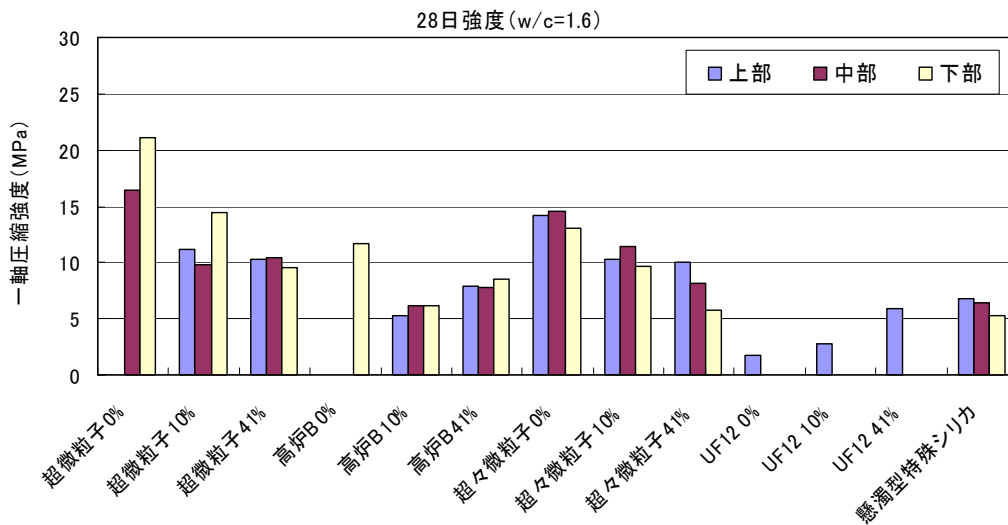


図 3.3-25 一軸圧縮強度 (28日強度、水セメント比=1.6)

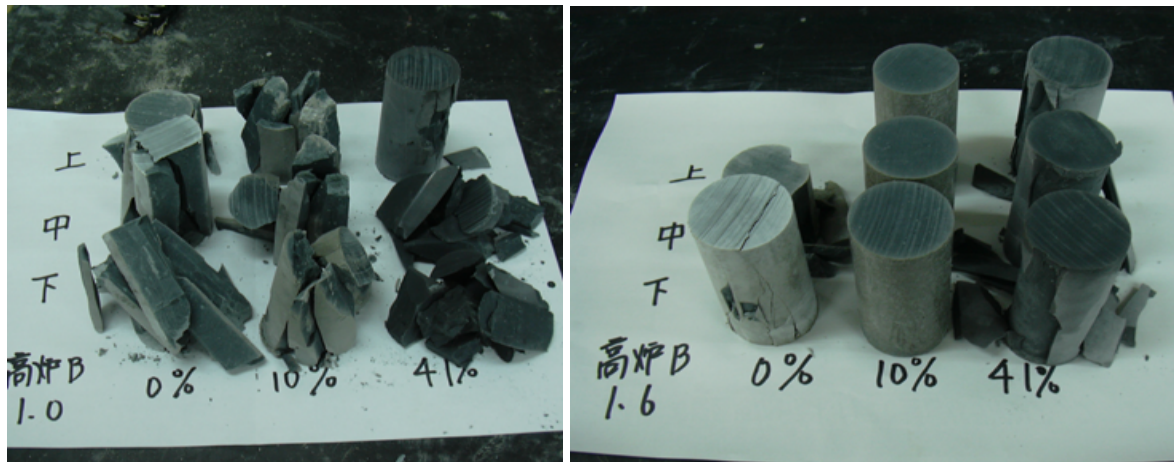


図 3.3-26 一軸試圧縮試験（28日強度）における破壊状況（高炉セメント）
 （左図：水セメント比=1.0、右図：水セメント比=1.6）

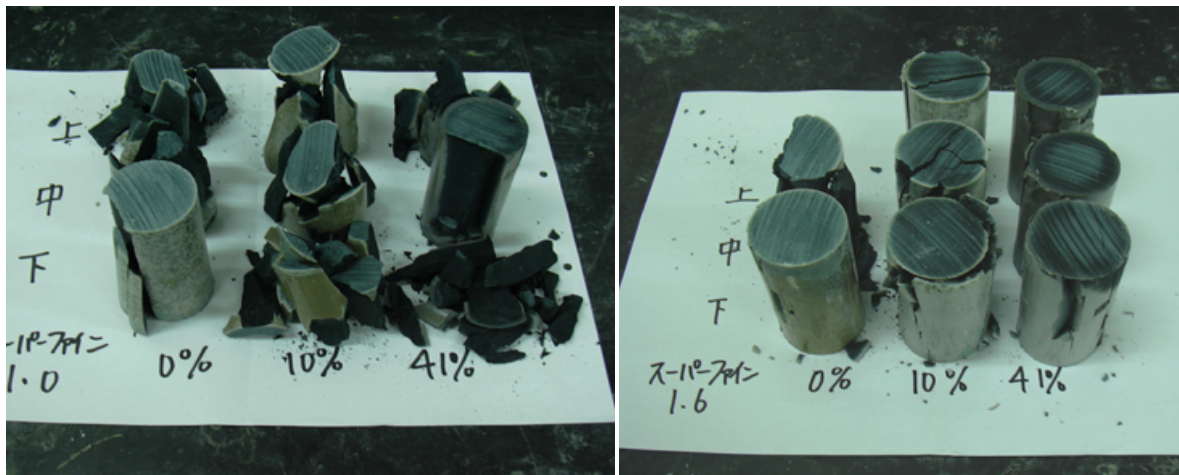


図 3.3-27 一軸試圧縮試験（28日強度）における破壊状況（A社製超微粒子セメント）
 （左図：水セメント比=1.0、右図：水セメント比=1.6）

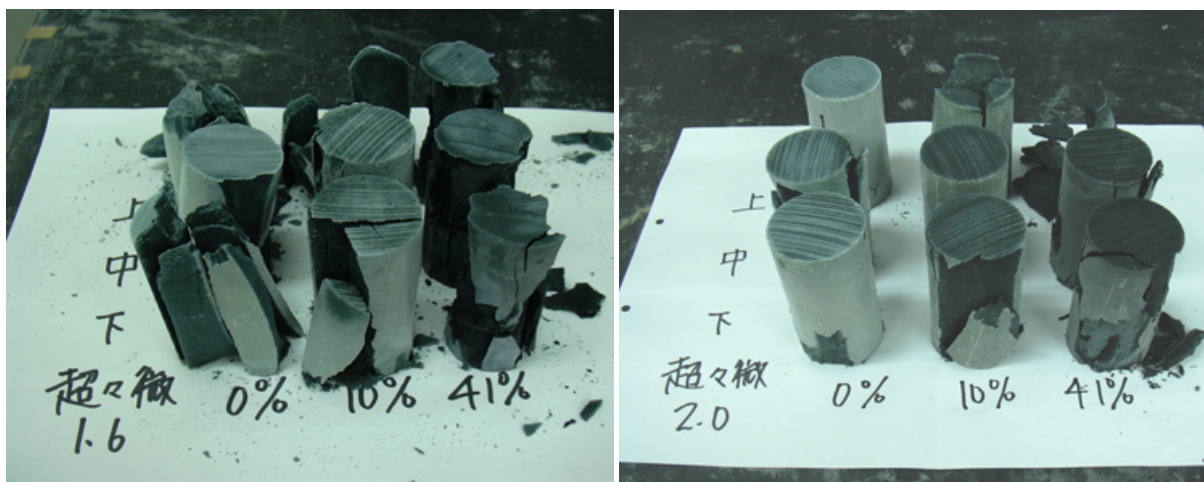


図 3.3-28 一軸試圧縮試験（28日強度）における破壊状況（A社製超々微粒子セメント）
 （左図：水セメント比=1.6、右図：水セメント比=2.0）

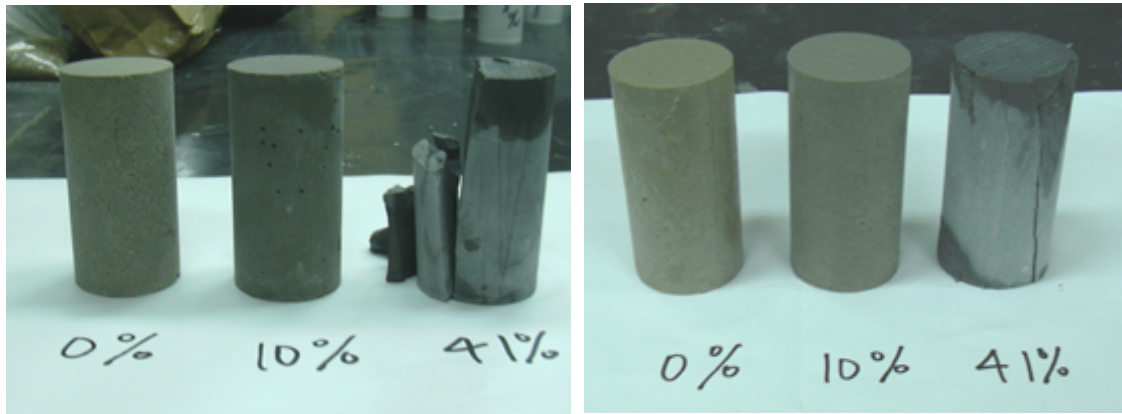


図 3.3-29 一軸試圧縮試験 (28 日強度) における破壊状況 (スウェーデン製超微粒子セメント : UF12)
 (左図 : 水セメント比=1.6、右図 : 水セメント比=2.0)

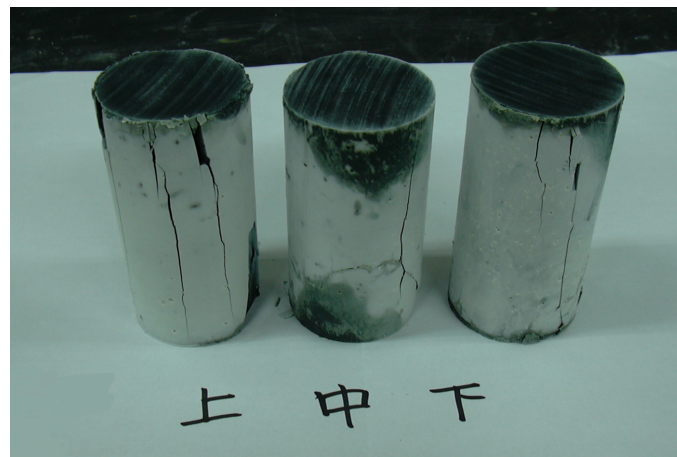


図 3.3-30 一軸試圧縮試験 (28 日強度) における破壊状況 (D社製懸濁型特殊シリカ)

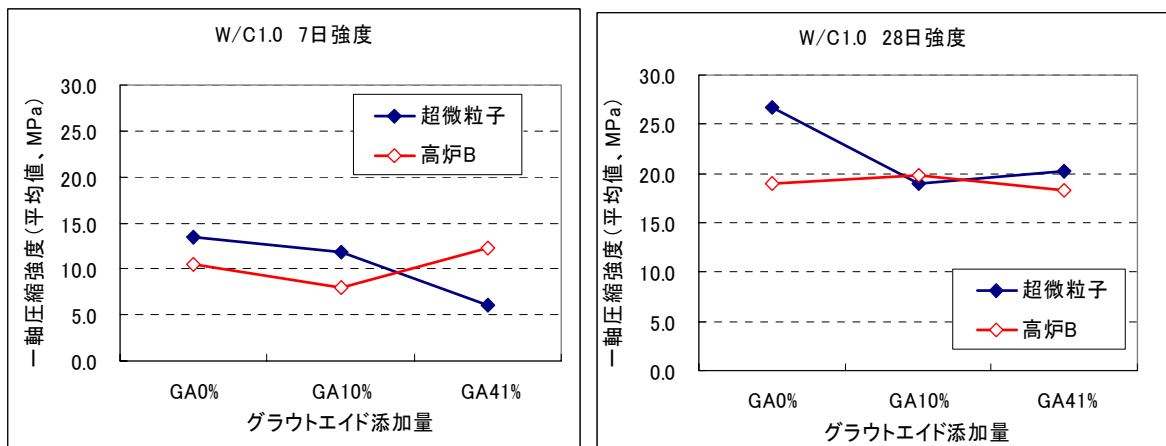


図 3.3-31 一軸圧縮強度に与えるグラウトエイドの影響 (水セメント比=1.0)
 (左図 : 7 日強度、右図 : 28 日強度)

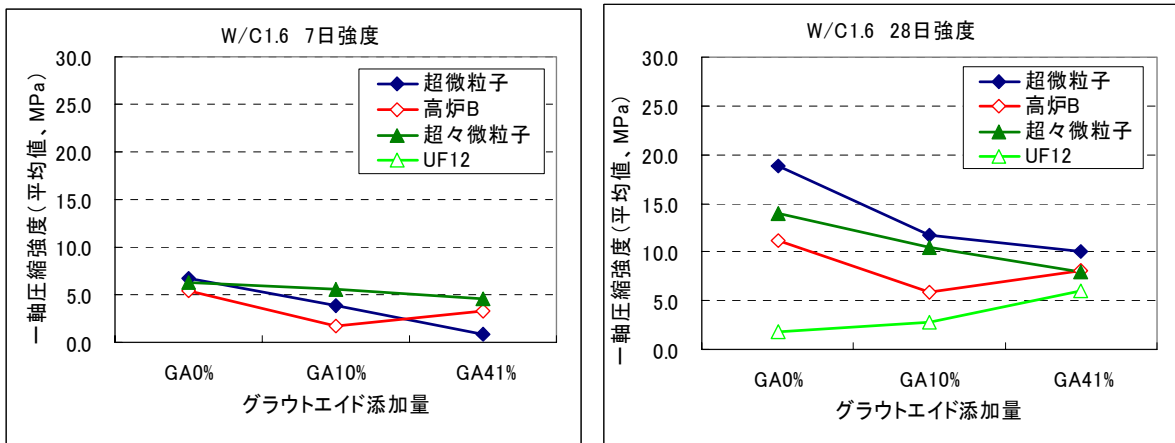


図 3.3-32 一軸圧縮強度に与えるグラウトエイドの影響 (水セメント比=1.6)

(左図：7日強度、右図：28日強度)

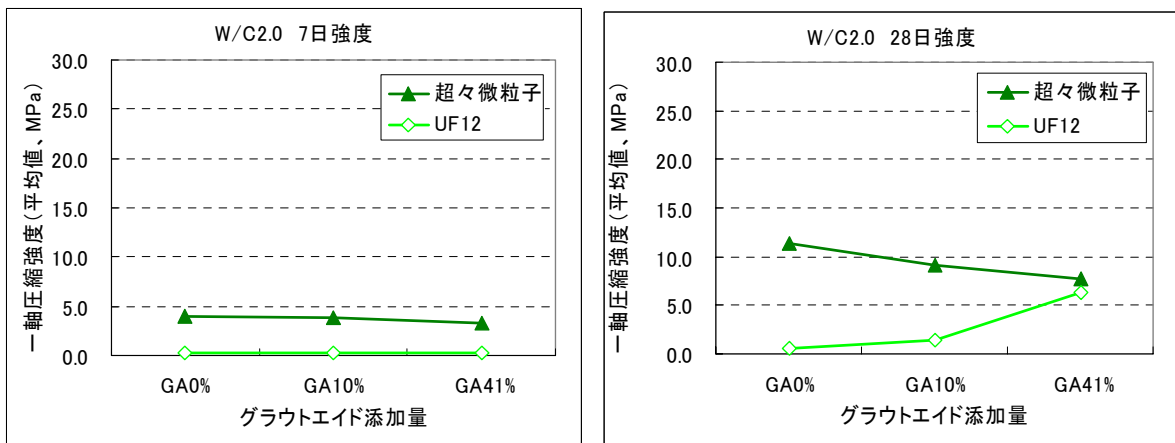


図 3.3-33 一軸圧縮強度に与えるグラウトエイドの影響 (水セメント比=2.0)

(左図：7日強度、右図：28日強度)

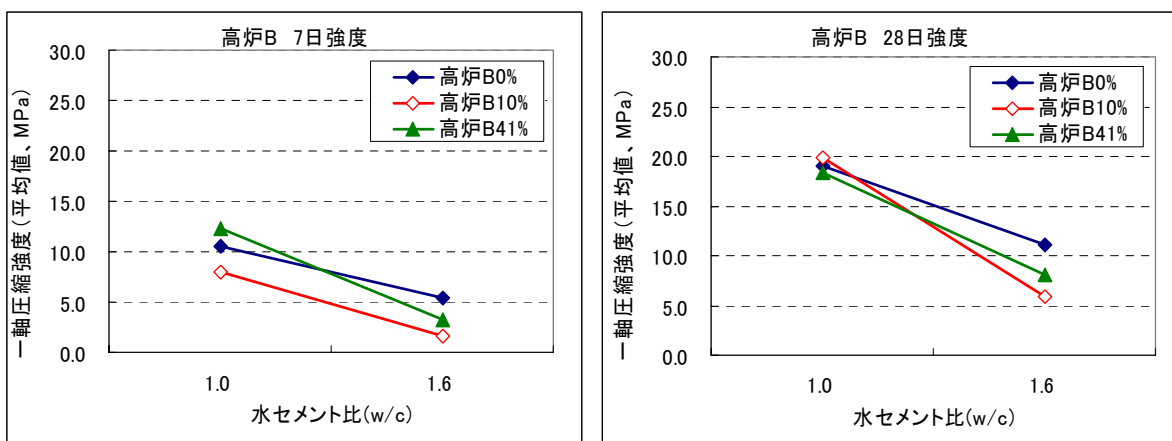


図 3.3-34 一軸圧縮強度に与える水セメント比の影響 (高炉セメント)

(左図：7日強度、右図：28日強度)

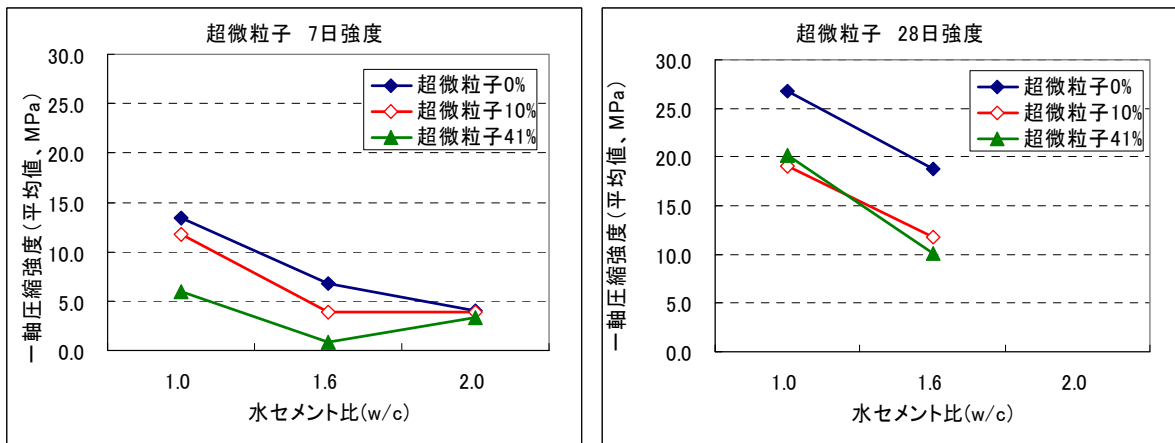


図 3.3-35 一軸圧縮強度に与える水セメント比の影響 (超微粒子セメント)

(左図：7日強度、右図：28日強度)

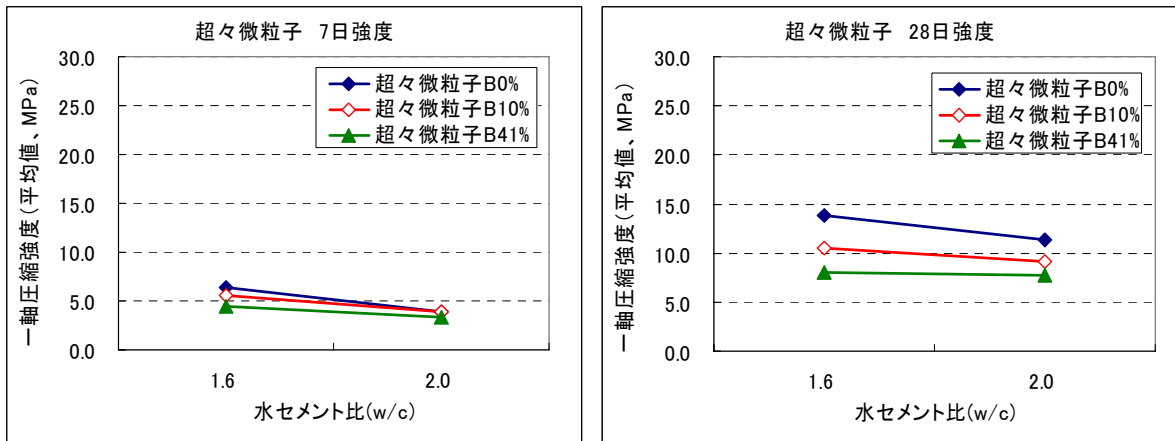


図 3.3-36 一軸圧縮強度に与える水セメント比の影響 (超々微粒子セメント)

(左図：7日強度、右図：28日強度)

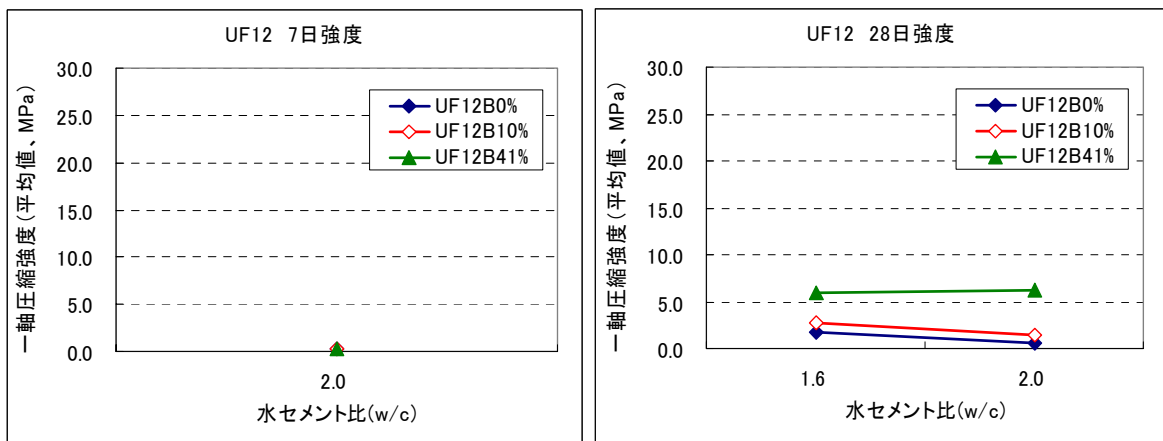


図 3.3-37 一軸圧縮強度に与える水セメント比の影響 (スウェーデン製超微粒子セメント UF12)

(左図：7日強度、右図：28日強度)

3 章参考文献

- 1) 延藤遵、秋田哲志：瑞浪超深地層研究所におけるグラウト技術の開発及び高度化、日本原子力研究開発機構 委託研究成果報告書（2006）
- 2) 佐竹化学機械工業株式会社：攪拌技術（1992）
- 3) 化学工学会編：化学工学の進歩 34 ミキシング技術（2000）

4. 高粘性グラウト材料の粘性特性の検討

4.1 検討の目的

岩盤亀裂内におけるグラウト材料の浸透性能はその粘性特性に大きく影響されるが、4章においては、グラウト材料の粘性特性について検討する(図 4.1-1参照)。昨年度の研究を通じて、高い止水性能を有する低 pH セメントグラウト材料や天然グラウト材料は、従来のダムやトンネルで使用されているグラウト材料に比べて、かなり高い粘性特性を有することが確認されている(図 4.1-2参照)。そこで、本章においては、前章において選定されたグラウト配合を用いて、浸透性に対して重要となる懸濁型グラウト材料の粘性特性について詳細に検討するものとする。

まず、懸濁型グラウト材料に対して適用可能となる分散系のレオロジーに関する基本事項についてその概要を整理する。次に、セメント系、ベントナイト系グラウト材料の粘性特性に関する既往測定結果を調査し、現状における知見を整理する。最後に、低 pH セメントグラウト材料や超微粒な材料を含めて、セメント系(低 pH セメントグラウトを模した配合)、ベントナイト系グラウト材料に対して代表的な高濃度配合を設定し、幅広いせん断速度領域において粘性を測定することで、高濃度グラウト材料の粘性特性を把握する。さらに、これらの粘性データを5章において実施する目詰まり試験結果の評価に役立てる。

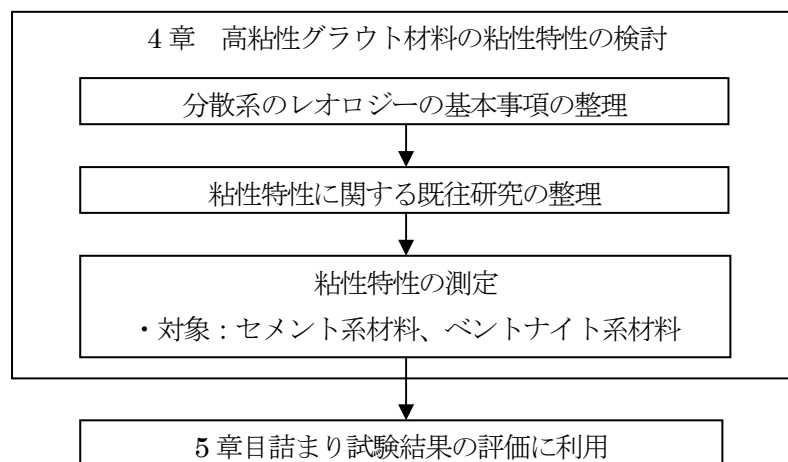


図 4.1-1 検討フロー

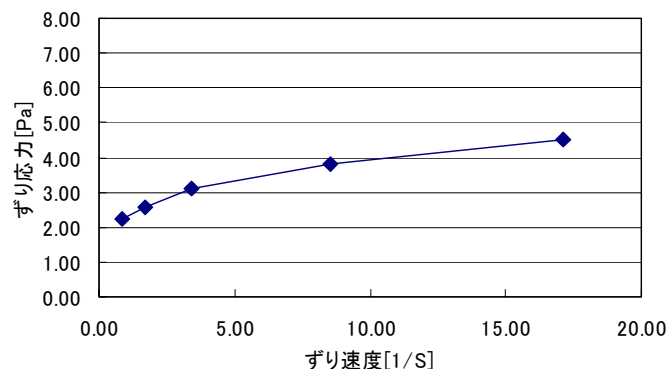


図 4.1-2 平成 17 年度粘性測定結果例¹⁾

(グラウトエイドを 41% 混入した超微粒粒子セメントスラリー (W/C=1.6))

4.2 粘性特性測定試験

4.2.1 使用材料

セメント系グラウトに関しては、3章の基本物性確認試験の結果、選定した配合を中心に粘性を測定する。また、今後の研究の参考資料とするために、ベントナイト系グラウトについても粘性特性を測定し、基本的な粘性特性を把握する。

(1) 人工材料：セメント系グラウト材料

- ◆ セメント
 - ・ 普通セメント：普通ポルトランドセメント（B社製）、高炉セメントB種（B社製）
 - ・ 超微粒子セメント：A社製
 - ・ 超々微粒子セメント：A社製
 - ・ 懸濁型特殊シリカ：D社製
- ◆ 添加剤
 - ・ 分散剤：ナフタレン系、ポリカルボン酸系
 - ・ シリカフェームスラリー：グラウトエイド（エルケム社製）

(2) 天然材料：ベントナイト系グラウト材料

図 4.2-1に示す粒径分布を有する Na 型ベントナイトを使用する。

- ◆ ベントナイト
 - ・ 普通ベントナイト：クニゲルV1（モンモリロナイト含有量47%）
 - ・ 超微粒ベントナイト：クニピアF（モンモリロナイト含有量98%）
- ◆ 溶媒：
 - ・ 工業用エタノール（58wt%）
 - ・ 塩水（4wt%）
 - ・ 蒸留水

工業用アルコール

- ・ 比重：0.9005（エタノール単体では0.8）
- ・ 成分：エタノール（58%）、硫酸アンモニウム（0.8%）、亜硫酸ナトリウム（0.2%）、水（41.0%）

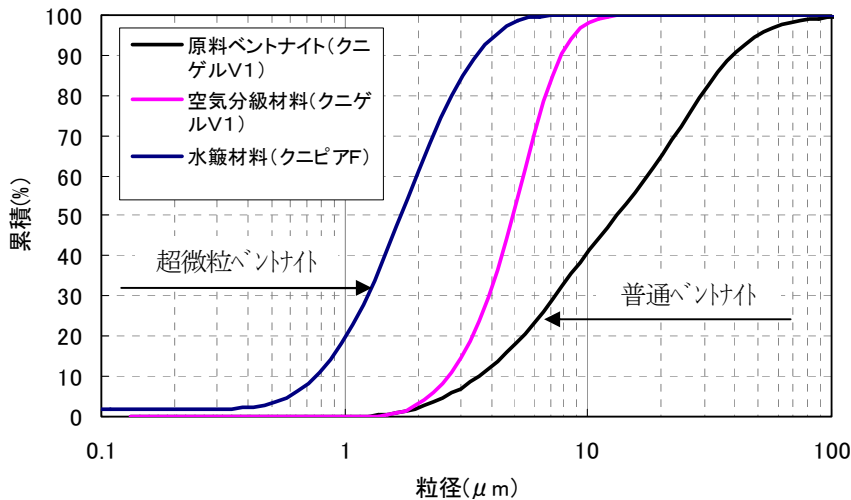


図 4.2-1 (ベントナイトの)粒度分布の比較

4.2.2 攪拌方法

(1) 攪拌装置

アズワン製トルネードPM-201（最大回転数 3000rpm、最大トルク 1.6kgf・cm）



図 4.2-2 攪拌装置と攪拌状況

(2) 攪拌槽

角型槽（幅 107mm×奥行 107mm×高さ 144mm）を使用する。

(3) 攪拌翼

セメント系材料に関しては、3章と同様にφ68mmのピッチドパドル翼（図 4.2-3中の右図）を使用する。一方、ベントナイト系材料はより粘性が高くピッチドパドル翼では十分な攪拌力が得られないため、よりせん断効果が高いφ50mmフラットタービン翼（図 4.2-3中の左図）を使用する。



図 4.2-3 攪拌翼（左側：φ50mmフラットタービン翼、右図：φ68mmピッチドパドル翼）

(4) 回転数

以下に示す相似則を適用し、実規模ミキサー（代表寸法 440mm）における 800rpm に対応する回転数として 2053rpm（代表寸法 107mm）に設定する。

$$N^3 D^2 = \text{const.} \quad (\text{数式 4.2-1})$$

ここに、N：回転数、D：スケール代表寸法

(5) 攪拌時間

<ベントナイト系>

- ・ 3分間

<セメント系>

- ・ グラウトエイド入り：水道水＋分散剤＋セメントを 3分間攪拌し、グラウトエイドを加えてさらに 3分間攪拌する（合計 6分間の攪拌）
- ・ グラウトエイド無し：水道水＋分散剤＋セメントを 3分間攪拌する。

4.2.3 試験配合

セメント材料の試験配合を表 4.2-1に、ベントナイト材料の試験配合を表 4.2-2に示す。

表 4.2-1 セメントグラウト配合表

番号	試験配合名	セメント種類	グラウトエイド含有量	水/粉体比	分散剤
1	R-00-10	高炉セメントB種	0%	1.0	無添加
2	R-10-10	高炉セメントB種	10%	1.0	無添加
3	R-41-10	高炉セメントB種	41%	1.0	マイティ150R、2.5%
4	R-00-16	高炉セメントB種	0%	1.6	無添加
5	R-00-16N	高炉セメントB種	0%	1.6	ポリカルボン、1.0%
6	R-00-16M	普通ポルトランドセメント	0%	1.6	無添加
7	R-10-16	高炉セメントB種	10%	1.6	無添加
8	R-41-16	高炉セメントB種	41%	1.6	マイティ150R、2.5%
9	R-00-20N	高炉セメントB種	0%	2.0	ポリカルボン、1.0%
10	R-00-20M	普通ポルトランドセメント	0%	2.0	ポリカルボン、1.0%
11	F-00-10	超微粒子セメント	0%	1.0	ポリカルボン、1%
12	F-10-10	超微粒子セメント	10%	1.0	ポリカルボン、1%
13	F-41-10	超微粒子セメント	41%	1.0	マイティ150R、2.5%
14	F-00-16	超微粒子セメント	0%	1.6	ポリカルボン、1%
15	F-10-16	超微粒子セメント	10%	1.6	ポリカルボン、1%
16	F-10-16N	超微粒子セメント	10%	1.6	ポリカルボン、1.5%
17	F-41-16	超微粒子セメント	41%	1.6	マイティ150R、2.5%
18	F-00-20	超微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、1%
19	F-10-20	超微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1.0%
20	F-41-20	超微粒子セメント	41%	2.0	マイティ150R、2.5%
21	U-00-16	超々微粒子セメント	0%	1.6	ポリカルボン、1%
22	U-10-16	超々微粒子セメント	10%	1.6	ポリカルボン、1%
23	U-41-16	超々微粒子セメント	41%	1.6	マイティ150R、2.5%
24	U-00-20	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、1%
25	U-00-20N	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、5%
26	U-10-20	超々微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1%
27	U-41-20	超々微粒子セメント	41%	2.0	マイティ150R、2.5%
28	S-00	懸濁型特殊シリカ	0%	2.5	マイティ150R、0.7%

表 4.2-2 ベントナイトグラウト配合表

試験配合名	種類	商品名	溶媒	液/固比	分散剤
R-1	普通 粒径	ケゲル V1	蒸留水	10	無
R-2			NaCl 溶液 4wt%	4	無
R-3			工業用エタノール 58wt%	4	無
F-1	超微 粒	ケニア F	蒸留水	15	無
F-2			NaCl 溶液 4wt%	4	無
F-3			工業用エタノール 58wt%	4	無

4.2.4 試験装置

Anton Paar 社製レオメーターPhysica MCR301 (図 4.2-4) を使用し、測定治具としては共軸二重円筒 (φ17mm、図 4.2-5) を使用するものとする。また、測定状況を図 4.2-6に示す。

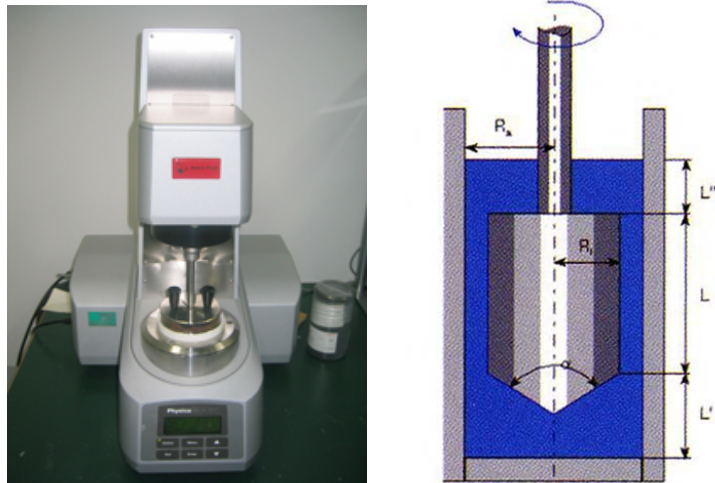


図 4.2-4 レオメーター (左：全体図、右：共軸二重円筒型)

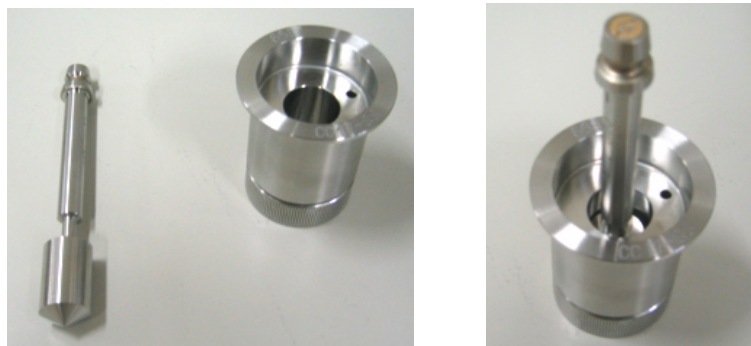


図 4.2-5 測定治具 (共軸二重円筒型)

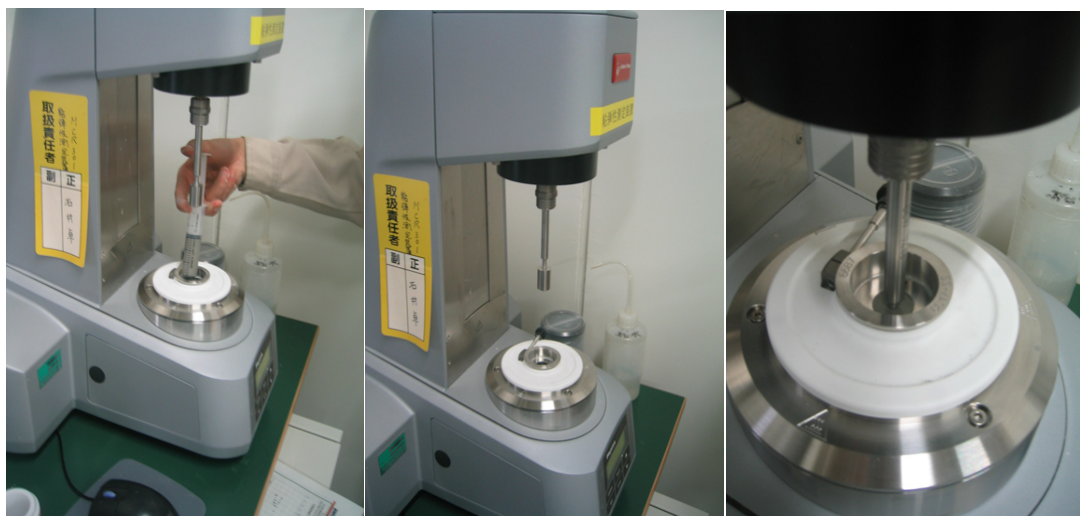


図 4.2-6 測定状況

4.2.5 試験項目

試験項目としては表 4.2-3に示す6種類の測定を実施する。

表 4.2-3 試験項目一覧表

測定開始時	試験項目	測定方法	備考
練混ぜ直後 0分経過時	流動曲線	静的測定（せん断速度制御）	アップカーブとダウンカーブを把握 （チルトロビ性の把握）
13.3分 経過時	降伏強度	静的測定（応力制御）	練混ぜ直後の降伏強度の測定
15.0分 経過時	複素粘度	動的測定（振動数依存性の把握）	0.1Hz～100Hzでの振動数依存性
18.3分 経過時	複素粘度	動的測定（時間依存性の把握）	1時間中の粘性変化の把握
78.3分 経過時	流動曲線	静的測定（せん断速度制御）	アップカーブとダウンカーブの把握 （チルトロビ性の把握）
91.6分 経過時	降伏強度	静的測定（応力制御）	約1.5時間後の降伏強度の測定

(1) 静的測定（せん断速度制御）

せん断速度制御モードでせん断速度を変化させた際のせん断応力を測定することで流動曲線（せん断速度とせん断応力の関係図）を作成する。具体的な測定方法は以下の通りとする。

- ・ 測定時間間隔：1 s
- ・ 測定点：200点（せん断速度 0.01～500 (1/s)）
- ・ 測定回数：アップカーブとダウンカーブを2回測定する。測定順序は、アップカーブ、ダウンカーブ、アップカーブ、ダウンカーブの順とする。

(2) 静的測定（応力制御）

応力制御モードでせん断応力を少しずつ上昇させ、試料が流動し始める降伏強度を測定する。具体的な測定方法は以下の通りとする。

- ・ 測定範囲：せん断応力 0.1～20Pa（但し、上記で測定した流動曲線より適切な範囲を推定する）
- ・ 測定時間間隔：1 s
- ・ 測定点：100点

(3) 動的測定

動的測定モードで、振動数 0.1Hz～100Hz 間の複素粘度を測定することで粘度の振動数依存性について検討している。具体的な測定方法は以下の通りとする。

- ・ 測定モード：動的測定
- ・ 測定範囲：振動数 0.1Hz～100Hz
- ・ 測定ひずみ：1%

- ・ 測定時間間隔：1 s
- ・ 測定点：200 点（振動数）

さらに、以下の要領で複素粘度を 1 時間測定することで粘性の時間依存性を確認する。

- ・ 測定モード：動的測定
- ・ 測定振動数 1Hz
- ・ 測定ひずみ：1%
- ・ 時間間隔：15 s
- ・ 測定点：240 点

4.2.6 試験結果

試験結果のうち主なケースを抜粋して以下に示す。

(1) セメント材料

(i) 流動曲線

超微粒子セメント等の微粒なセメント材料を用いた高濃度スラリーは一般的にチクソトロピー性を有するため、その流動曲線はアップカーブとダウンカーブで異なる形状を示す。また、実際のグラウト作業ではグラウト材料はアジテーターにより常に攪拌されているため、せん断力が作用された後の粘性特性の把握が必要となるため、ここではダウンカーブを比較することとする。

超微粒子セメントにおける水セメント比の影響を比較して表 4.2-4に、水セメント比 1.6 の場合のセメント種類(高炉セメント B 種、超微粒子セメント、超々微粒子セメント)の影響を比較して表 4.2-5に、超微粒子セメントを用いた水セメント比 1.6 の配合のうち、グラウトエイド添加量が異なる 3 ケースを比較して図 4.2-7にそれぞれ示す。

表 4.2-4より、超微粒子セメントに関しては、グラウトエイドを添加しない場合は、水セメント比を変化させても全ケースにおいて流動曲線は降伏強度の無いニュートン流動を示している。特に、攪拌後 78.3 分経過しても有意な降伏強度が発生しておらずニュートン流動と見なせる。粘度については水セメント比に反比例して、上昇しており、さらに時間の経過に伴い増大していることがわかる。一方、グラウトエイドを添加した場合は、降伏強度を有するビンガム流動的な挙動を示しており、水セメント比の違いにより降伏強度と塑性粘度がともに増大していることがわかる。また、図 4.2-7より、グラウトエイドの添加量の増大により降伏強度が大幅に増大していることがわかる。

表 4.2-5より、普通セメントと超々微粒子セメントを用いた場合は、グラウトエイドの有無にかかわらず降伏強度を有していることがわかる。また、流動曲線はやや曲線状となった擬塑性流動(図 4.2-1 参照)的な挙動を示しているが、せん断速度が 50 から 500 の区間はほぼ直線状となっているため、この区間を直線近似したビンガム流体と見なしても精度が大きく低下しないものと考えられる。

上記より、降伏強度の無い場合はニュートン流体として、降伏強度を有する場合はビンガム流体としてモデル化が可能であることがわかる。

(ii) 塑性粘度と降伏強度

グラウト材をビンガム流体と仮定して、流動曲線(ダウンカーブ)のうちせん断速度が 50 から 500 の区間を直線近似することで、ビンガムの降伏強度(以下、本書では見掛の降伏強度と称す)とビンガムの塑性粘度を算定する。例として F-10-10、練混ぜ直後の 1 回目のダウンカーブにおける算定例を図 4.2-8に示す。

このようにして算定した見掛の降伏強度と応力制御により算定した真の降伏強度を比較して表 4.2-6に示す。また、ビンガム流体を仮定して算定した塑性粘度を表 4.2-7にまとめて示す。

また、各セメント種類における降伏強度を比較して図 4.2-9～図 4.2-11に、塑性粘度を図 4.2-12～図 4.2-14にそれぞれ図示する。

図 4.2-9～図 4.2-11より、いずれの材料においても基本的に真の降伏強度よりビンガム流体を仮定した見掛けの降伏強度の方が高いことがわかる。また、図 4.2-9より高炉セメントを用いた場合は、グラウトエイドを 10%添加した方が、41%添加した場合より降伏強度が高いことがわかる。一方、図 4.2-10と図 4.2-11より、超微粒子セメントや超々微粒子セメントの場合はグラウトエイド添加量に比例して降伏強度が増加していることがわかる。また、超々微粒子セメントの場合は、総じて真の降伏強度が高く、水セメント比 2.0 のグラウトエイド添加無しのケースである U-00-20 においても、真の降伏強度が発生している。分散剤を 5%添加した U-00-20N のみが降伏強度が 0 となっている。

図 4.2-12より、高炉セメントを用いた場合は、降伏強度と同様にグラウトエイドを 10%添加した方が、41%添加した場合より塑性粘度も高いことがわかる。一方、図 4.2-13と図 4.2-14より、超微粒子セメントや超々微粒子セメントの場合はグラウトエイド添加量に比例して塑性粘度も増加していることがわかる。また、セメント種類によらず、水セメント比が増えると、降伏強度と塑性粘度が低下していることがわかる。

なお、図 4.2-10と図 4.2-13より、懸濁型特殊シリカは時間経過に伴い、急激に降伏強度と塑性粘度が上昇しており、特に塑性粘度の上昇量が大きいことがわかる。

表 4.2-4 水セメント比の影響 (超微粒子セメント)

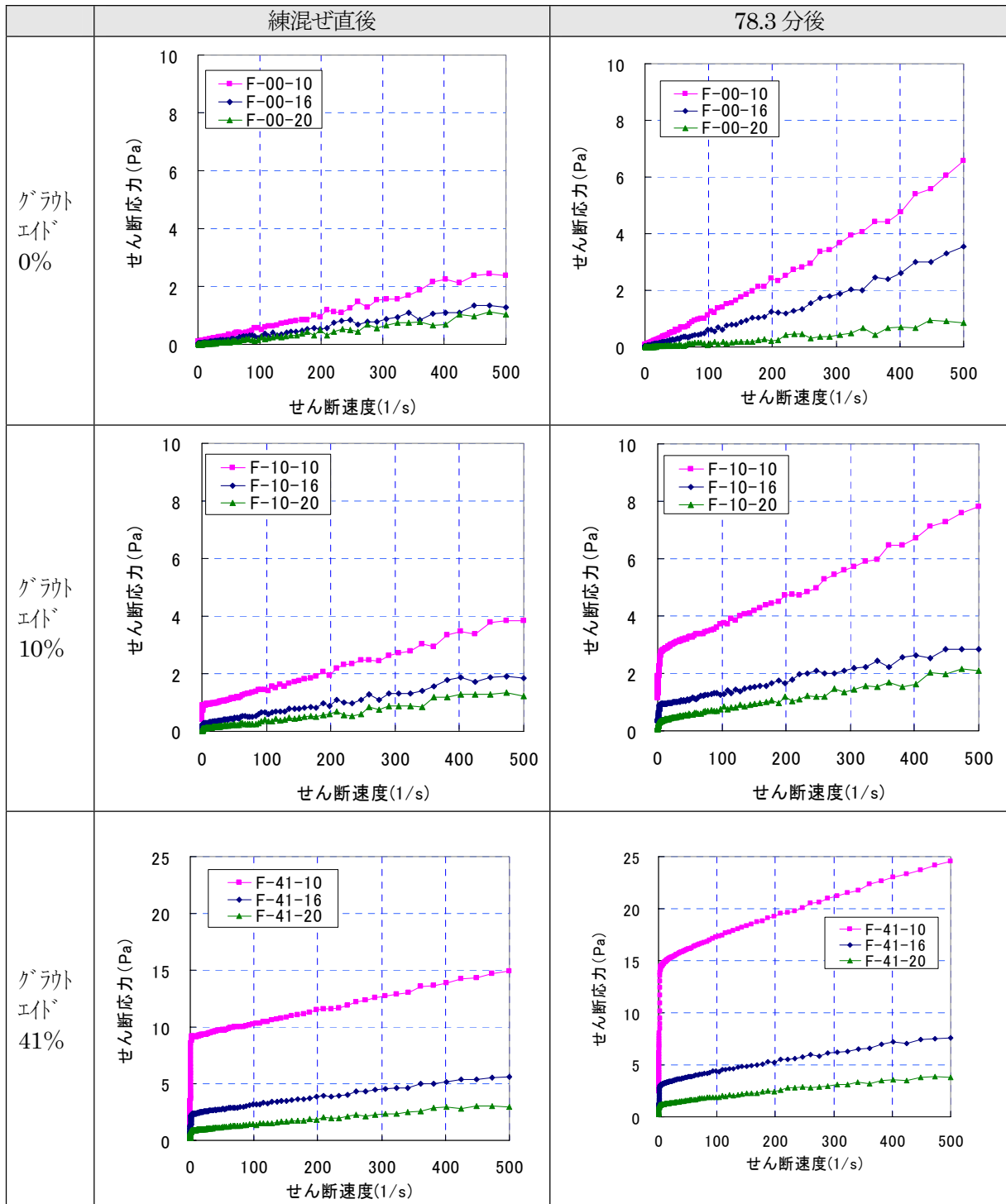
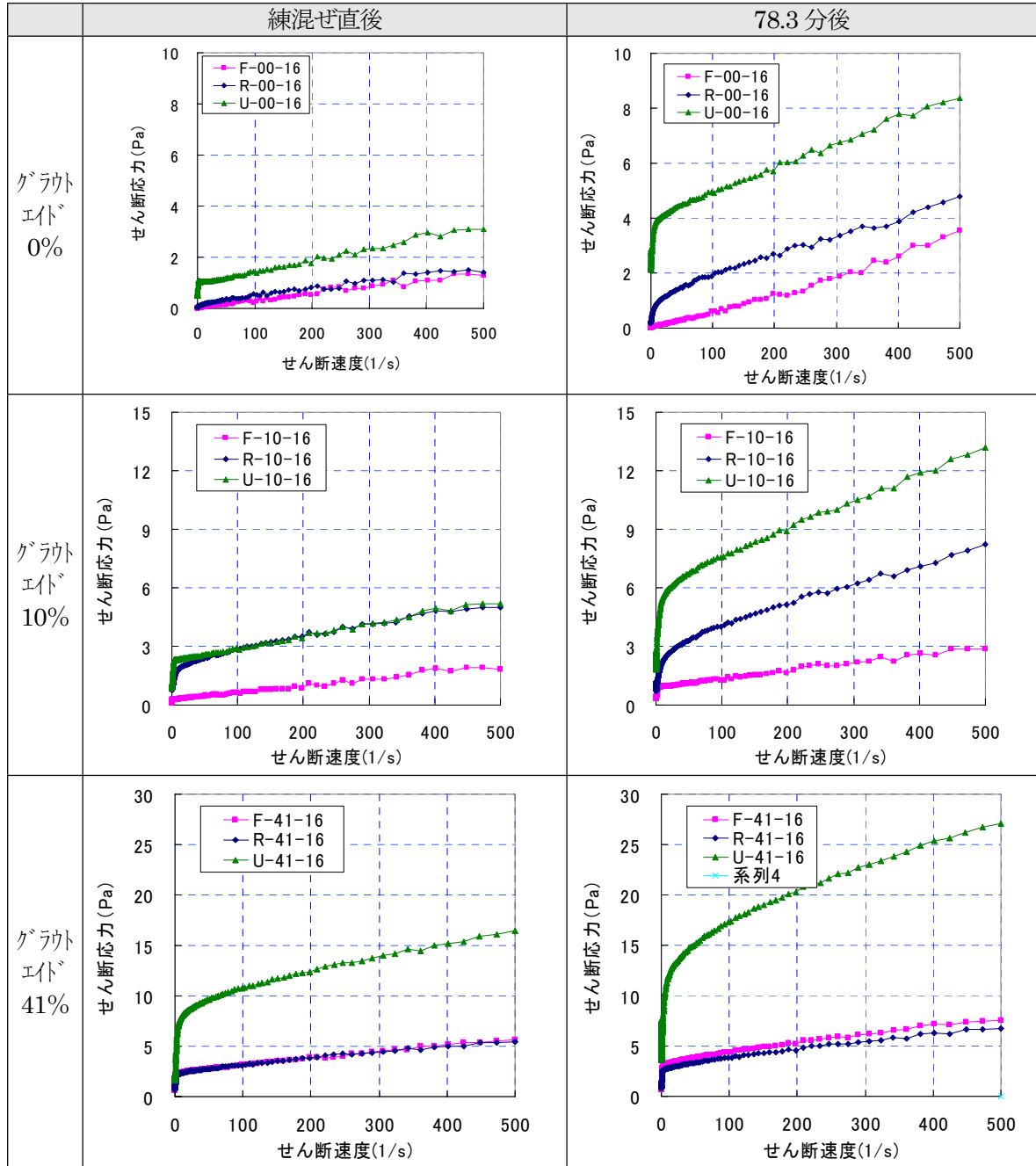


表 4.2-5 セメント種類の影響 (水セメント比 1.6)



*R : 高炉セメント B 種、F : 超微粒子セメント、U : 超々微粒子セメント

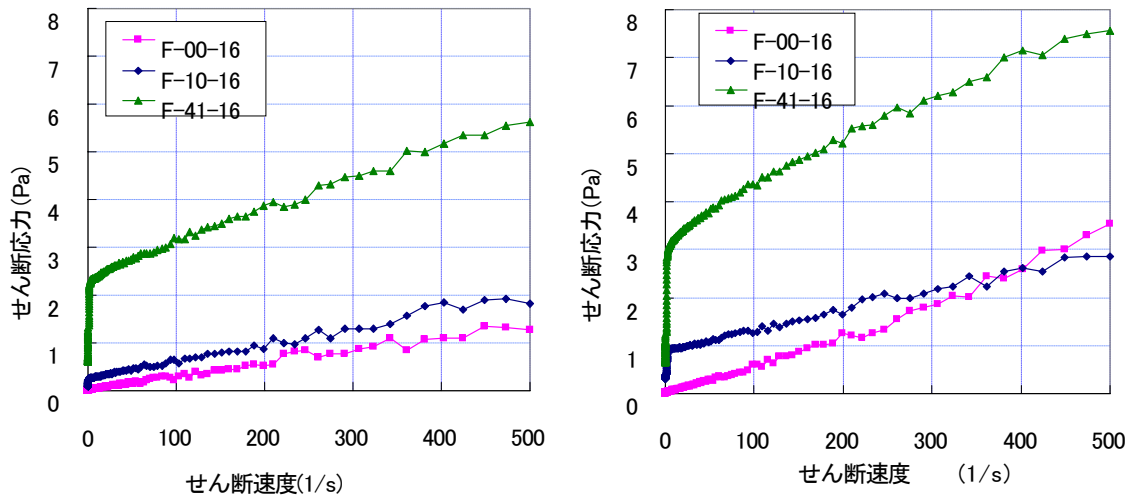


図 4.2-7 グラウトエイド添加量の違いによる影響 (1 回目測定時のダウンカーブ)
(左図：練混ぜ直後、右図：78.3 分後)

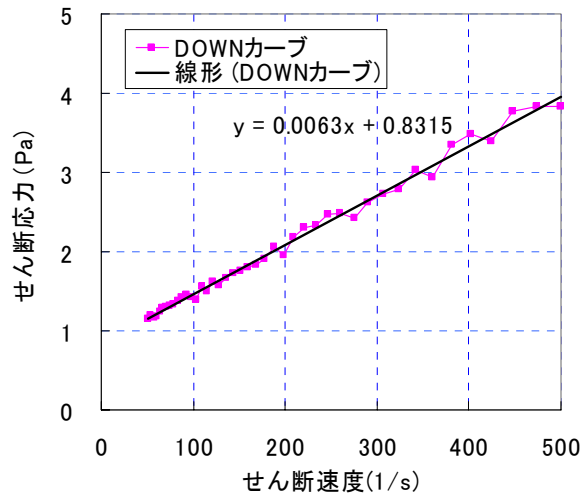


図 4.2-8 ビンガム流体と仮定した場合の塑性粘度と見掛の降伏強度の算定例
(F-10-10、練混ぜ直後の 1 回目のダウンカーブ：降伏強度 0.83Pa、塑性粘度 6.3mPa・s)

表 4.2-6 降伏強度の算定結果

番号	試験配合名	セメント種類	GA含有量	水/粉体比	分散剤	降伏強度 (Pa)					
						応力制御による測定 (真の降伏強度)		見掛けの降伏強度 (ビンガム流体を仮定)			
								練混ぜ直後		78.3分後	
						13.3分後	91.6分後	1回目	2回目	1回目	2回目
1	R-00-10	高炉セメントB種(普通セメント)	0%	1.0	無添加	0.6	1.2	0.8	0.9	4.0	4.3
2	R-10-10	高炉セメントB種(普通セメント)	10%	1.0	無添加	4.0	12.1	9.8	9.7	11.2	12.5
3	R-41-10	高炉セメントB種(普通セメント)	41%	1.0	マイティ150R、2.5%	3.4	7.1	8.1	7.9	10.1	11.0
4	R-00-16	高炉セメントB種(普通セメント)	0%	1.6	無添加	0.1	0.4	0.2	0.3	1.2	1.3
5	R-00-16N	高炉セメントB種(普通セメント)	0%	1.6	ボリカルボン、1.0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	R-00-16M	ポルトランドセメント (普通セメント、太平洋)	0%	1.6	ボリカルボン、1.0%	0.2	0.4	0.2	0.4	1.1	1.2
7	R-10-16	高炉セメントB種(普通セメント)	10%	1.6	無添加	1.3	1.2	2.2	2.2	3.0	3.1
8	R-41-16	高炉セメントB種(普通セメント)	41%	1.6	マイティ150R、2.5%	1.0	1.5	2.6	2.4	3.1	3.2
9	R-00-20N	高炉セメントB種(普通セメント)	0%	2.0	ボリカルボン、1.0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	R-00-20M	ポルトランドセメント (普通セメント、太平洋)	0%	2.0	ボリカルボン、1.0%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	F-00-10	超微粒子セメント	0%	1.0	ボリカルボン、1%	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
12	F-10-10	超微粒子セメント	10%	1.0	ボリカルボン、1%	0.9	2.5	0.8	0.8	2.7	2.5
13	F-41-10	超微粒子セメント	41%	1.0	マイティ150R、2.5%	4.0	12.0	9.1	9.4	15.3	16.7
14	F-00-16	超微粒子セメント	0%	1.6	ボリカルボン、1%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	F-10-16	超微粒子セメント	10%	1.6	ボリカルボン、1%	0.1	0.5	0.3	0.2	0.9	0.9
16	F-10-16N	超微粒子セメント	10%	1.6	ボリカルボン、1.5%	0.1	0.2	0.1	0.2	0.6	0.5
17	F-41-16	超微粒子セメント	41%	1.6	マイティ150R、2.5%	1.0	2.1	2.5	2.4	3.5	3.8
18	F-00-20	超微粒子セメント	0%	2.0	ボリカルボン、1%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	F-10-20	超微粒子セメント	10%	2.0	ボリカルボン、1.0%	0.01	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4
20	F-41-20	超微粒子セメント	41%	2.0	マイティ150R、2.5%	0.4	0.7	1.0	0.9	1.4	1.5
21	U-00-16	超々微粒子セメント	0%	1.6	ボリカルボン、1%	1.2	5.0	1.0	1.2	4.1	3.5
22	U-10-16	超々微粒子セメント	10%	1.6	ボリカルボン、1%	2.2	5.6	2.3	2.7	6.2	5.3
23	U-41-16	超々微粒子セメント	41%	1.6	マイティ150R、2.5%	3.9	12.2	9.3	9.4	14.6	15.4
24	U-00-20	超々微粒子セメント	0%	2.0	ボリカルボン、1%	0.2	0.3	1.0	0.9	1.3	1.3
25	U-00-20N	超々微粒子セメント	0%	2.0	ボリカルボン、5%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	U-10-20	超々微粒子セメント	10%	2.0	ボリカルボン、1%	1.2	3.0	1.8	2.0	3.7	3.3
27	U-41-20	超々微粒子セメント	41%	2.0	マイティ150R、2.5%	2.0	4.8	4.4	4.3	6.4	6.9
28	S-00	懸濁型特殊シリカ	0%	2.5	マイティ150R、0.7%	2.2	1.5	0.8	1.4	2.9	2.8

表 4.2-7 塑性粘度の算定結果
(ビンガム流体と仮定した場合)

番号	試験配合名	セメント種類	GA含有量	水/粉体比	分散剤	塑性粘度 (mPa・s)			
						練混ぜ直後		78.3分後	
						1回目	2回目	1回目	2回目
1	R-00-10	高炉セメントB種(普通セメント)	0%	1.0	無添加	4.4	5.1	21.3	24.2
2	R-10-10	高炉セメントB種(普通セメント)	10%	1.0	無添加	13.7	15.0	24.1	24.2
3	R-41-10	高炉セメントB種(普通セメント)	41%	1.0	マイティ150R、2.5%	11.9	11.2	14.9	14.4
4	R-00-16	高炉セメントB種(普通セメント)	0%	1.6	無添加	2.8	2.7	7.0	7.4
5	R-00-16N	高炉セメントB種(普通セメント)	0%	1.6	ポリカルボン、1.0%	1.9	1.8	2.3	1.9
6	R-00-16M	ポルトランドセメント (普通セメント、太平洋)	0%	1.6	ポリカルボン、1.0%	2.8	3.3	8.8	10.5
7	R-10-16	高炉セメントB種(普通セメント)	10%	1.6	無添加	6.2	6.8	10.5	10.8
8	R-41-16	高炉セメントB種(普通セメント)	41%	1.6	マイティ150R、2.5%	6.1	6.1	7.8	7.7
9	R-00-20N	高炉セメントB種(普通セメント)	0%	2.0	ポリカルボン、1.0%	2.0	1.7	1.8	1.6
10	R-00-20M	ポルトランドセメント (普通セメント、太平洋)	0%	2.0	ポリカルボン、1.0%	2.1	2.0	4.6	2.7
11	F-00-10	超微粒子セメント	0%	1.0	ポリカルボン、1%	5.0	5.1	12.6	12.0
12	F-10-10	超微粒子セメント	10%	1.0	ポリカルボン、1%	6.3	6.6	10.1	9.4
13	F-41-10	超微粒子セメント	41%	1.0	マイティ150R、2.5%	11.8	11.7	19.0	18.9
14	F-00-16	超微粒子セメント	0%	1.6	ポリカルボン、1%	2.7	2.7	6.9	6.9
15	F-10-16	超微粒子セメント	10%	1.6	ポリカルボン、1%	3.5	3.3	4.1	4.5
16	F-10-16N	超微粒子セメント	10%	1.6	ポリカルボン、1.5%	3.4	3.4	4.5	5.5
17	F-41-16	超微粒子セメント	41%	1.6	マイティ150R、2.5%	6.6	6.5	8.7	8.8
18	F-00-20	超微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、1%	2.2	2.0	1.8	1.9
19	F-10-20	超微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1.0%	2.6	2.7	3.4	3.4
20	F-41-20	超微粒子セメント	41%	2.0	マイティ150R、2.5%	4.4	4.5	5.2	5.4
21	U-00-16	超々微粒子セメント	0%	1.6	ポリカルボン、1%	4.6	5.0	8.8	7.9
22	U-10-16	超々微粒子セメント	10%	1.6	ポリカルボン、1%	6.3	7.1	14.2	11.4
23	U-41-16	超々微粒子セメント	41%	1.6	マイティ150R、2.5%	15.0	16.1	26.8	29.4
24	U-00-20	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、1%	4.2	4.4	5.8	5.7
25	U-00-20N	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、5%	2.8	3.1	2.7	2.9
26	U-10-20	超々微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1%	4.6	5.2	9.3	8.2
27	U-41-20	超々微粒子セメント	41%	2.0	マイティ150R、2.5%	9.4	10.3	16.2	16.4
28	S-00	懸濁型特殊シリカ	0%	2.5	マイティ150R、0.7%	3.7	5.4	18.8	18.3

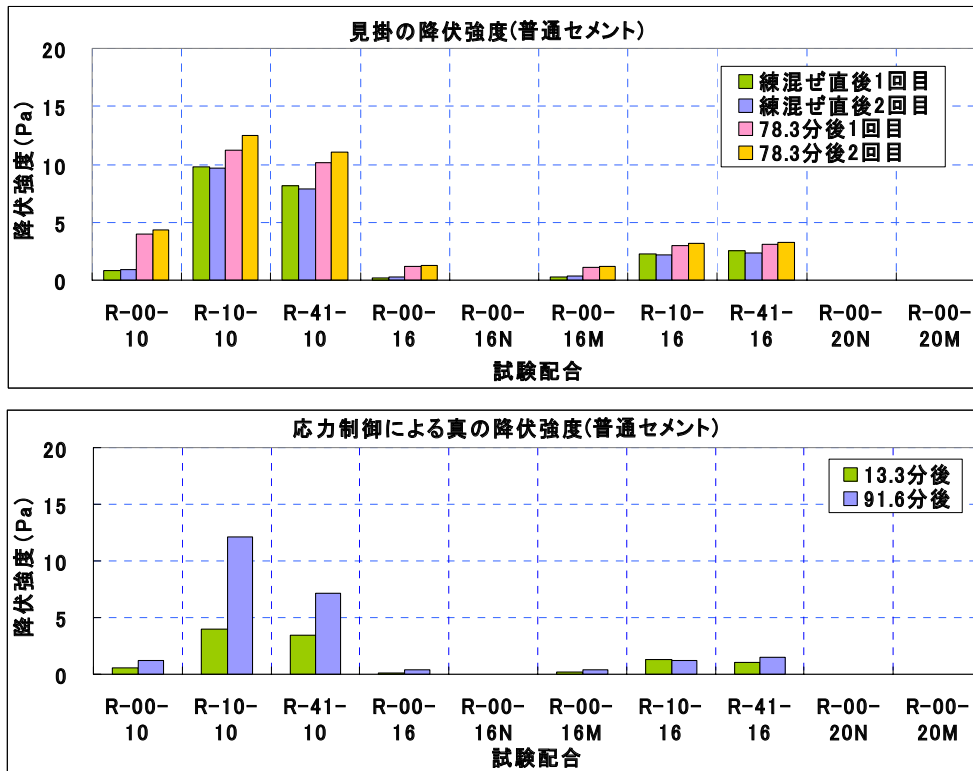


図 4.2-9 降伏強度の比較 (普通セメント)

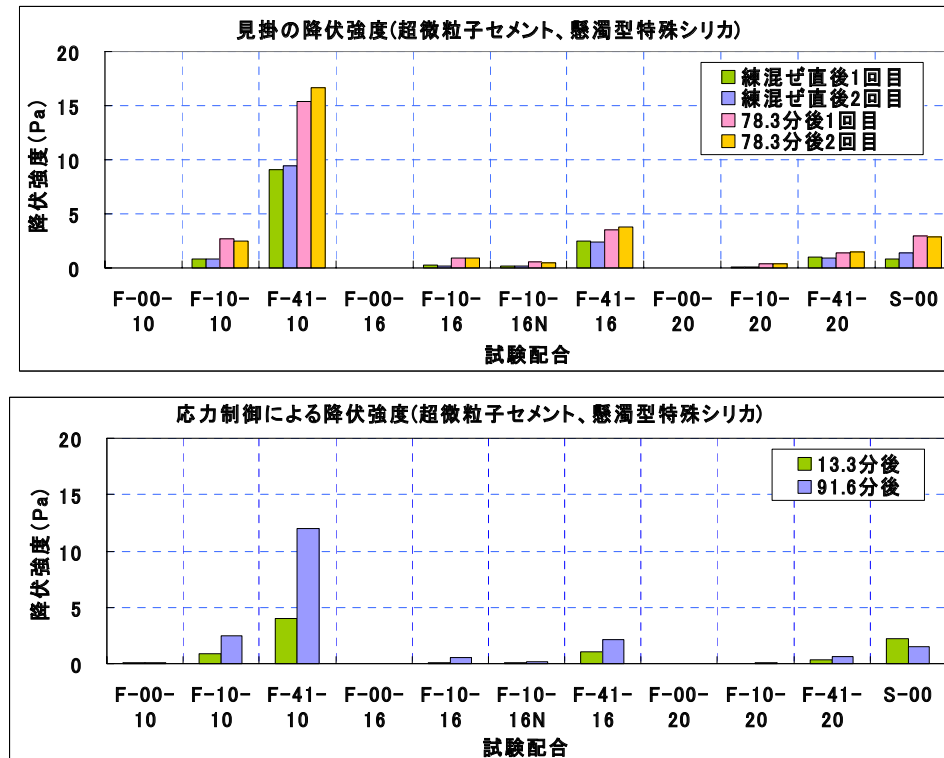


図 4.2-10 降伏強度の比較 (超微粒子セメント、懸濁型特殊シリカ)

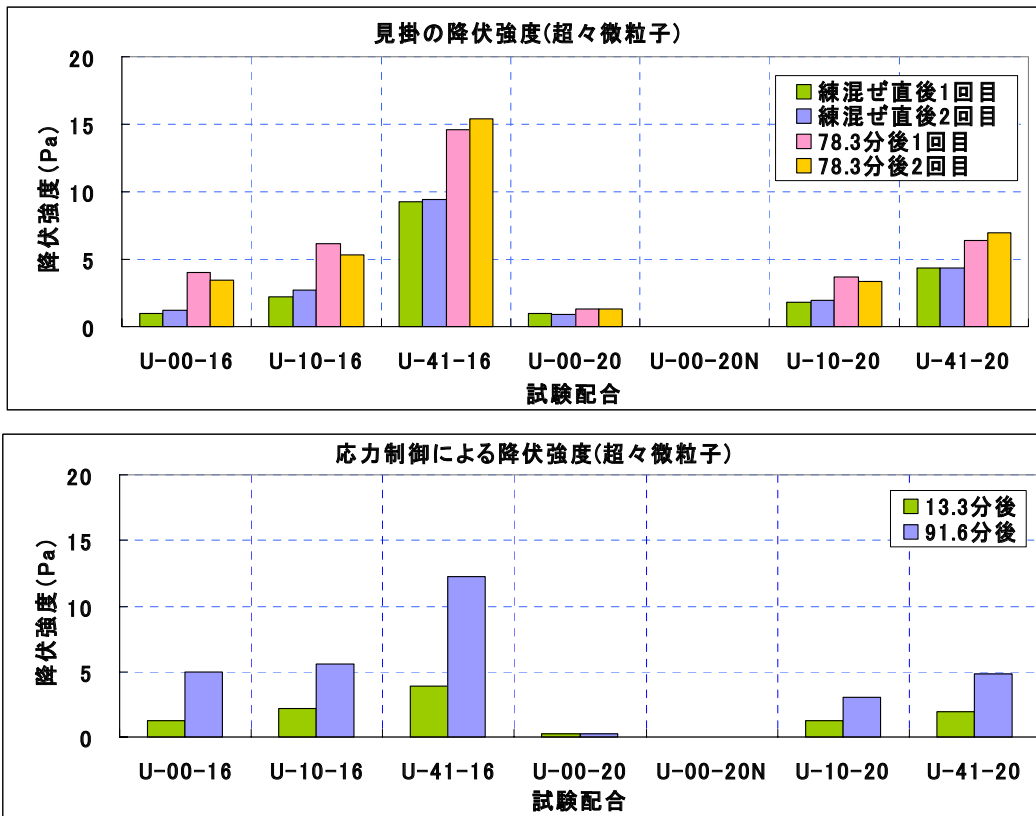


図 4.2-11 降伏強度の比較 (超々微粒子セメント)

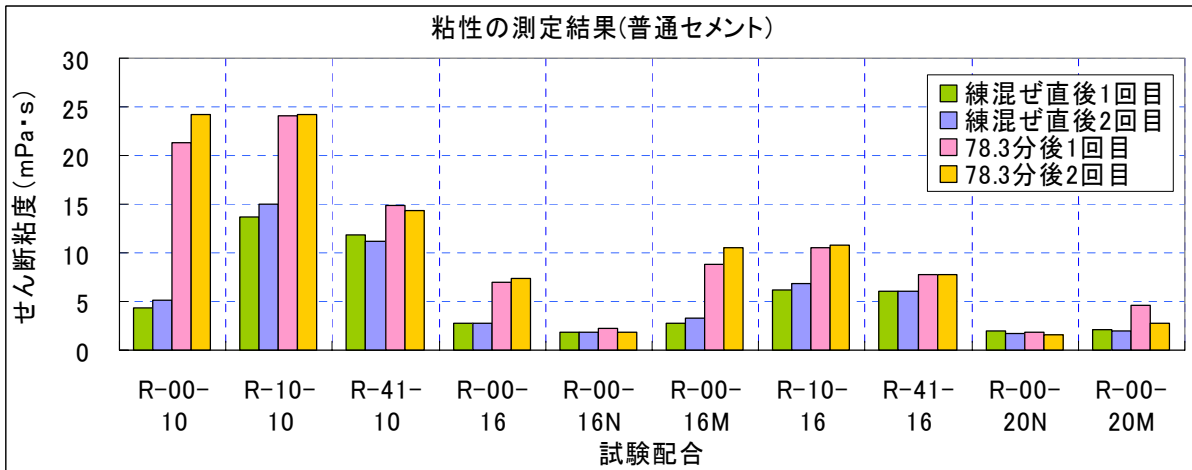


図 4.2-12 塑性粘度の比較 (普通セメント)

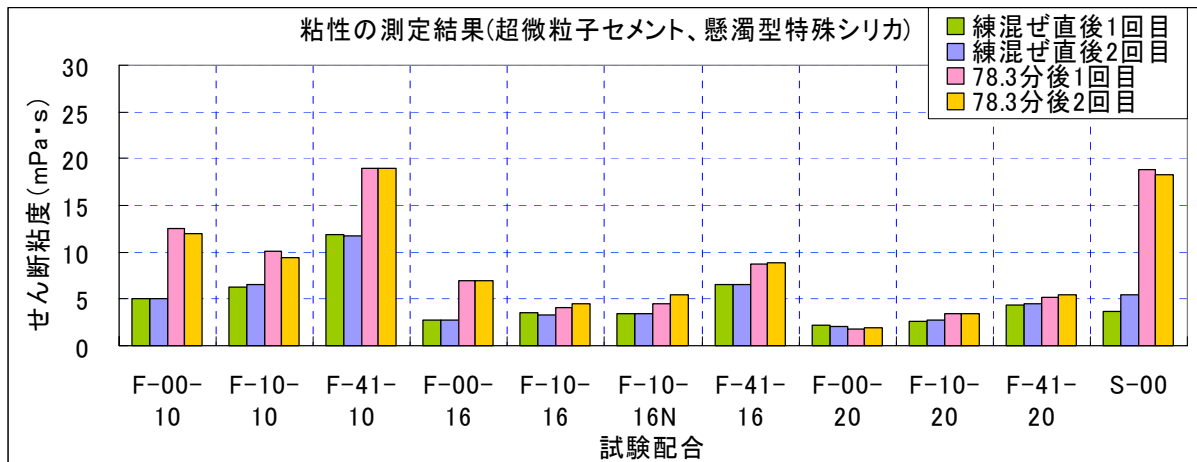


図 4.2-13 塑性粘度の比較 (超微粒子セメント、懸濁型特殊シリカ)

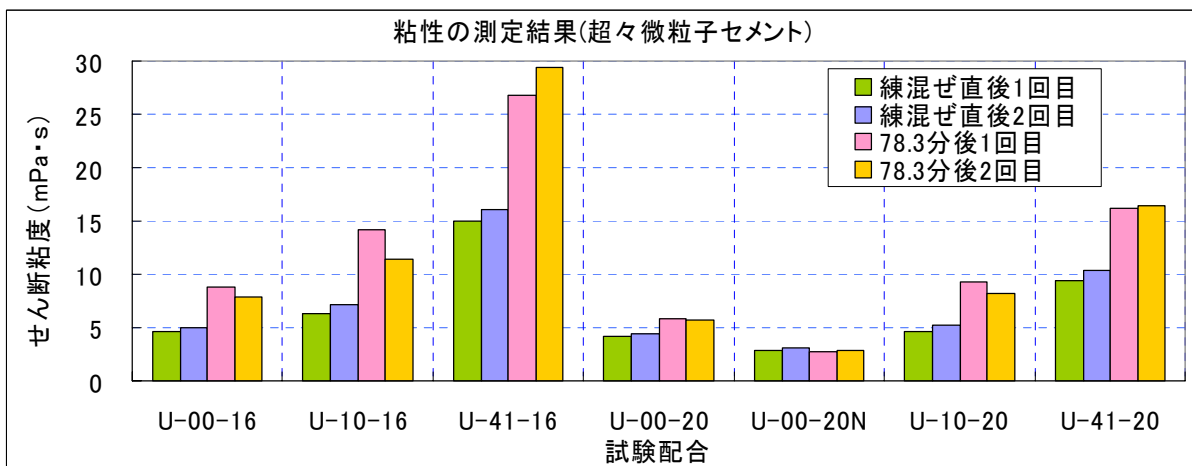


図 4.2-14 塑性粘度の比較 (超々微粒子セメント)

(2) ベントナイト

(i) 流動曲線

表 4.2-8にクニゲル V1 の流動曲線を、表 4.2-9にクニピア F の流動曲線を示す。また、ベントナイト及び溶媒の違いによる流動曲線の違いを確認するために、これらを図 4.2-15にまとめて示す。

表 4.2-8より、クニゲル V1 に蒸留水を溶媒として用いた場合は、準粘性流動 (図 4.2-1) としての挙動を示していることがわかる。また、アップカーブの方がダウンカーブより高いことよりチクソトロピー性を示しており、特に 1 時間微小ひずみ (1 %) 载荷した後に測定した 78.3 分後の測定結果にこの傾向が強く見られており、ベントナイト粒子が緩やかに凝集したものと思われる。一方、溶媒として塩水とエタノールを用いた場合はビンガム流動的な挙動を示しており、チクソトロピー性は見られない。

表 4.2-9より、クニピア F の場合は、全ての溶媒に対してビンガム流動的な挙動を示しており、降伏強度を有することがわかる。

図 4.2-15より、溶媒として塩水とエタノールを用いた場合は、液個比を 4 まで落としている (蒸留水の場合、クニゲル V1 : 10、クニピア F : 15) にもかかわらず、粘性が大きく低下していることがわかる。特に、この違いはモンモリロナイト含有量の多いクニピア F において顕著に現れている。

(ii) 塑性粘度と降伏強度

応力制御により算定した降伏強度とビンガム流体を仮定して算出した見掛の降伏強度を比較して表 4.2-10及び表 4.2-11に示す (R-1 に関しては、明らかにビンガム流動とは異なるが、比較のためビンガム流動と仮定した結果を示す)。また、ビンガム流体と仮定した場合の塑性粘度を表 4.2-12及び図 4.2-16にまとめて示す。

表 4.2-11より、見掛の降伏値は真の降伏値より大幅に小さいことがわかる。また、降伏強度の時間変化は蒸留水と塩水に関しては見られないが、エタノールを溶媒とした場合は増加していることがわかる。

図 4.2-16より、塑性粘性に関しても蒸留水と塩水に関して時間変化はほとんど見られないが、エタノールを溶媒とした場合は増加していることがわかる。

表 4.2-8 溶媒の違いによる流動曲線への影響 (クニゲルV1、1回目測定結果)

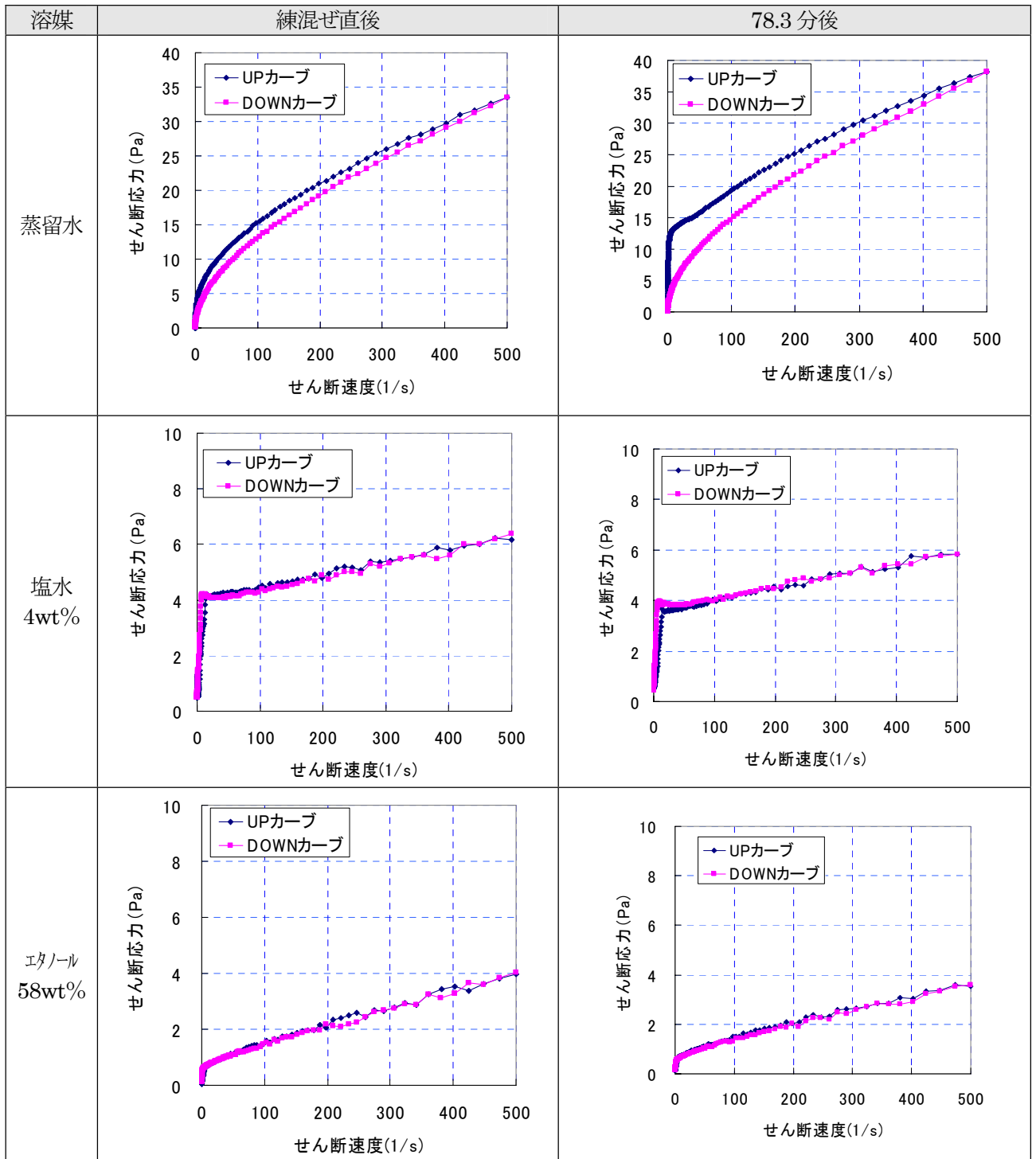
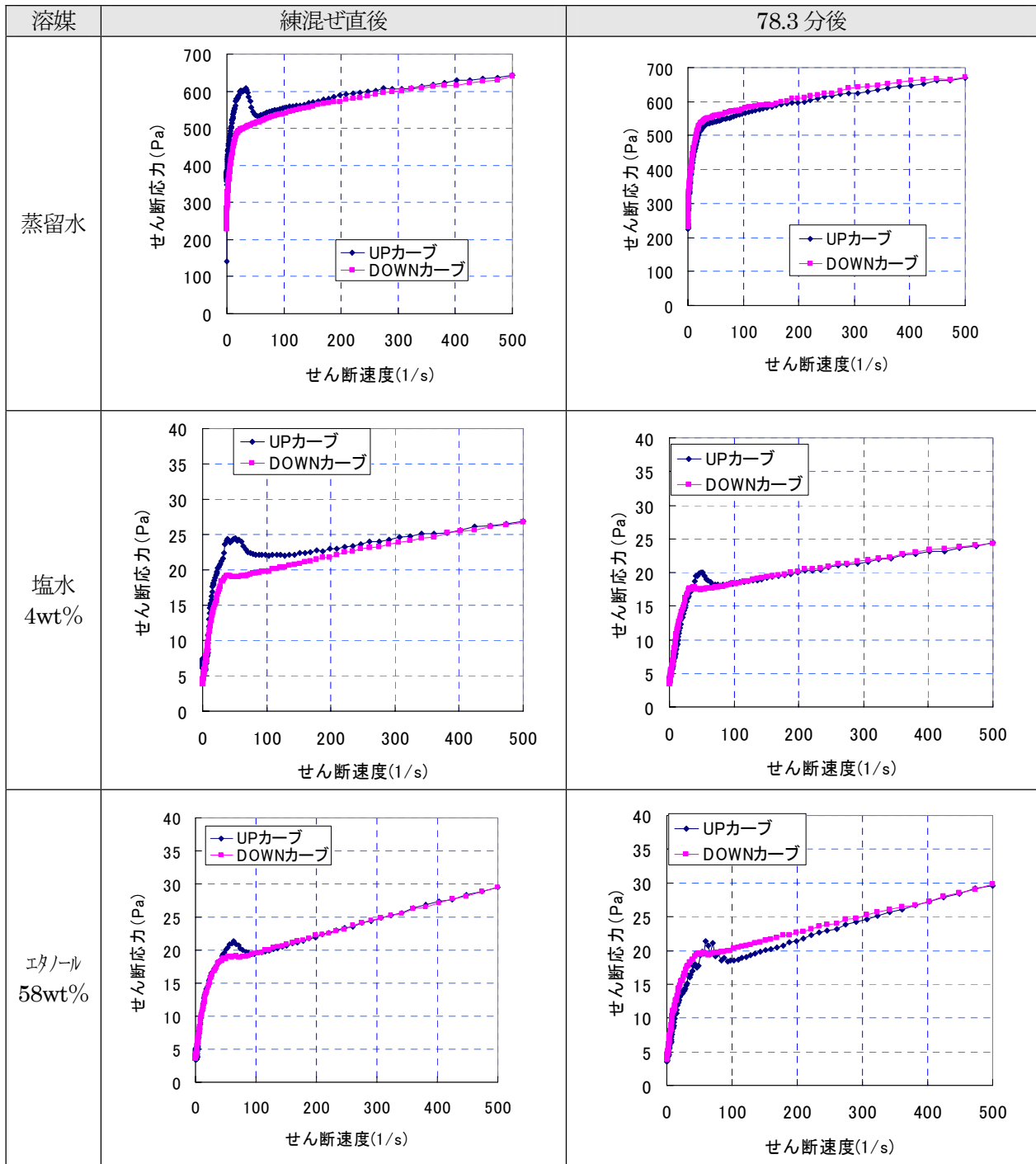


表 4.2-9 溶媒の違いによる流動曲線への影響（クニピアF、1回目測定結果）



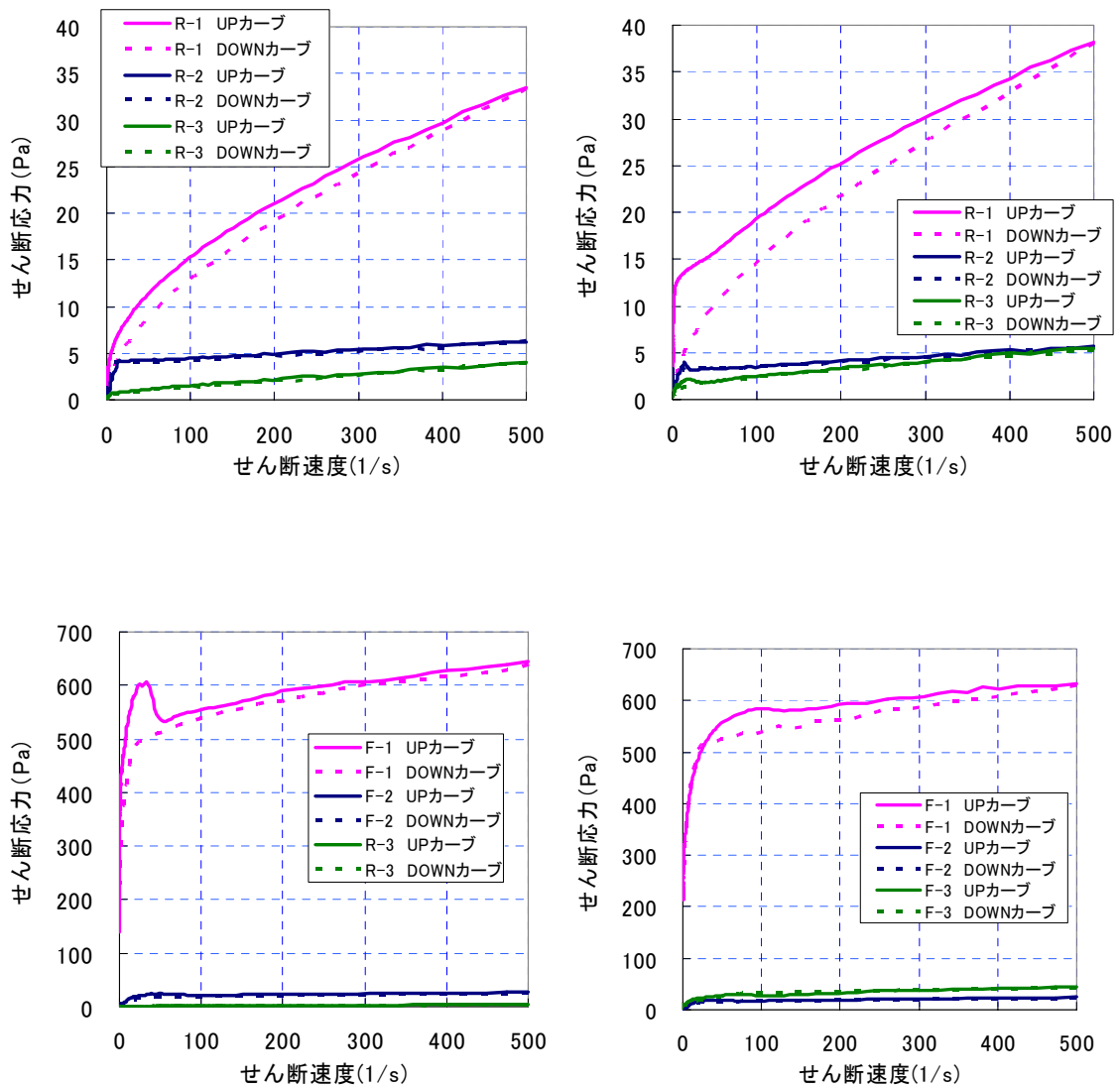


図 4.2-15 ベントナイト種類及び溶媒の違いによる影響 (1回目測定時)

(左上図: クニゲル V1 (練混ぜ直後)、右上図: クニゲル V1 (78.3分後)

左下図: クニピア F (練混ぜ直後)、右上図: クニピア F (78.3分後))

表 4.2-10 降伏強度の測定結果（ベントナイトの場合）

		試験配合	液/固比	溶媒	分散剤	降伏値 (Pa)					
						応力制御による測定 (真の降伏値)		見掛の降伏値 (ビンガム流体を仮定)			
								練混ぜ直後		78.3分後	
						13.3分後	91.6分後	1回目	2回目	1回目	2回目
1	普通粒径 (クニゲルV1)	R-1(10)	10	蒸留水	無添加	0.1	0.1	7.6	7.5	8.6	8.3
2		R-2(4)	4	NaCl溶液4%	無添加	0.6	0.7	3.8	3.6	3.1	3.0
3		R-3(4)	4	エタノール58%	無添加	0.2	0.4	0.8	0.8	1.7	1.8
4	超微粒 (クニピアF)	F-1(15)	15	蒸留水	無添加	248.3	252.6	512.2	551.5	518.9	502.5
5		F-2(4)	4	NaCl溶液4%	無添加	3.4	3.4	18.1	16.8	17.0	16.9
6		F-3(4)	4	エタノール58%	無添加	4.0	7.3	17.2	17.9	30.2	33.7

表 4.2-11 降伏強度の比較

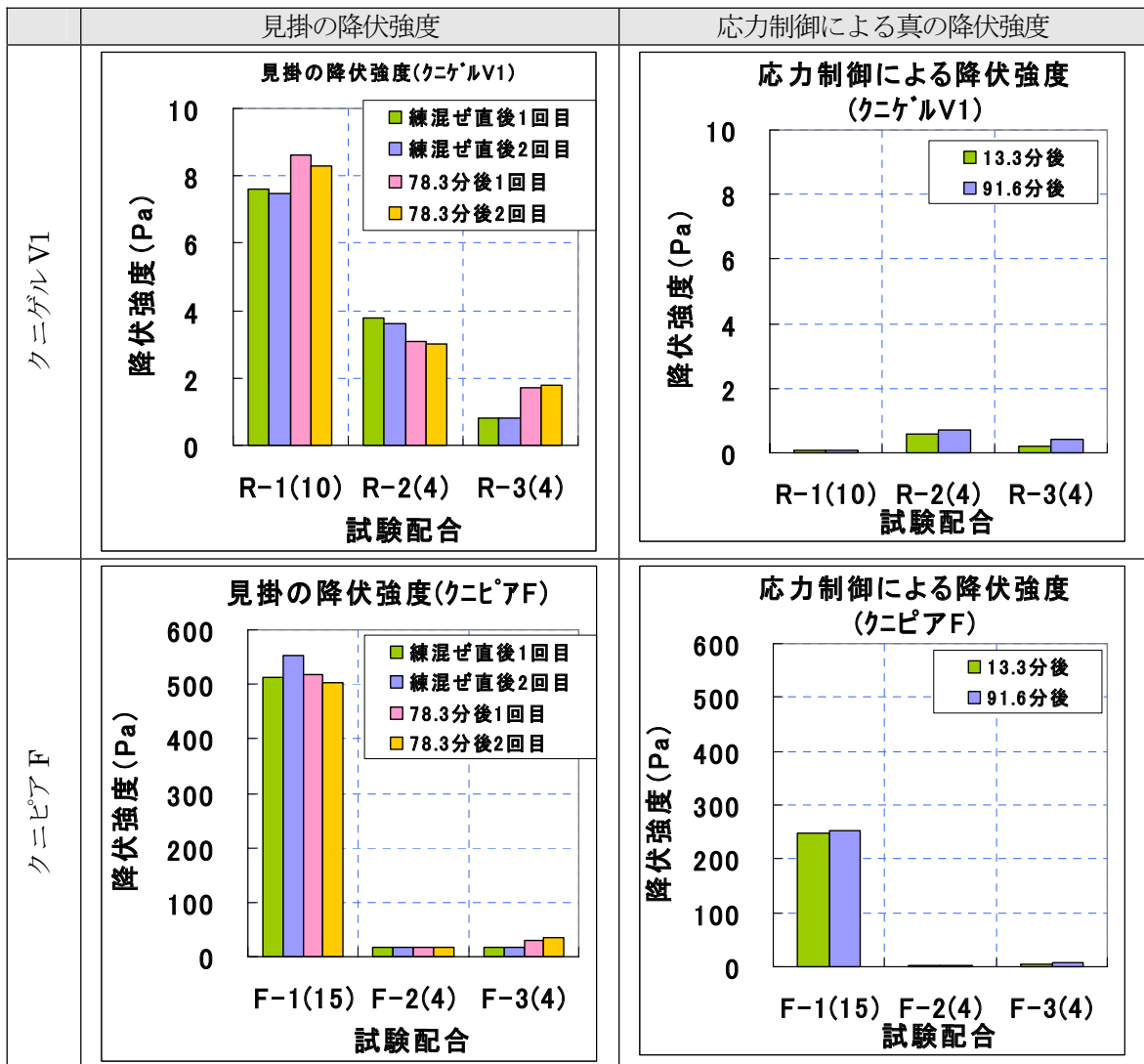


表 4.2-12 粘性の測定結果（ペントナイト）

		試験配合	液/固比	溶媒	分散剤	せん断粘度 (mPa・s)			
						練混ぜ直後		78.3分後	
						1回目	2回目	1回目	2回目
1	普通粒径 (クニゲルV1)	R-1(10)	10	蒸留水	無添加	54.5	55.6	61.9	60.1
2		R-2(4)	4	NaCl溶液4%	無添加	4.8	4.6	5.2	4.9
3		R-3(4)	4	エタノール58%	無添加	6.4	5.7	7.7	7.6
4	超微粒 (クニピアF)	F-1(15)	15	蒸留水	無添加	275.9	272.0	227.7	198.2
5		F-2(4)	4	NaCl溶液4%	無添加	18.2	16.1	16.1	15.9
6		F-3(4)	4	エタノール58%	無添加	24.6	23.6	32.0	32.7

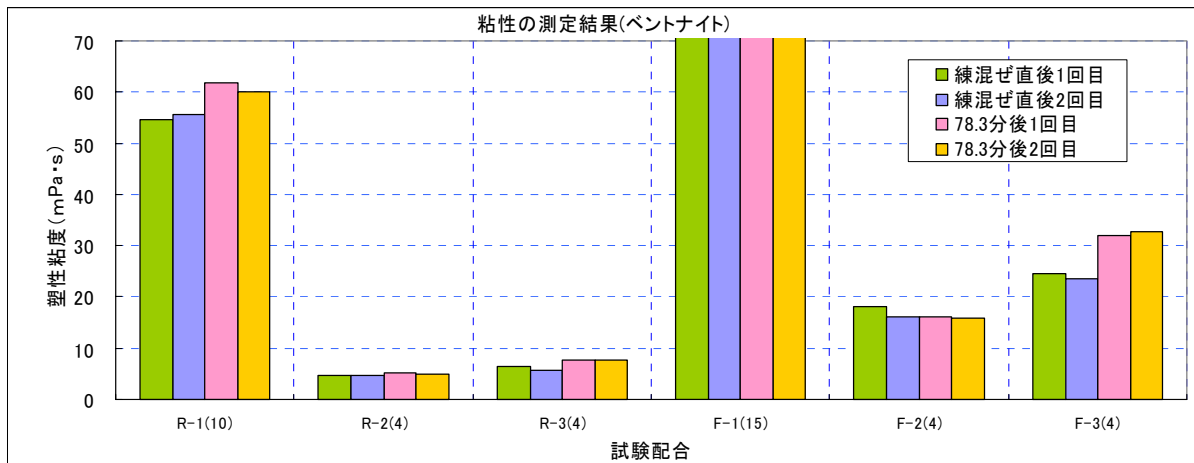


図 4.2-16 粘性の比較（ビンガム流体と仮定した場合）

4.3 考察

4.3.1 セメントグラウト

セメントグラウトの粘性特性を測定した結果、以下のことが判明した。

- ◆ 流動曲線
 - ・ 超微粒子セメント：グラウトエイドを添加しない場合は、水セメント比を 1.0 とした高濃度スラリーの場合でも、流動曲線の形状は降伏強度を有しないニュートン流体と見なせる。また、水セメント比を 1.6、2.0 と高くした場合は、せん断粘性が低下する。また、時間依存性に関しては、78.3 分経過段階でも、せん断粘性が増加したが降伏強度は認められず、ニュートン流動的挙動を示した。
 - ・ 高炉セメント、普通ポルトランドセメント：分散剤を使用した場合はニュートン流体と見なせるが、分散剤を使用しない場合は、降伏強度を有するビンガム流動的な挙動を示す。
 - ・ 超々微粒子セメント：分散剤を 5% 添加し水セメント比を 2.0 としたケースを除けば、今回測定した水セメント比の範囲 (1.6、2.0) では、降伏強度を有するビンガム流体となる。

- ◆ 降伏強度と塑性粘度
 - ・ 降伏強度の測定方法：ビンガム流体と仮定して算出した降伏強度は、応力制御で計測した真の降伏強度よりやや高い値を示すが、その差は小さい。
 - ・ 水セメント比の影響：水セメント比を低くすると、降伏強度とせん断粘性の両者が増加する。

- ◆ グラウトエイドの影響：グラウトエイドを添加した場合は、いずれのセメントに対しても降伏強度を有するビンガム流体となり、その降伏強度はグラウトエイドを多量 (41%) に添加した場合、大幅に上昇する。これは、シリカフュームとセメントが凝集していることに起因しているものと考えられる。このため、41% 添加した場合については、新たな分散剤及び拡散方法の開発が必要であると言える。

- ◆ 超々微粒子セメントの有効性：超微粒子セメントに比べると総じて降伏強度と粘性が高い。このため、水セメント比 1.6 の超微粒子セメントと同等の粘性特性とするためには、超々微粒子セメントの水セメントを 2.0 に増加させ、さらに分散剤を 5.0% 添加する必要がある。例えば図 4.3-1 に示すように、水セメント比 1.6 の超微粒子セメントスラリー (F-00-16) はニュートン流体であるが、水セメント比 2.0 の超々微粒子セメントスラリー (U-00-20) は見掛の降伏強度を有しており、U-00-20 の分散剤添加量を 5.0% に増加させた U-00-20N が F-00-16 とほぼ同じ粘性特性を示す結果となっている。しかしながら、U-00-20N は粘性特性以外の材料物性 (特に、強度発現) がグラウト材として適切でないことが確認されている。このため、超々微粒子セメントを使用する場合についても、新たな拡散方法の開発が必要であると言える。

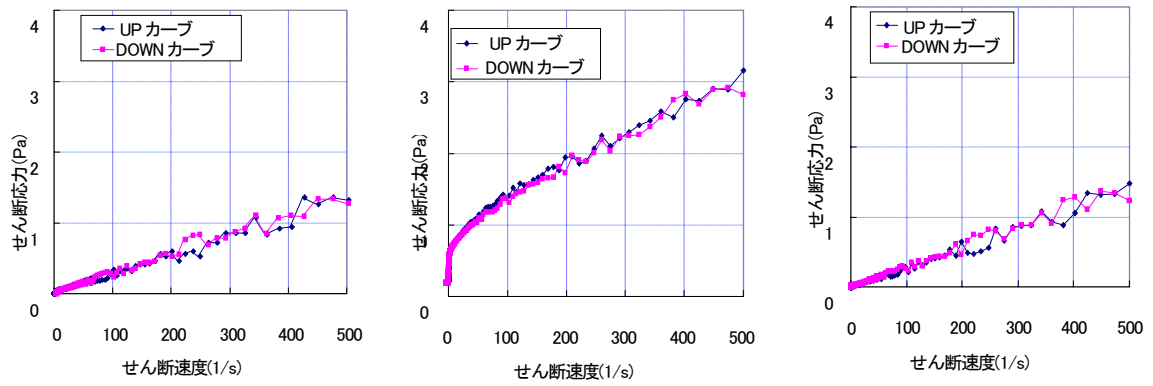


図 4.3-1 超微粒子セメントと超々微粒子セメントの流動曲線
 (左図 : F-00-16、中図 : U-00-20、右図 : U-00-20N)

4.3.2 ベントナイトグラウト

ベントナイトグラウトの粘性特性を測定した結果、以下のことが判明した。

- ◆ ベントナイト材料の違いによる影響：超微粒ベントナイトであるクニピア F の粘性は、クニゲル V1 に比べて大幅に増加する。これはセメントと異なり、細粒化による反応性の増加に加えて、モンモリロナイト含有量の違い（さらには Na/Ca 比率）に起因しているものと考えられる。
- ◆ 溶媒の影響
 - ・ 蒸留水を溶媒とした場合と、塩水、エタノールを溶媒とした場合では流動曲線の傾向は大きく異なり、塩水、エタノールを溶媒とした場合は、セメント系でグラウトエイドを添加した場合と同様にビンガム流体と見なせる。一方、蒸留水とした場合は、擬塑性流体的挙動を示しており、真の降伏強度はビンガム流体と仮定して算出した見掛の降伏強度に比べて大幅に低下する。
 - ・ 蒸留水、塩水を溶媒とした場合は、粘性は経時的には変化しないが、エタノールを使用した場合は、粘性、降伏強度ともに時間の経過とともに増大する。この現象のメカニズム等については、今後の詳細な研究が必要である。
 - ・ 塩水やエタノールを溶媒とする粘性低減効果は大きく、特に超微粒ベントナイトであるクニピア F の場合においてこの傾向が大きい。この結果、図 4.3-2 に示すように液固比 4:1 の場合、セメント系のグラウトエイド 41% 添加の場合とほぼ同程度まで粘性が低下する。

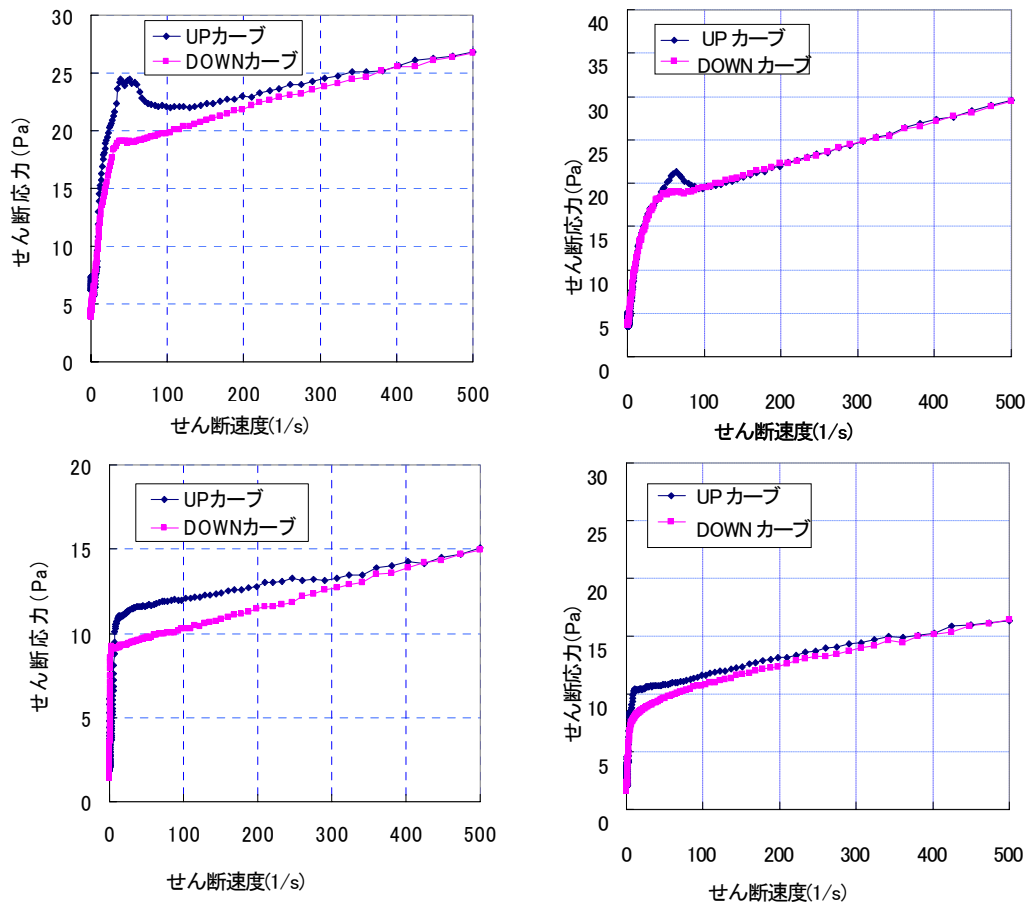


図 4.3-2 ベントナイトとセメント流動曲線の比較

(左上：クニピアF+塩水、右上：クニピアF+エタノール、
 左下：超微粒子セメント：F-41-10、右下：超々微粒子セメント：U-41-16)

4 章参考文献

- 1) 延藤尊、見掛信一郎：瑞浪超深地層研究所におけるグラウト技術の開発及び高度化、日本原子力研究開発機構、JAEA-Research 2008-037（2008）

5. 高圧目詰まり試験の実施

5.1 試験の目的

単一亀裂を対象に、以下をパラメーターとした目詰まり試験を実施し、単一亀裂における亀裂入り口の目詰まり特性とグラウト材料物性及び注入圧力との関係を調べる。

- ・ グラウト材の粒径分布
- ・ シリカフェュームの有無及び添加量
- ・ 水セメント比
- ・ 注入圧力

5.2 試験フロー

まず、注入圧力を 1MPa に固定した低圧による目詰まり試験（以下、低圧加圧試験）を実施する（図 5.2-2参照）。この試験では全試験配合について 4 種類のスリットを用いて目詰まり試験を実施することにより、目詰まりが生じるスリット開口幅を確認する。目詰まりの判定方法としては 5.3.7 項に示した必要グラウト通過量との比率により判定する。

次に、各配合に対して選定したスリット開口幅に対して注入圧力を段階的に上昇させる高圧連続加圧試験（以下、高圧加圧試験）を実施する（図 5.2-3参照）。本試験により、圧力を高めることにより通過グラウト量がどの程度変化するかを調べる。

最後に 4 章で実施した高粘性グラウト材料の粘性特性の検討結果を踏まえて、目詰まり試験結果を分析し、亀裂入り口の目詰まり現象について考察を加える。

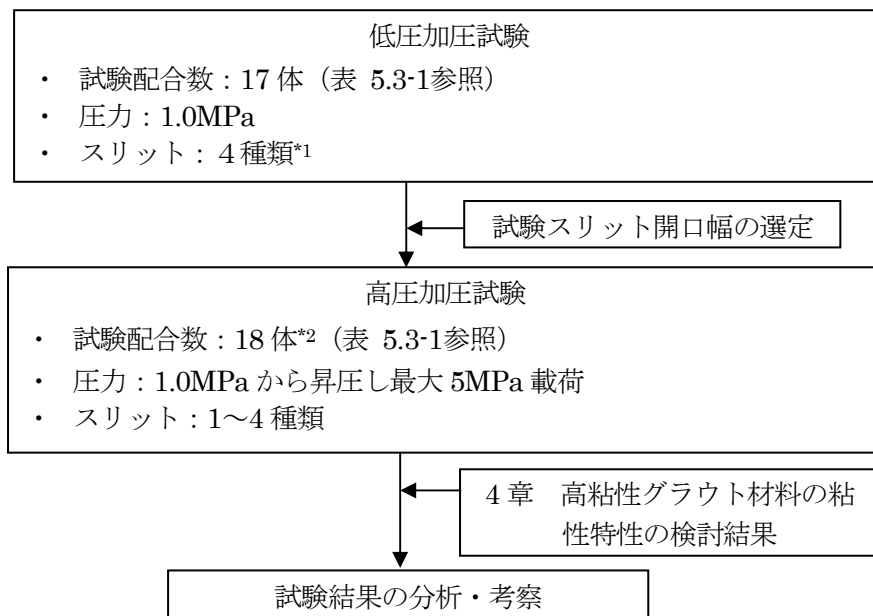


図 5.2-1 目詰まり試験フロー

*1: スリット開口幅 100、50 μ m から試験を実施し、100 μ m でも十分な注入が出来ない場合は、150 μ m、75 μ m の順番で試験を実施する。逆に、50 μ m で多少（2%以上）とも注入が出来た場合は、75 μ m、25 μ m の順番で試験を実施する。

*2: F-00-20 を追加する。

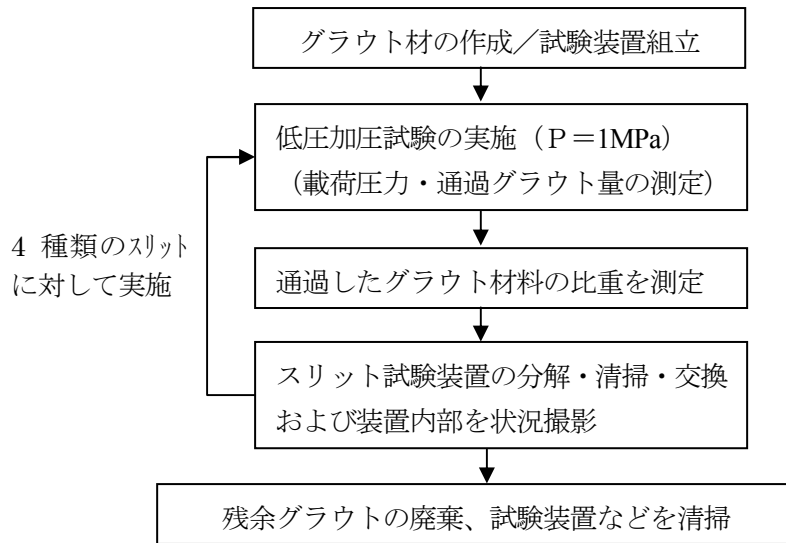


図 5.2-2 低圧加圧試験フロー

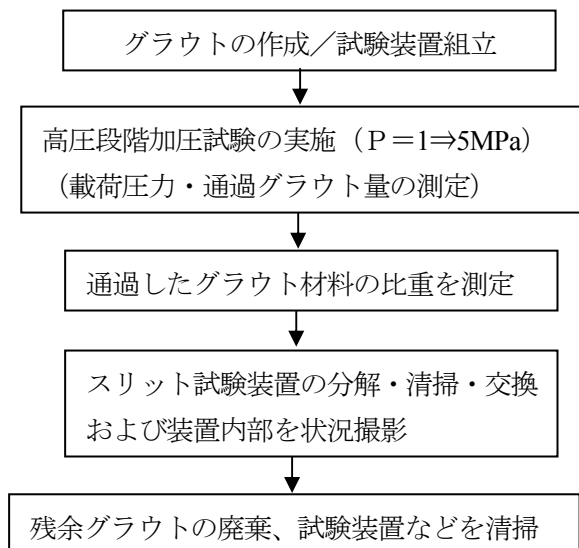


図 5.2-3 高圧加圧試験フロー

5.3 試験方法

5.3.1 使用材料

基本物性確認試験で選定された以下の材料を使用する。

- 主材
 - ・ 普通粒径：B社製高炉セメントB種、普通ポルトランドセメント
 - ・ 超微粒粒径：A社製超微粒子セメント、D社製懸濁型特殊シリカ
 - ・ 超々微粒粒径：A社製超々微粒子セメント
- 分散剤
 - ・ ナフタレン系
 - ・ ポリカルボン酸系
- 添加材：シリカフェームスラリー（エルケム社製グラウトエイド）

5.3.2 試験配合

試験配合を表 5.3-1に示す。

表 5.3-1 試験配合

試験配合	セメント	グラウトエイド [®] 添加量	分散剤		水セメント比
			種類	添加量	
R-00-16	普通高炉セメント	0%	無添加		1.6
R-00-16N	普通高炉セメント	0%	ポリカル	1%	1.6
R-00-16M	普通ポルトランドセメント	0%	ポリカル	1%	1.6
R-10-16	普通高炉セメント	10%	無添加		1.6
R-00-20	普通高炉セメント	0%	ポリカル	1%	2.0
F-00-10	超微粒子セメント	0%	ポリカル	1%	1.0
F-10-10	超微粒子セメント	10%	ポリカル	1%	1.0
F-41-10	超微粒子セメント	41%	ナフタレン	2.5%	1.0
F-00-16	超微粒子セメント	0%	ポリカル	1%	1.6
F-10-16	超微粒子セメント	10%	ポリカル	1%	1.6
F-41-16	超微粒子セメント	41%	ナフタレン	2.5%	1.6
F-10-20*	超微粒子セメント	0%	ポリカル	1%	2.0
F-10-20	超微粒子セメント	10%	ポリカル	1%	2.0
F-41-20	超微粒子セメント	41%	ナフタレン	2.5%	2.0
U-00-20	超々微粒子	0%	ポリカル	1%	2.0
U-00-20N	超々微粒子	0%	ポリカル	1%	2.0
U-10-20	超々微粒子	10%	ポリカル	1%	2.0
S-00	懸濁型特殊シリカ UFA	0%	ナフタレン	0.7%	2.5

*高圧加圧試験のみ実施

5.3.3 測定項目

以下の項目を測定する。

- ・ 载荷圧力：電磁流量計により経時変化を測定
- ・ 通過グラウト量：電子秤により重量の経時変化を測定
- ・ 通過したグラウト材料の比重：メスシリンダーと電子秤により試験終了時点で容積と重量を測定し間接的に算出
- ・ グラウト通過状況、及びスリット試験装置内部の状況：デジタルカメラにより撮影

5.3.4 スリット試験装置

スリット試験装置は、鋼製のスリット入り鋼板をボルトでスリット無し鋼板により挟み込む形式としている（図 5.3-1参照）。

グラウト材料の流れは、流向がスリット入り口で90度方向に変化しており、より実際の注入状況に近い構造となっている（図 5.3-2）。さらにスリット入り鋼板を複数枚はさみこむことで、将来的には、複数亀裂を模擬することが可能となる。

また、圧力作用時にスリット開口幅が開かないようにボルトにプレストレスをかけることが可能であるため（ボルト締め付け時にはトルク管理を実施、トルク管理値：117.7N・m）、高圧化においても正確なスリット開口幅を確保することが可能となる。

作成した試験装置のスリット開口幅については、日本品質保証協会による電子マイクロメータを用いた校正を実施している（図 5.3-3参照）。25、50、75、100、150 μm を目標値として切削したスリット開口幅を測定した校正結果は、表 5.3-2に示す値であった。

表 5.3-2 スリット開口幅の校正結果

呼び名 (目標としたスリット幅)	25 μm	50 μm	75 μm	100 μm	150 μm
校正值 (実際のスリット幅)	28.6 μm	57.3 μm	78.9 μm	109.6 μm	156.0 μm

また、試験実施時には以下の手順で試験装置を組立て、目詰まり試験を実施するものとする（図 5.3-4参照）。

- ・ 所定のトルクを载荷してボルトを締め付けて試験装置を組み立てる
- ・ グラウト注入前に注水した水が漏れるのを防止するために試験装置のスリット外側に粘着テープを巻く
- ・ 試験装置内を水（約 129cc）で充填する（グラウト注入孔内が地下水により浸潤していることを模擬するため）

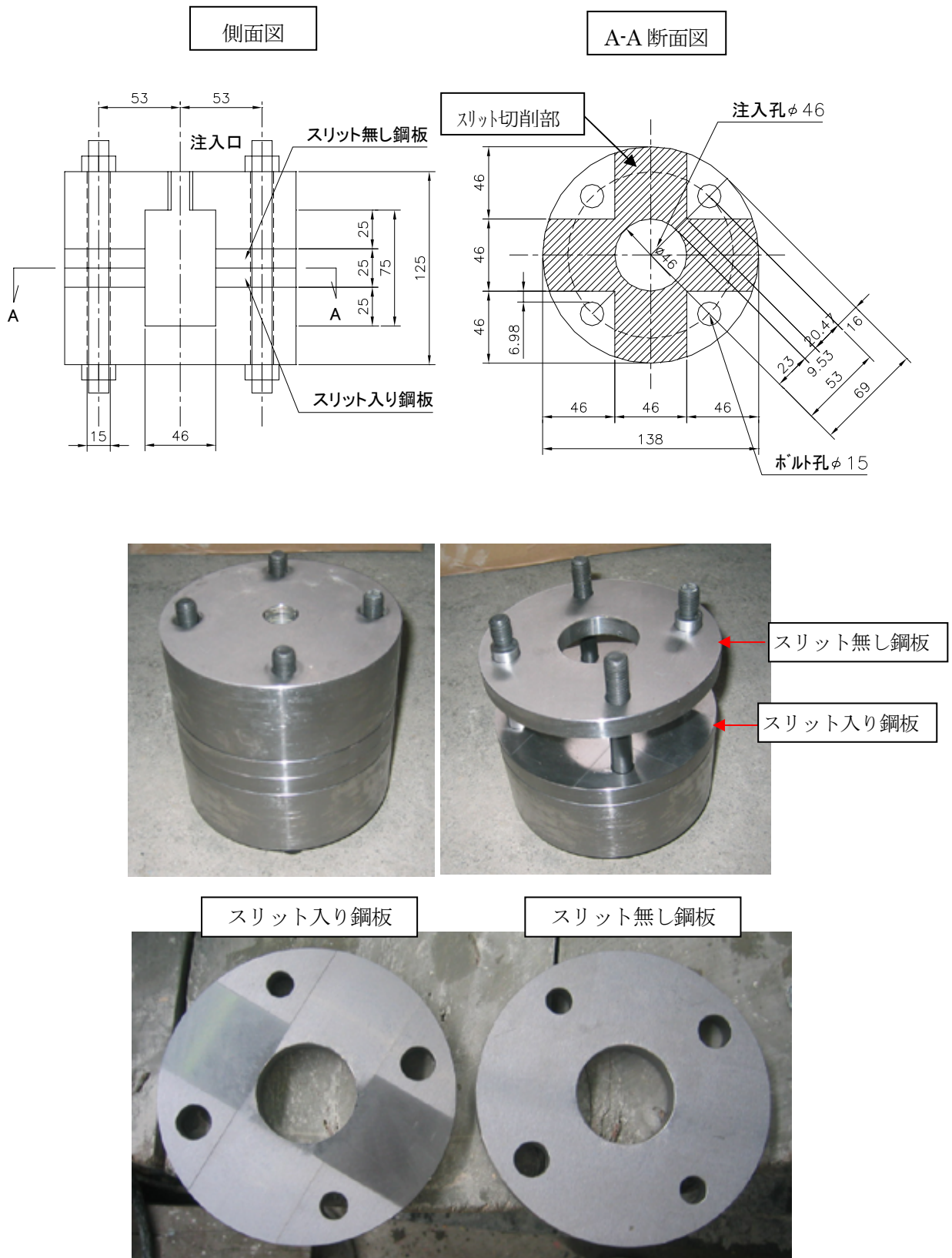
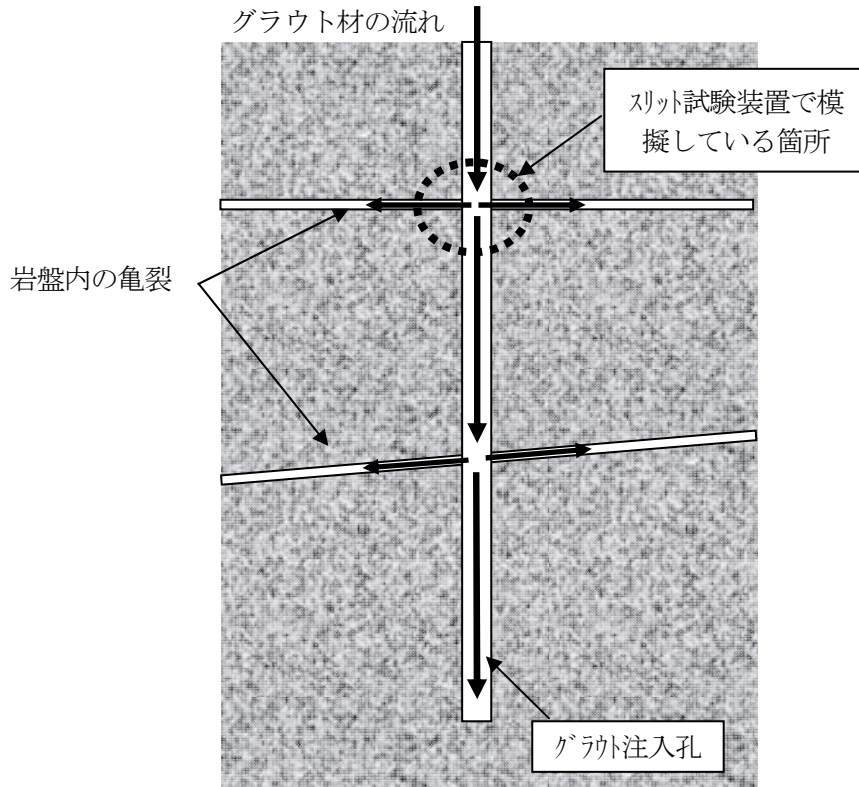


図 5.3-1 スリット試験装置

実際のグラウト施工における典型的なグラウト材の流れ



今回の試験装置におけるグラウト材の流れ

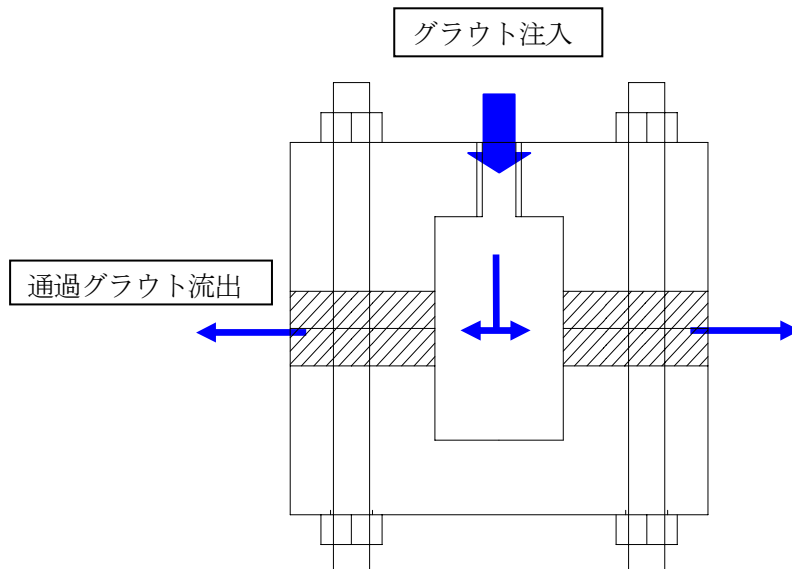


図 5.3-2 実際のグラウト施工と試験装置におけるグラウト材の流れ

JQA

総 数 2頁の1頁
証明書番号 160-62858-2

校正証明書

依頼者 株式会社 丸東製作所
住所 東京都江東区白河 2-15-4
品名 高压グラウト注入装置用スリット板
数量 1個
型式又は性能
製造番号 No-2 (管理番号)
製造者 株式会社 丸東製作所
校正項目 段差寸法
校正方法 JQA 校正要領書 (段差ゲージ) に準ずる (文番番号 E314410)
校正条件 温度 20℃±0.5℃, 湿度 55%±5%
校正年月日 2006年11月8日

校正結果は別紙のとおりであることを証明します

2006年11月9日
東京都世田谷区砧1丁目21番25号
財団法人 日本品質保証機構
計量計測センター

この証明書は、国家標準とトレーサブルな標準器により校正した結果を示すものです。
事前の承認なしに、この証明書の一部のみを複製して使用することを禁じます。

この証明書は再生紙を使用しています

JQA

総 数 2頁の2頁
証明書番号 160-62858-2

校正結果

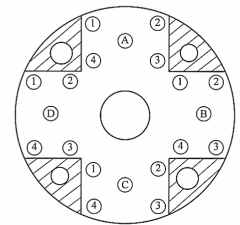
(標準温度 20℃)

測定位置	測定値 (μm)	測定位置	測定値 (μm)
A	① 28.8	C	① 26.2
	② 28.8		② 28.4
	③ 28.2		③ 28.4
	④ 27.4		④ 26.2
B	① 26.4	D	① 31.0
	② 29.0		② 27.6
	③ 31.6		③ 29.2
	④ 29.4		④ 30.8

校正精度 ±5 μm

使用した標準器等
(品名) (製造者名) (形式又は能力) (識別番号)
 電子マイクロメータ マール エキスパート 2000 N4-31-99-009

備考 1. 測定位置は下図による。
2. 基準点は下図斜線部の測定位置近傍とした。



特記事項 なし

図 5.3-3 日本品質保証機構による校正証明書
(スリット開口幅：25 μm の場合)

①試験装置の組立
(トルク管理)

②スリット部にテープを貼付

③装置内部を水で充填








図 5.3-4 目詰まり試験装置の準備方法

5.3.5 実験装置

実験装置の全体配置図を図 5.3-5に、主要機器を表 5.3-3に、試験状況を図 5.3-6に示す。

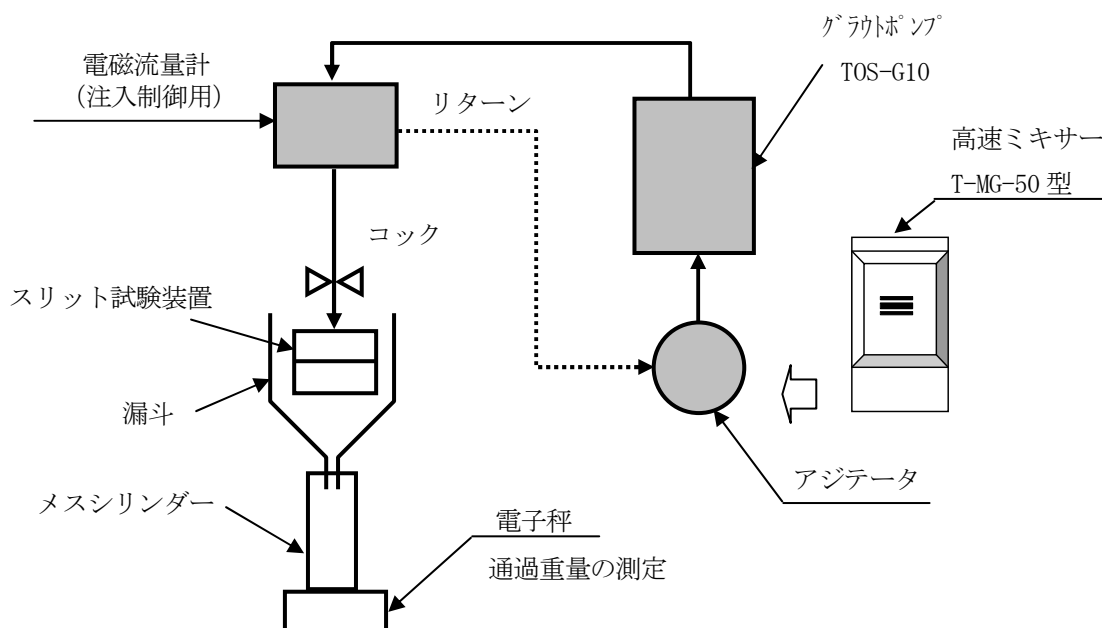


図 5.3-5 試験装置全体配置図

表 5.3-3 主要機器一覧表

機器名称	規格・能力	出力	台数	摘要
グラウトポンプ (TOS-G10)	3筒複動ピストンポンプ 最大圧力=5MPa (高圧型) q =13~130L/min	7.5 k w	1 台	圧送用 (図 5.3-7参照)
アジテータ	攪拌量 100L	2.2 k w	1 台	グラウト攪拌
電磁流量計	圧力 0~6MPa 流量 0~120ℓ /min PC にデータの転送可能	0.4 k w	1 台	注入制御用 (図 5.3-7参照)
高速ミキサー (T-MG-50)	最大回転数 1000rpm 最大攪拌量 50L	0.75 k w	1 台	グラウト練混ぜ (図 5.3-8参照)
電子秤	最小目盛 1/10g 最大 4kg PC にデータの転送可能		1 機	計量
メスシリンダー	1 L		10 本	比重測定
ノートパソコン			1 台	電子秤・電磁流量計のデータを経時的に自動記録
漏斗	透明で丈夫な材質 円筒部 φ 150 以上		1 台	スリット試験装置からのグラウトを受け止め、集める
デジタルカメラ			1 台	状況撮影

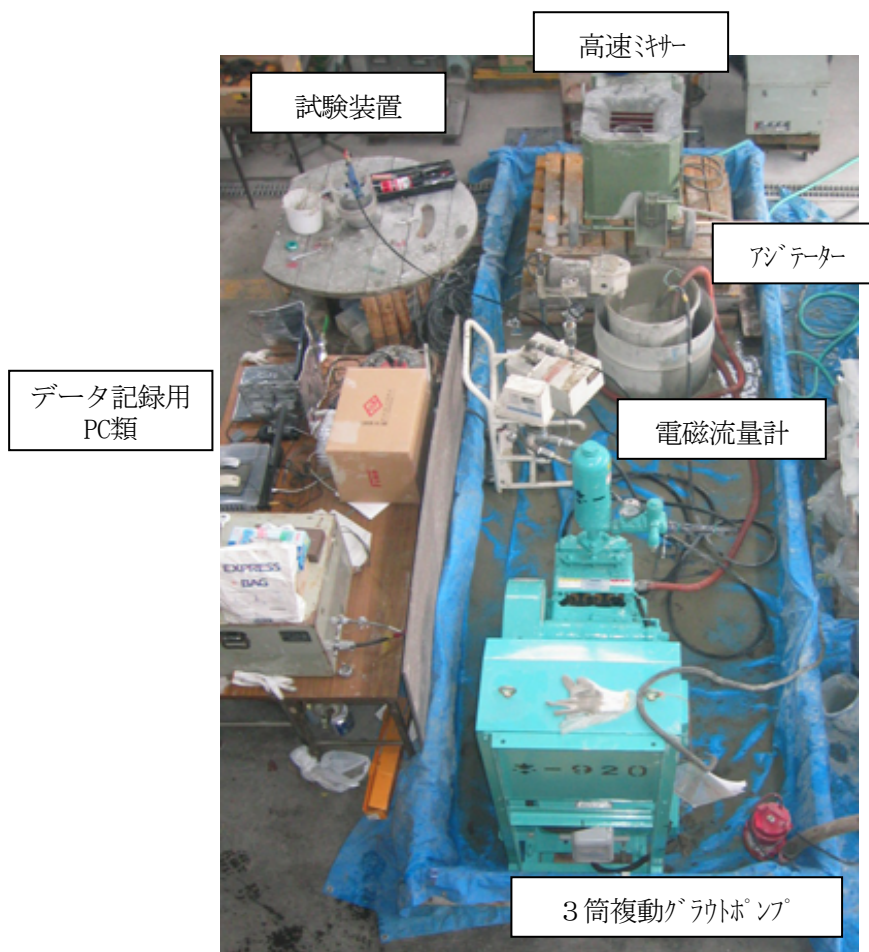


図 5.3-6 目詰まり試験状況



図 5.3-7 試験に使用したグラウト装置
(左図：グラウトポンプ、右図：電磁流量計)

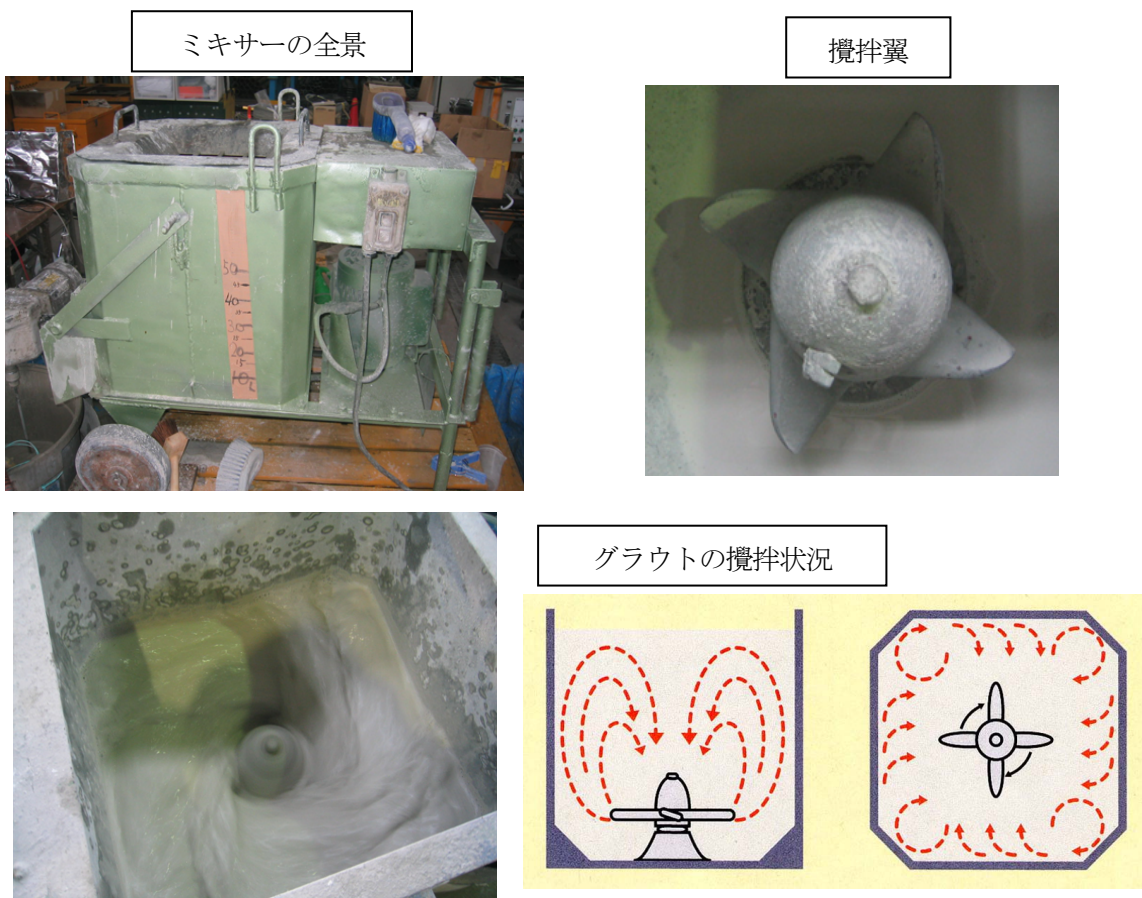


図 5.3-8 試験に使用した攪拌装置
(高速ミキサー：T-MG-50)

5.3.6 注入圧力の載荷方法

(1) 低圧加圧試験

低圧加圧試験では、基本的に5.3.7項で算定している所定のグラウト量を注入するものとする。具体的な載荷方法は、コックを閉じた状態で1MPaに圧力を設定し、その後コックを開いて1MPa（一定圧）にてグラウトを注入、所定量に達するまでグラウト注入を実施するものとする。但し、注入速度がほぼ0g/s（=0.05g/s未滿）に達した場合はすぐに試験を終了するものとする（図 5.3-9）。

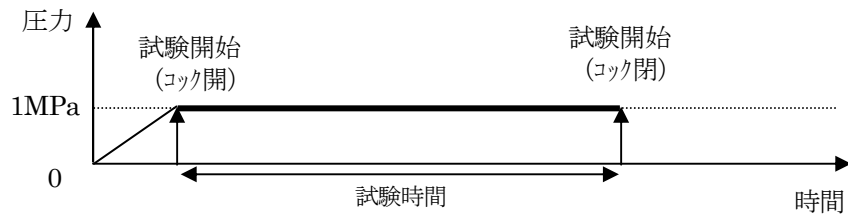


図 5.3-9 低圧加圧試験における圧力の載荷方法

(2) 高圧連続加圧試験

高圧連続加圧試験においては、図 5.3-10に示すように1、2、3、4、5MPaと注入圧を連続的に昇圧していくものとする。

具体的な載荷方法は、コックを閉じた状態で1MPaに圧力を設定し、その後コックを開いて1MPa（一定圧）にてグラウトを2分間注入し、注入圧力を2MPaに昇圧する。昇圧に伴う圧力調整時間は1分間とし、2MPaにて2分間注入した後に、次の段階の圧力に移行し、最終的には5MPaで加圧し、試験開始からの積算グラウト量が所定量に達するまで、注入を継続するものとする。但し、試験途中で所定のグラウト量が通過した場合は、注入を終了するものとする。また、注入速度がほぼ0g/s（=0.05g/s未滿）に達した場合はすぐに試験を終了するものとする。

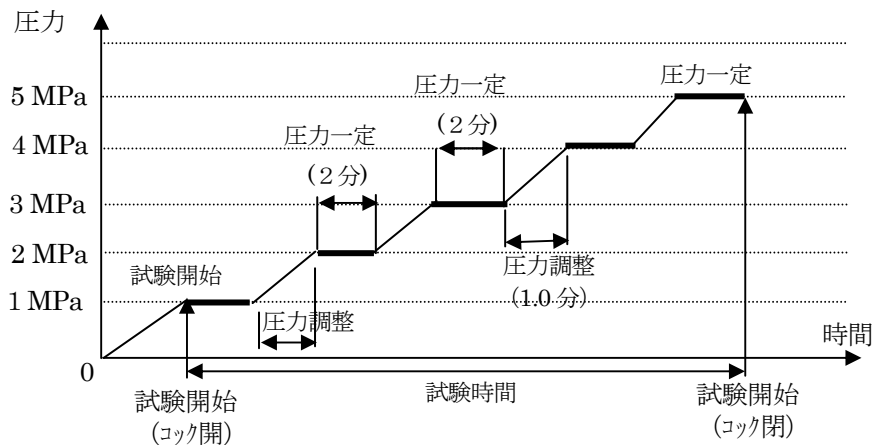


図 5.3-10 高圧加圧試験における圧力の載荷方法

5.3.7 目詰まり判定方法

亀裂内部全体をグラウト注入した粉体成分（セメント、シリカフェーム）で充填可能となるグラウト量が亀裂入り口を通過した場合、十分なグラウト注入が実施出来たものと判断する。

そこで、以下に完全な亀裂充填のための必要グラウト通過量を算定する。

(1) 単位グラウト量当りの粉体量

グラウトエイドを混入したグラウト材料の構成は表 5.3-4に示す通りとなる。

ここに、

M : 水/総粉体重量比

α : シリカフェーム粉体/総粉体重量比

ρ_w : 水の密度 (1.0g/cm³)

ρ_c : セメントの密度

ρ_{GA} : グラウトエイドスラリーの密度 (1.4 g/cm³)

ρ_{Si} : シリカフェームの密度 ($= \frac{\rho_{GA}}{2 - \rho_{GA}/\rho_w} = 2.33 \text{ g/cm}^3$)

なお、総粉体重量とはセメント粉体とシリカフェーム粉体の合計重量のことである。

表 5.3-4 グラウト材料の構成

	重量	体積
1. 水	W	W/ρ_w
2. 粉体	W/M	—
①シリカフェーム	$\alpha W/M$	$\alpha W/M/\rho_{Si}$
②セメント	$(1-\alpha) W/M$	$(1-\alpha) W/M/\rho_c$
合計	$(1+1/M) W$	$(1/\rho_w + \alpha/M/\rho_{Si} + (1-\alpha)/M/\rho_c) W$

このため、グラウト密度 ρ_G 、及び 1 L 中の粉体量 D は下式により算定される。算定結果を表 5.3-5に示す。また、最終的な改良体の水粉体比が 50%に低下すると仮定した場合の単位改良体中の粉体量を表 5.3-6に示す。

$$\rho_G = \frac{1+M}{\frac{M}{\rho_w} + \frac{\alpha}{\rho_{Si}} + \frac{1-\alpha}{\rho_c}} \quad (\text{数式 5.3-1})$$

$$D = \frac{1}{\frac{M}{\rho_w} + \frac{\alpha}{\rho_{Si}} + \frac{1-\alpha}{\rho_c}} \quad (\text{数式 5.3-2})$$

表 5.3-5 単位グラウト量当りの粉体量

セメント種類	M (w/c)	α (GA/粉体)	ρG (グラウト密度) (g/cm ³)	D (粉体量) (kg/L)
普通セメント	1.0	0.00	1.505	0.75
	1.0	0.10	1.494	0.75
	1.0	0.41	1.460	0.73
	1.6	0.00	1.348	0.52
	1.6	0.10	1.341	0.52
	1.6	0.41	1.320	0.51
	2.0	0.00	1.288	0.43
	2.0	0.10	1.283	0.43
	2.0	0.41	1.266	0.42
超微粒子セメント	1.0	0.00	1.500	0.75
	1.0	0.10	1.489	0.74
	1.0	0.41	1.457	0.73
	1.6	0.00	1.345	0.52
	1.6	0.10	1.338	0.51
	1.6	0.41	1.318	0.51
	2.0	0.00	1.286	0.43
	2.0	0.10	1.280	0.43
超々微粒子セメント	1.6	0.00	1.338	0.51
	1.6	0.10	1.332	0.51
	1.6	0.41	1.314	0.51
	2.0	0.00	1.280	0.43
	2.0	0.10	1.275	0.43
	2.0	0.41	1.261	0.42
懸濁型特殊シリカ	2.5	0.00	1.236	0.35

表 5.3-6 単位改良体中の粉体量 (水粉体比=0.5 の場合)

セメント種類	M (w/c)	α (GA/粉体)	ρG (グラウト密度) (g/cm ³)	D (粉体量) (kg/L)
普通セメント	0.5	0.00	1.810	1.21
	0.5	0.10	1.788	1.19
	0.5	0.41	1.724	1.15
超微粒子セメント	0.5	0.00	1.800	1.20
	0.5	0.10	1.780	1.19
	0.5	0.41	1.719	1.15
超々微粒子セメント	0.5	0.00	1.778	1.19
	0.5	0.10	1.760	1.17
	0.5	0.41	1.707	1.14
懸濁型特殊シリカ	0.5	0.00	1.799	1.18

(2) 必要グラウト通過量の算定

岩盤内の亀裂を、半径 R 、亀裂幅 b を有する円盤形状であると想定した場合、亀裂体積に相当する改良体により完全に亀裂を充填するためには以下の量 T (g) のグラウト材料を注入する必要がある。

$$T = \pi R^2 \times b \times \frac{D_{0.5}}{D_0} \times \rho_G \quad (\text{数式 5.3-3})$$

ここに、

b : 亀裂幅 (cm)

R : 亀裂半径 (cm)

$D_{0.5}$: 単位改良体中の粉体量 (kg/L)

D_0 : 単位グラウト材料中の粉体量 (kg/L)

ρ_G : 注入グラウト材料の密度 (g/cm^3)

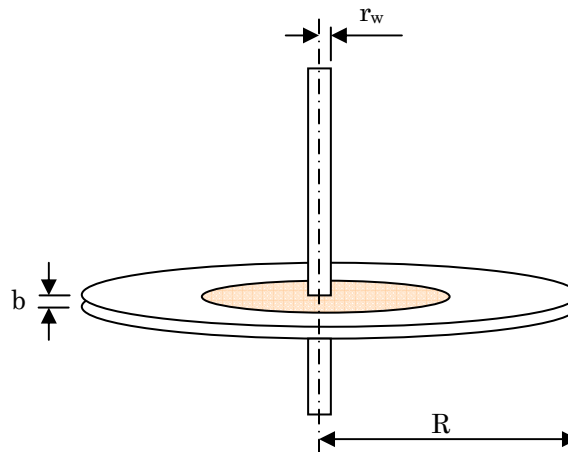


図 5.3-11 想定岩盤亀裂形状

実際の亀裂は、一般的に完全な円筒形状ではないため、上記の式で示される量ほどの注入量は必要ではないものと考えられるが、本書においては安全側を考慮して上式をそのまま適用するものとする。ここで、亀裂半径のうち 3.0m のみを 1 本の注入孔から改良するとした場合の必要グラウト注入量 T を算定した結果を表 5.3-7～表 5.3-10 に示す。なお、3.0m の改良体を想定した理由は、昨年度の調査結果より、北欧の環境配慮型トンネルにおける一般的なプレグラウトの注入孔ピッチ（注入孔先端）が 3m 程度であることに基づいて設定している。また、表 5.3-7～表 5.3-10 中の亀裂開口幅としては、スリット試験装置の各スリットの校正値（表 5.3-2）を用いている。

表 5.3-7 必要グラウト注入量（普通セメント、R=3.0m）

想定亀裂開口幅 (スリット開口幅)		必要グラウト注入量 (g)								
		M (w/c) =1.0			M (w/c) =1.6			M (w/c) =2.0		
		$\alpha=0\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=41\%$	$\alpha=0\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=41\%$	$\alpha=0\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=41\%$
(μm)	(cm)									
13	1.30E-03	887	876	845	1153	1139	1099	1330	1314	1268
29	2.90E-03	1978	1955	1885	2572	2541	2451	2967	2932	2828
57	5.70E-03	3888	3842	3706	5055	4995	4817	5833	5763	5559
79	7.90E-03	5389	5325	5136	7006	6923	6677	8084	7988	7704
110	1.10E-02	7504	7415	7151	9755	9639	9297	11256	11122	10727
156	1.56E-02	10642	10515	10142	13834	13670	13184	15963	15773	15213

表 5.3-8 必要グラウト注入量（超微粒子セメント、R=3.0m）

想定亀裂開口幅 (スリット開口幅)		必要グラウト注入量 (g)								
		M (w/c) =1.0			M (w/c) =1.6			M (w/c) =2.0		
		$\alpha=0\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=41\%$	$\alpha=0\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=41\%$	$\alpha=0\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=41\%$
(μm)	(cm)									
13	1.30E-03	882	872	843	1147	1134	1095	1323	1308	1264
29	2.90E-03	1968	1946	1880	2558	2529	2444	2952	2918	2820
57	5.70E-03	3868	3824	3695	5028	4971	4803	5802	5736	5542
79	7.90E-03	5361	5300	5121	6969	6890	6657	8041	7950	7681
110	1.10E-02	7464	7380	7130	9704	9594	9269	11197	11070	10695
156	1.56E-02	10586	10466	10112	13762	13606	13145	15879	15699	15168

表 5.3-9 必要グラウト注入量（超々微粒子セメント、R=3.0m）

想定亀裂開口幅 (スリット開口幅)		必要グラウト注入量 (g)					
		M (w/c) =1.6			M (w/c) =2.0		
		$\alpha=0\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=41\%$	$\alpha=0\%$	$\alpha=10\%$	$\alpha=41\%$
(μm)	(cm)						
13	1.30E-03	1133	1121	1088	1307	1294	1255
29	2.90E-03	2527	2502	2427	2916	2887	2800
57	5.70E-03	4967	4917	4770	5731	5674	5504
79	7.90E-03	6884	6815	6611	7943	7864	7628
110	1.10E-02	9585	9490	9205	11060	10950	10621
156	1.56E-02	13594	13458	13054	15685	15528	15063

表 5.3-10 必要グラウト注入量（懸濁型特殊シリカ、R=3.0m）

想定亀裂開口幅 (スリット開口幅)		必要グラウト注入量 (g)	
		M (w/c) =2.5	
		$\alpha=0\%$	
(μm)	(cm)		
13	1.30E-03		1524
29	2.90E-03		3401
57	5.70E-03		6684
79	7.90E-03		9264
110	1.10E-02		12899
156	1.56E-02		18293

5.4 試験結果

5.4.1 低圧加圧試験

低圧加圧試験による試験結果一覧を表 5.4-1に示す。

また、以下の要領で各セメント材料における通過流量と必要グラウト通過量に対する通過割合を示す。

- ・ 普通粒径（高炉セメントB種）：図 5.4-1
- ・ 超微粒子セメント：図 5.4-2
- ・ 超々微粒子セメント：図 5.4-3

上記の結果、必要グラウト通過量が通過したケースは、配合F-00-16（超微粒子セメント、水セメント比1.6）、スリット開口幅 $100\mu\text{m}$ のケースのみであった。このケースにおけるフィルターケーキの状況を図 5.4-4に、単位時間当たりのグラウト通過流量の経時変化を図 5.4-5示す。また、通過しなかったケースにおけるフィルターケーキ状況の例を、図 5.4-6に示す。さらに、通過したグラウトの比重と注入グラウトの比重の比率を表 5.4-2に示す。

上記の結果より、低圧加圧試験において必要グラウト量が通過したケースにおいては、単位時間当たりの通過グラウト流量は安定していること、及びフィルターケーキに明瞭なグラウト通過経路が形成されていること、通過したグラウトの比重は注入グラウト比重の99%であり、ほとんど濾し取られていないこと、から判断して、最初からグラウト通過経路が全面的に目詰まりを起こすことなくグラウトが通過していたものと推測される。

一方、通過していないケースにおいてはフィルターケーキにグラウト経路等の乱れが発生しておらず、フィルターケーキが綺麗な状態で発達していったものと考えられる。

表 5.4-1 低圧加圧試験試験結果一覧表

No.	試験配合	セメント	グラウト添加量	分散剤	水セメント比	スリット幅 150 μ		スリット幅 100 μ		スリット幅 75 μ		スリット幅 50 μ		スリット幅 25 μ						
						目標値 (g)	通過量 (g)	割合 (%)	目標値 (g)	通過量 (g)	割合 (%)	目標値 (g)	通過量 (g)	割合 (%)	目標値 (g)	通過量 (g)	割合 (%)	目標値 (g)	通過量 (g)	割合 (%)
1	R-00-16	普通高炉セメント	0%	無添加	1.6	13834	684	5%	9755	181	2%	7006	66	1%	5055	45	1%			
2	R-00-16N	普通高炉セメント	0%	ホ [®] リカ1%	1.6	13834	789	6%	9755	417	4%	7006	40	1%	5055	19	0%			
3	R-00-16M	普通ホ [®] トロン [®] セメント	0%	ホ [®] リカ1%	1.6	13834	657	5%												
4	R-10-16	普通高炉セメント	10%	無添加	1.6	13670	125	1%	9639	44	0%	6923	22	0%	4995	8	0%			
5	R-00-20	普通高炉セメント	0%	ホ [®] リカ1%	2.0	15963	803	5%												
6	F-00-10	超微粒子セメント	0%	ホ [®] リカ1%	1.0				7464	1110	15%	5361	337	6%	3868	124	3%	1968	21	1%
7	F-10-10	超微粒子セメント	10%	ホ [®] リカ1%	1.0	10466	1716	16%	7380	681	9%	5300	225	4%	3824	153	4%			
8	F-41-10	超微粒子セメント	41%	フタロン2.5%	1.0	10112	1040	10%	7130	484	7%	5121	154	3%	3695	95	3%			
9	F-00-16	超微粒子セメント	0%	ホ [®] リカ1%	1.6				9704	10152	105%	6969	706	10%	5028	478	10%	2558	9	0%
10	F-10-16	超微粒子セメント	10%	ホ [®] リカ1%	1.6				9594	800	8%	6890	486	7%	4971	87	2%	2529	2	0%
11	F-41-16	超微粒子セメント	41%	フタロン2.5%	1.6	13145	502	4%	9269	276	3%	6657	137	2%	4803	77	2%			
12	F-10-20	超微粒子セメント	10%	ホ [®] リカ1%	2.0	15699	6172	39%	11070	1091	10%	7950	108	1%	5736	127	2%			
13	F-41-20	超微粒子セメント	41%	フタロン2.5%	2.0	15168	844	6%												
14	U-00-20	超々微粒子	0%	ホ [®] リカ1%	2.0	15685	1236	8%	11060	229	2%	7943	147	2%	5731	65	1%			
15	U-00-20N	超々微粒子	0%	ホ [®] リカ5%	2.0	15685	2035	13%	11060	1486	13%	7943	367	5%	5731	52	1%			
16	U-10-20	超々微粒子	10%	ホ [®] リカ1%	2.0	15528	468	3%	10950	128	1%	7864	96	1%	5674	69	1%			
17	S-00	懸濁型特殊シリカ	0%	フタロン0.7%	2.5	18293	1217	7%	12899	746	6%	9264	215	2%	6684	94	1%			

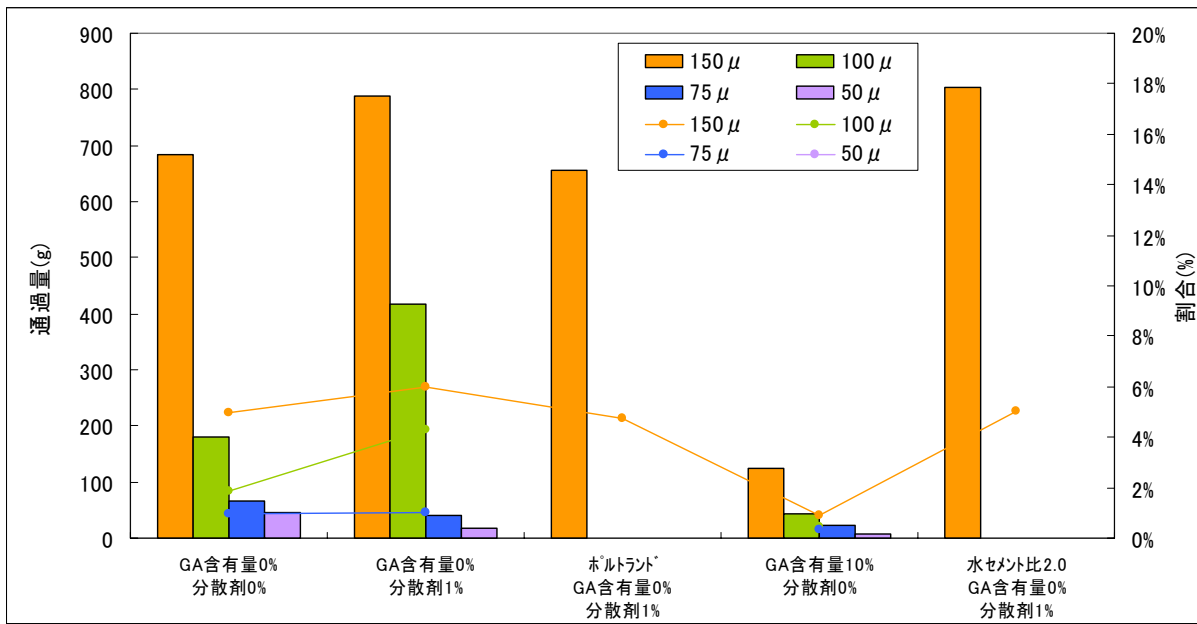


図 5.4-1 低圧加圧試験結果（普通粒径セメントの場合）

（棒グラフ：グラウト通過量、折れ線グラフ：必要グラウト通過量に対する通過割合）

*ポルトラント[®]セメントについてはスリット開口幅 150 μ のみを実施

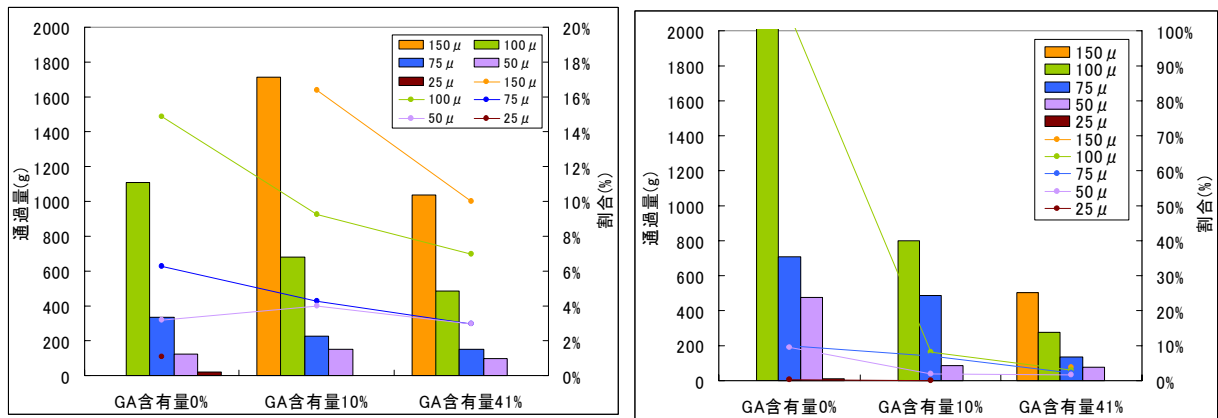


図 5.4-2 低圧加圧試験結果（超微粒子セメントの場合）

（左図：水セメント比 1.0 の場合、右図：水セメント比 1.6 の場合）

（棒グラフ：グラウト通過量、折れ線グラフ：必要グラウト通過量に対する通過割合）

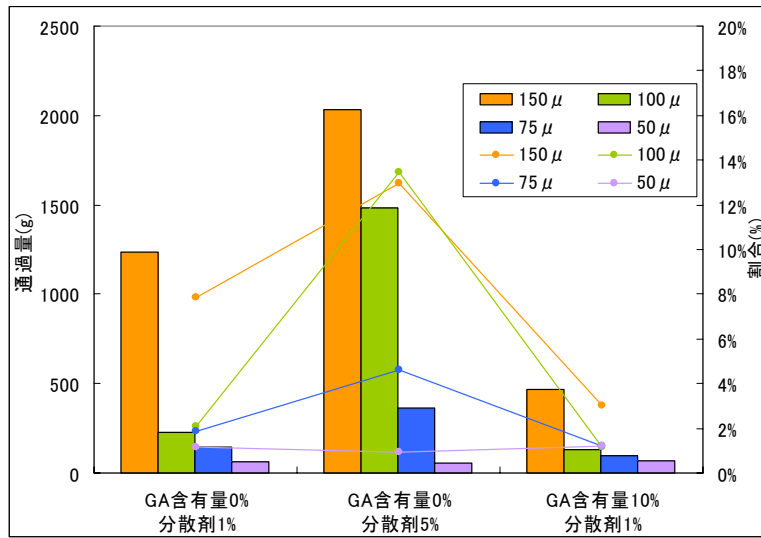


図 5.4-3 低圧加圧試験結果（超々微粒子セメントの場合）

（棒グラフ：グラウト通過量、折れ線グラフ：必要グラウト通過量に対する通過割合）

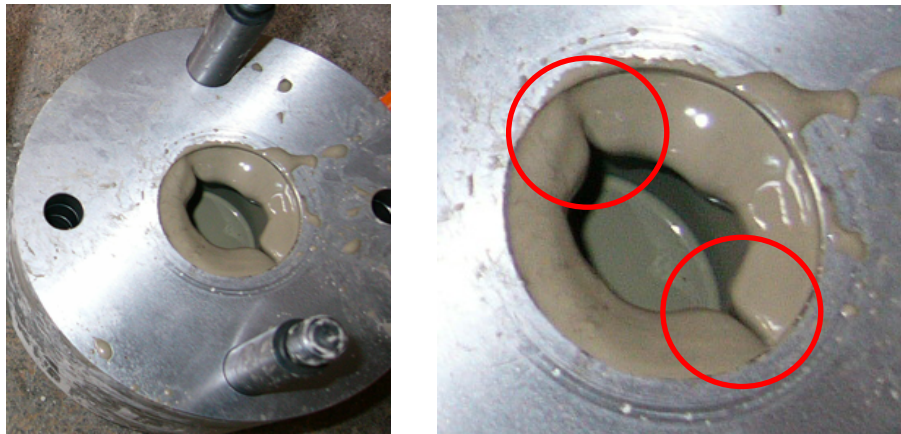


図 5.4-4 フィルターケーキの状況（通過した場合）

（F-00-16、スリット開口幅 100 μ m）

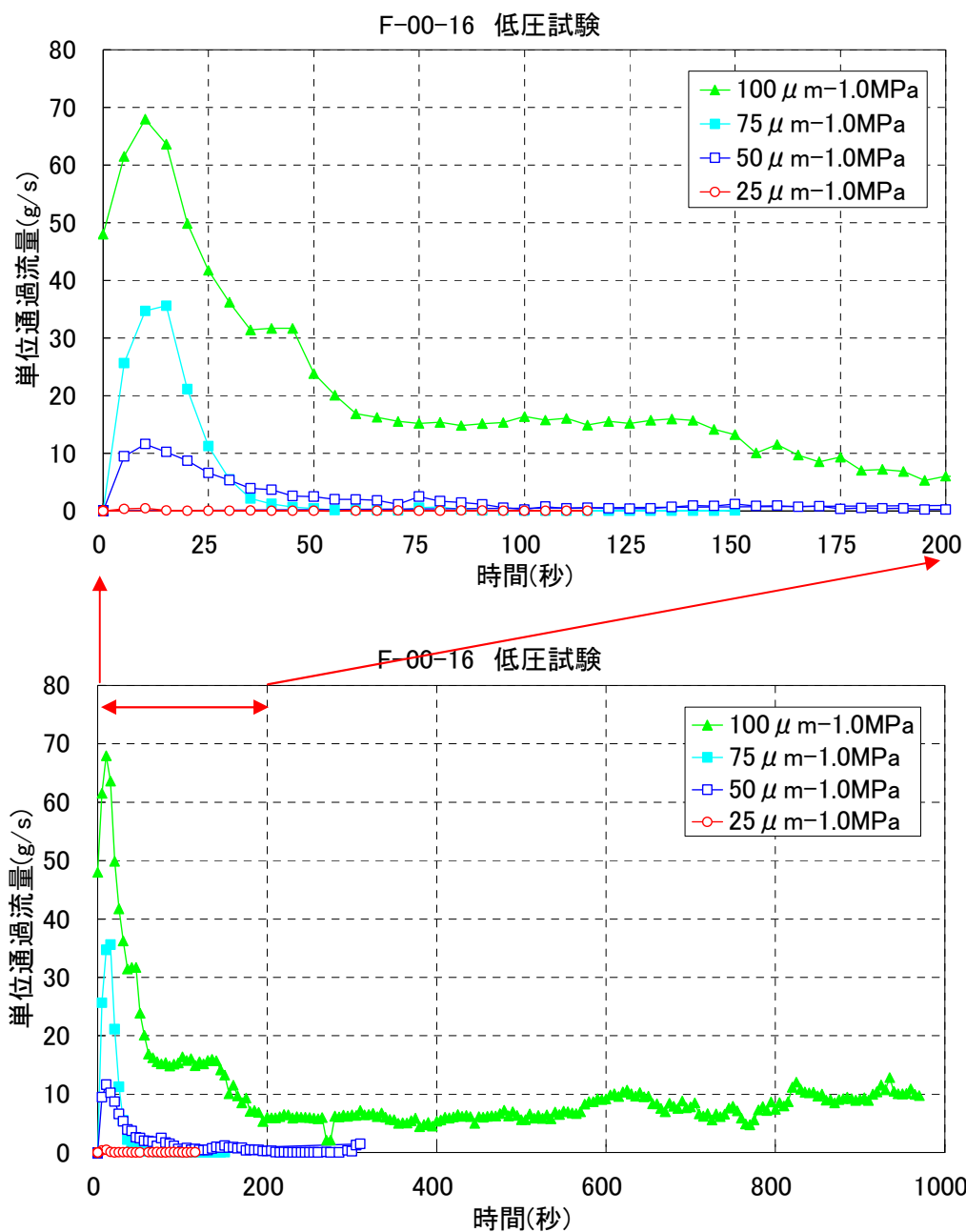


図 5.4-5 単位時間当りのグラウト通過流量

(試験ケース: F-00-16+スリット開口幅 100 μm、上図: 0~200 秒間の拡大図、下図: 全体図)

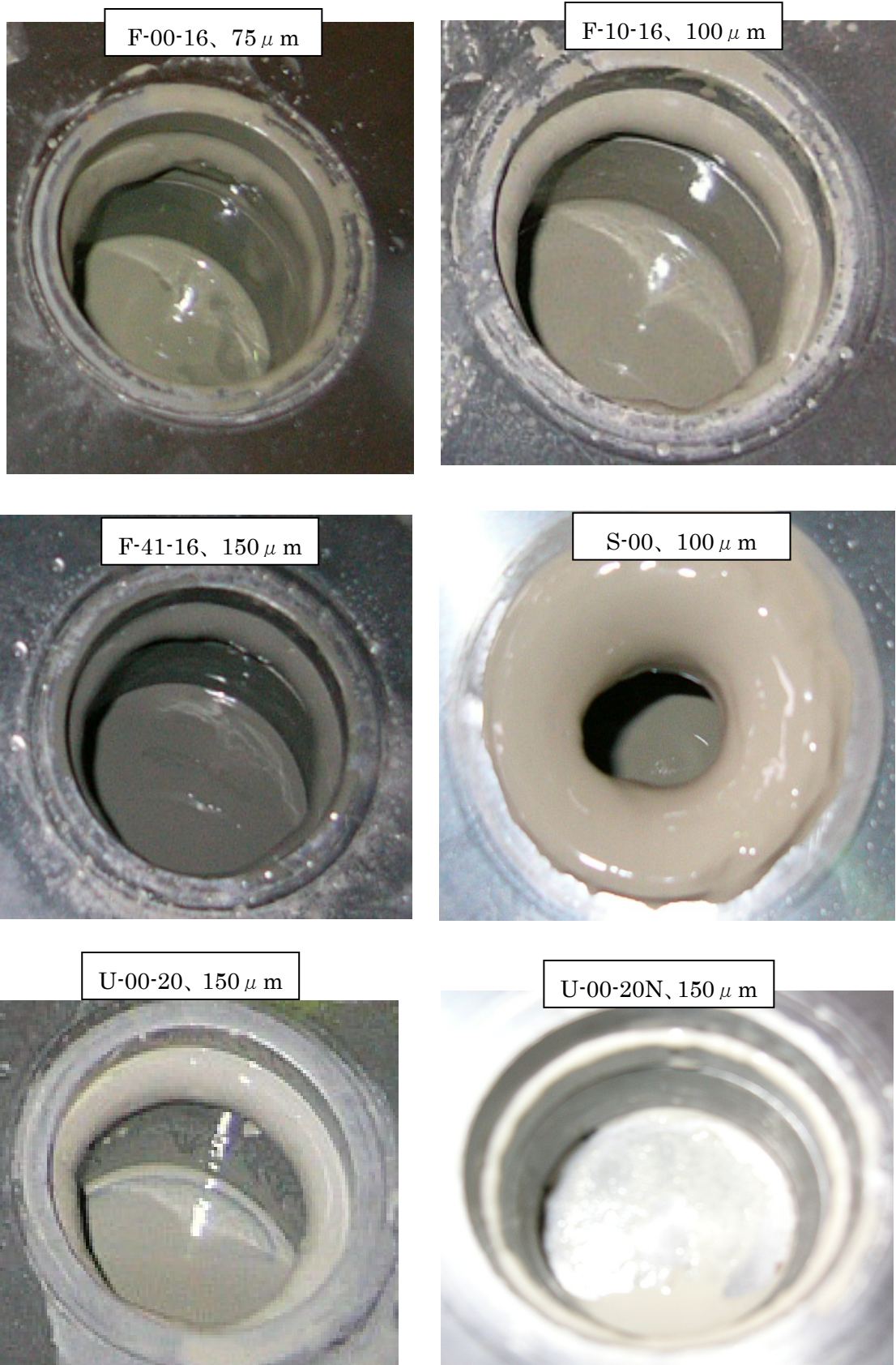


図 5.4-6 フィルターケーキの状況 (通過しない場合)

表 5.4-2 通過したグラウト材料の比重測定結果（低圧加圧試験）

試験配合	セメント	グラウトエイト含有量	水/粉体比	分散剤	スリット幅 (μm)	①注入グラウト	②通過グラウト			比率 (①/②) (%)
						比重 (g/cm^3)	重量 (g)	体積 (cm^3)	比重 (g/cm^3)	
R-00-16	高炉セメントB種	0%	1.6	無添加	150	1.348	683.5	640	1.068	79%
	高炉セメントB種	0%	1.6	無添加	100	1.348	181.3	195	0.930	69%
	高炉セメントB種	0%	1.6	無添加	75	1.348	65.7	75	0.876	65%
	高炉セメントB種	0%	1.6	無添加	50	1.348	44.7	65	0.688	51%
R-00-16N	高炉セメントB種	0%	1.6	ポリカルボン、1%	150	1.347	789	635	1.243	92%
	高炉セメントB種	0%	1.6	ポリカルボン、1%	100	1.347	416.6	320	1.302	97%
	高炉セメントB種	0%	1.6	ポリカルボン、1%	75	1.347	39.5	40	0.988	73%
	高炉セメントB種	0%	1.6	ポリカルボン、1%	50	1.347	19	-	-	-
R-00-16M	普通ポルトランドセメント	0%	1.6	無添加	150	1.348	656.6	530	1.239	92%
R-10-16	高炉セメントB種	10%	1.6	無添加	150	1.341	125.3	130	0.964	72%
	高炉セメントB種	10%	1.6	無添加	100	1.341	43.6	44	0.991	74%
	高炉セメントB種	10%	1.6	無添加	75	1.341	22.4	24	0.933	70%
	高炉セメントB種	10%	1.6	無添加	50	1.341	7.8	8	0.975	73%
R-00-20	高炉セメントB種	0%	2.0	ポリカルボン、1%	150	1.287	803.4	680	1.181	92%
F-00-10	超微粒子セメント	0%	1.0	ポリカルボン、1%	100	1.497	1110.1	790	1.405	94%
	超微粒子セメント	0%	1.0	ポリカルボン、1%	75	1.497	336.5	275	1.224	82%
	超微粒子セメント	0%	1.0	ポリカルボン、1%	50	1.497	124.0	120	1.033	69%
	超微粒子セメント	0%	1.0	ポリカルボン、1%	25	1.497	20.6	60	0.343	23%
F-10-10	超微粒子セメント	10%	1.0	ポリカルボン、1%	150	1.487	1715.7	1240	1.384	93%
	超微粒子セメント	10%	1.0	ポリカルボン、1%	100	1.487	681.3	510	1.336	90%
	超微粒子セメント	10%	1.0	ポリカルボン、1%	75	1.487	224.7	180	1.248	84%
	超微粒子セメント	10%	1.0	ポリカルボン、1%	50	1.487	152.9	140	1.092	73%
F-41-10	超微粒子セメント	41%	1.0	ナフタリン系、2.5%	150	1.454	1039.8	760	1.368	94%
	超微粒子セメント	41%	1.0	ナフタリン系、2.5%	100	1.454	484.1	400	1.210	83%
	超微粒子セメント	41%	1.0	ナフタリン系、2.5%	75	1.454	154.2	145	1.063	73%
	超微粒子セメント	41%	1.0	ナフタリン系、2.5%	50	1.454	94.9	105	0.904	62%
F-00-16	超微粒子セメント	0%	1.6	ポリカルボン、1%	100	1.344	10152.1	7600	1.336	99%
	超微粒子セメント	0%	1.6	ポリカルボン、1%	75	1.344	706.1	550	1.284	96%
	超微粒子セメント	0%	1.6	ポリカルボン、1%	50	1.344	478.1	430	1.112	83%
	超微粒子セメント	0%	1.6	ポリカルボン、1%	25	1.344	8.7	11	0.791	59%
F-10-16	超微粒子セメント	10%	1.6	ポリカルボン、1%	100	1.337	800	630	1.270	95%
	超微粒子セメント	10%	1.6	ポリカルボン、1%	75	1.337	486.0	380	1.279	96%
F-41-16	超微粒子セメント	41%	1.6	ナフタリン系、2.5%	150	1.317	501.6	420	1.194	91%
	超微粒子セメント	41%	1.6	ナフタリン系、2.5%	100	1.317	275.7	250	1.103	84%
	超微粒子セメント	41%	1.6	ナフタリン系、2.5%	75	1.317	136.8	135	1.013	77%
	超微粒子セメント	41%	1.6	ナフタリン系、2.5%	50	1.317	76.6	64	1.197	91%
F-10-20	超微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1%	150	1.279	6172.0	4960	1.244	97%
	超微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1%	100	1.279	1091.4	895	1.219	95%
	超微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1%	75	1.279	108.0	110	0.982	77%
	超微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1%	50	1.279	126.7	130	0.975	76%
F-41-20	超微粒子セメント	41%	2.0	ナフタリン系、2.5%	150	1.264	844.2	700	1.206	95%
U-00-20	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、1%	150	1.279	1235.6	1010	1.223	96%
	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、1%	100	1.279	228.8	215	1.064	83%
	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、1%	75	1.279	147.4	150	0.983	77%
	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、1%	50	1.279	65.2	75	0.869	68%
U-00-20N	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、5%	150	1.277	2034.8	1645	1.237	97%
	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、5%	100	1.277	1486.3	1280	1.161	91%
	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、5%	75	1.277	367.0	325	1.129	88%
	超々微粒子セメント	0%	2.0	ポリカルボン、5%	50	1.277	52.4	49	1.069	84%
U-10-20	超々微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1%	150	1.275	467.8	410	1.141	90%
	超々微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1%	100	1.275	127.7	130	0.982	77%
	超々微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1%	75	1.275	96.4	89	1.083	85%
	超々微粒子セメント	10%	2.0	ポリカルボン、1%	50	1.275	69.0	66	1.045	82%
S-00	懸濁型特殊シリカ	0%	2.5	ナフタリン系、0.35%	150	1.235	1217.2	1300	0.936	76%
	懸濁型特殊シリカ	0%	2.5	ナフタリン系、0.35%	100	1.235	745.6	690	1.081	87%
	懸濁型特殊シリカ	0%	2.5	ナフタリン系、0.35%	75	1.235	214.5	210	1.021	83%
	懸濁型特殊シリカ	0%	2.5	ナフタリン系、0.35%	50	1.235	93.6	110	0.851	69%

5.4.2 高圧加圧試験

昨年度実施した目詰まり試験においては、配合 3（超微粒子セメント、水セメント比 1.6、グラウトエイド 10%添加）はスリット開口幅 50 μm に対して低圧加圧試験（1 MPa 载荷）では 78.3 g しかグラウトが通過しなかったが、5 MPa まで連続的に载荷した高圧加圧試験では通過量が 431 g と、5.5 倍に増大している。

この結果から推測すると、低圧加圧試験において必要グラウト通過量の 18%（ $=100\% \div 5.5$ ）通過した試験ケースが、高圧加圧試験において必要グラウト量が通過する可能性が高いと言える。そこで、今年度は上記より小さい数値（仮に、5%と設定）を目処に試験スリット開口幅を選定し、高圧加圧試験におけるグラウト通過状況に応じて前後のスリット開口幅を使用して再試験を実施するものとした。

低圧加圧試験において必要グラウト量の 10%以上通過した最小スリット開口幅と試験配合の組合せは以下の通りである。

- ・ スリット開口幅 50 μm : F-00-16
- ・ スリット開口幅 100 μm : F-00-10、F-10-20、U-00-20N
- ・ スリット開口幅 150 μm : F-10-10、F-41-10

そこで、基本的には上記を試験スリット開口幅に設定して高圧加圧試験を実施するが、水セメント比と目詰まり発生の関係（セメント種類とシリカフューム添加量が同一な場合は、水セメント比が高い方が目詰まりが生じにくいという関係）から省略可能なケースが生じた場合は、適宜適切なスリット開口幅を選定するものとする。

高圧加圧試験の試験結果一覧表を表 5.4-4に示す。

また、スリット開口幅 150 μm の場合における通過割合（ $=$ グラウト通過量/必要グラウト通過量）を図 5.4-7に示す。

表 5.4-4において、必要グラウト量が通過したケースの最小スリット開口幅を抜粋して表 5.4-3に示す。このように、必要グラウト量が通過したセメント種類は、超微粒子セメントと超々微粒子セメントのみである。

表 5.4-3 必要グラウト量が通過したケースと最小スリット開口幅

	超微粒子セメント		超々微粒子セメント
	水セメント比=1.0	水セメント比=1.6	水セメント比=2.0
グラウトエイド添加量 0%	75 μm	50 μm	50 μm *
グラウトエイド添加量 10%	150 μm	100 μm	—

*分散剤を 5%添加した U-00-20N の場合

必要グラウト量が通過したケースの単位時間当りの通過流量と注入圧力の関係、及び試験終了後にスリット試験装置を解体した際のフィルターケーキの発生状況を以下の要領で示す。

<必要量通過した全ケース>

- 超微粒子セメント
 - ・ F-00-10、100 μm : 図 5.4-8
 - ・ F-00-10、75 μm : 図 5.4-9
 - ・ F-10-10、150 μm : 図 5.4-10
 - ・ F-00-16、50 μm (1回目) : 図 5.4-11
 - ・ F-00-16、50 μm (2回目) : 図 5.4-12
 - ・ F-10-16、100 μm (1回目) : 図 5.4-13
- 超々微粒子セメント
 - ・ U-00-20N、150 μm : 図 5.4-14
 - ・ U-00-20N、75 μm : 図 5.4-15
 - ・ U-00-20N、50 μm : 図 5.4-16

また、通過しなかったケースにおけるフィルターケーキの例として以下のケースを抜粋して示す。

<通過しなかったケースの抜粋>

- ・ R-00-16M、150 μm : 図 5.4-17
- ・ F-41-20、150 μm : 図 5.4-18
- ・ U-00-20、150 μm : 図 5.4-19

さらに、通過したグラウトの比重と注入グラウトの比重の比率を表 5.4-5に示す。

表 5.4.4 高圧加圧試験試験結果一覧表

No.	試験配合	セメント	グラウトエイト [®] 添加量	分散剤	水セメント比	スリット幅 (μ)	①目標値 (g)	②通過量 (g)	割合(%) (②/①)	通過可能 スリット幅 (μ)
1	R-00-16	普通高炉セメント	0%	無添加	1.6	150	13834	801	6%	×
2	R-00-16N	普通高炉セメント	0%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.6	150	13834	3544	26%	×
3	R-00-16M	普通ポルトランドセメント	0%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.6	150	13834	8008	58%	×
4	R-10-16	普通高炉セメント	10%	無添加	1.6	150	13670	281	2%	×
5	R-00-20	普通高炉セメント	0%	ボ [®] リカ [®] 1%	2.0	150	15963	1391	9%	×
6	F-00-10	超微粒子セメント	0%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.0	100	7464	9980	134%	75
		超微粒子セメント	0%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.0	75	5361	5290	99%	
		超微粒子セメント	0%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.0	50	3868	2279	59%	
7	F-10-10	超微粒子セメント	10%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.0	150	10466	10761	103%	150
		超微粒子セメント	10%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.0	100	7380	4734	64%	
8	F-41-10	超微粒子セメント	41%	ナフタレン2.5%	1.0	150	10112	1381	14%	×
9	F-00-16	超微粒子セメント	0%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.6	50	5028	6114	122%	50
		超微粒子セメント	0%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.6	50	5028	9413	187%	
10	F-10-16	超微粒子セメント	10%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.6	100	9594	9916	103%	100
		超微粒子セメント	10%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.6	50	4971	291	6%	
11	F-41-16	超微粒子セメント	41%	ナフタレン2.5%	1.6	150	13145	4479	34%	×
		超微粒子セメント	41%	ナフタレン2.5%	1.6	150	13145	5983	46%	
12	F-00-20	超微粒子セメント	0%	ボ [®] リカ [®] 1%	1.6	25	2952	137	5%	50
13	F-10-20	超微粒子セメント	10%	ボ [®] リカ [®] 1%	2.0	75	7950	541	7%	100
14	F-41-20	超微粒子セメント	41%	ナフタレン2.5%	2.0	150	15168	3021	20%	×
15	U-00-20	超々微粒子	0%	ボ [®] リカ [®] 1%	2.0	150	15685	4957	32%	×
16	U-00-20N	超々微粒子	0%	ボ [®] リカ [®] 5%	2.0	150	15685	15685	100%	50
		超々微粒子	0%	ボ [®] リカ [®] 5%	2.0	75	7943	10128	128%	
		超々微粒子	0%	ボ [®] リカ [®] 5%	2.0	50	5731	6945	121%	
		超々微粒子	0%	ボ [®] リカ [®] 5%	2.0	25	2916	282	10%	
17	U-10-20	超々微粒子	10%	ボ [®] リカ [®] 1%	2.0	150	15528	1957	13%	×
18	S-00	懸濁型特殊シリカ	0%	ナフタレン0.7%	2.5	150	18293	4909	27%	×

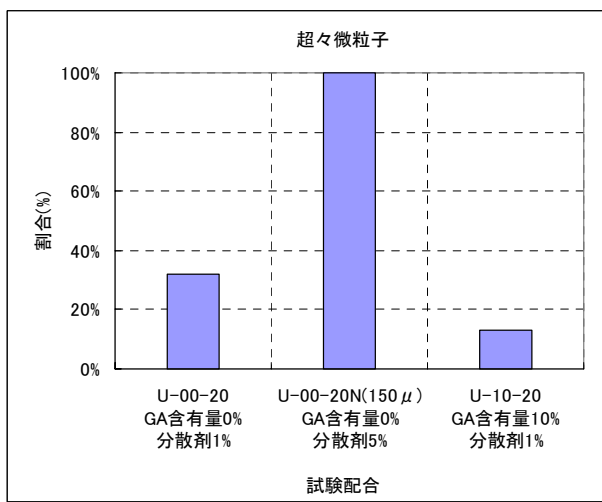
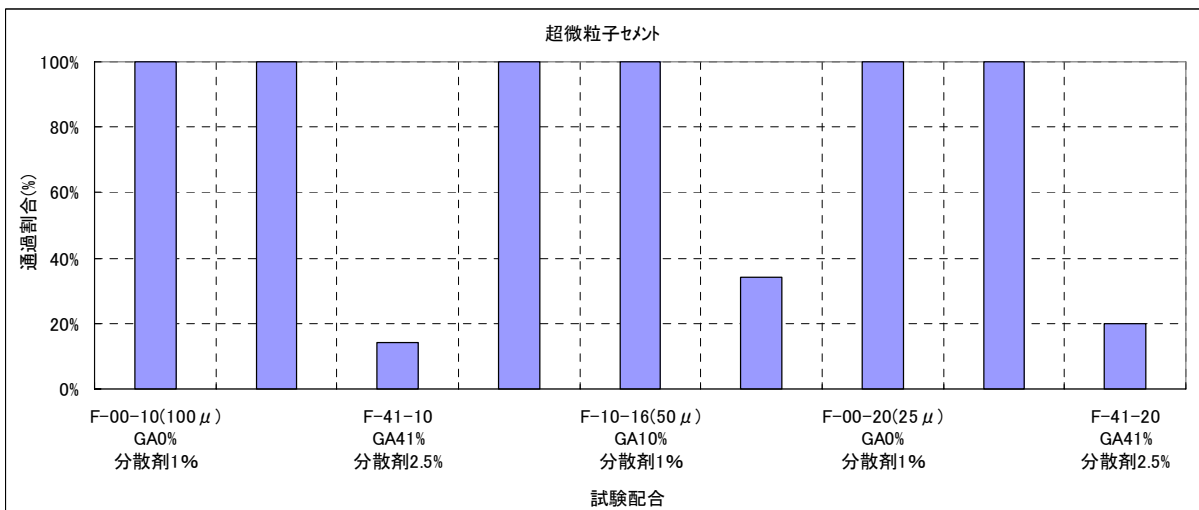
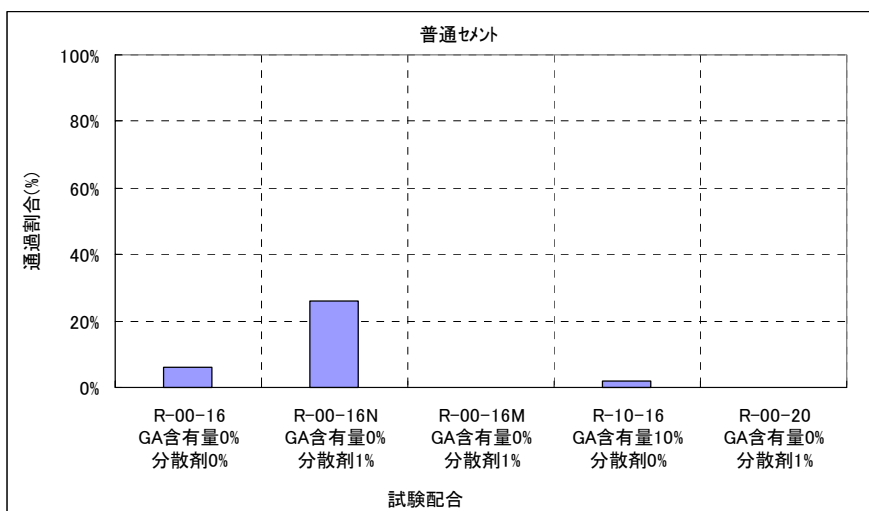


図 5.4-7 必要グラウト量に対する通過グラウト量の割合 (スリット開口幅 150 μ m)
(上図：普通セメント、中図：超微粒子セメント、下図：超々微粒子セメント)

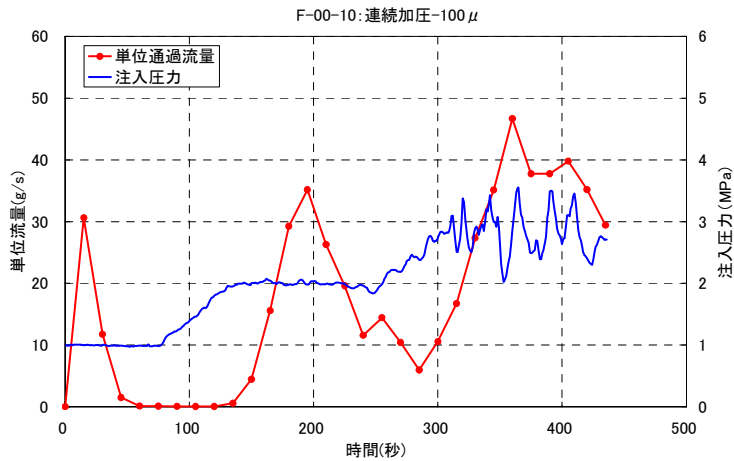


図 5.4-8 F-00-10、スリット開口幅 100 μm の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

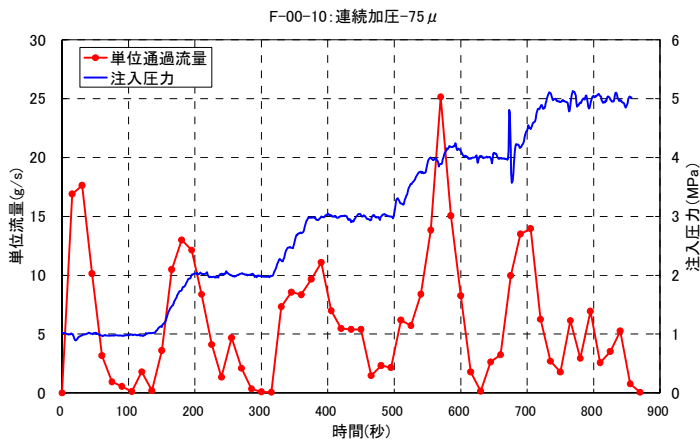


図 5.4-9 F-00-10、スリット開口幅 75 μm の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

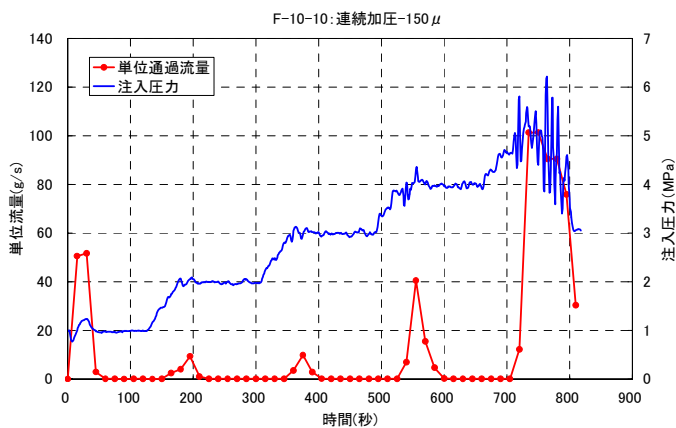


図 5.4-10 F-10-10、スリット開口幅 150 μm の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

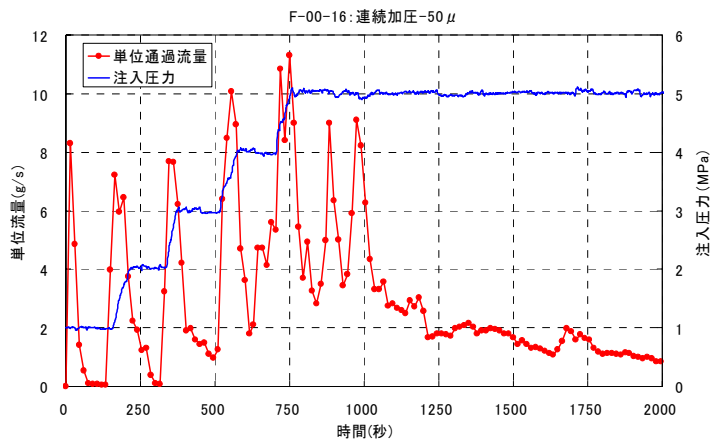


図 5.4-11 F-00-16、スリット開口幅 $50\mu\text{m}$ (1回目) の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

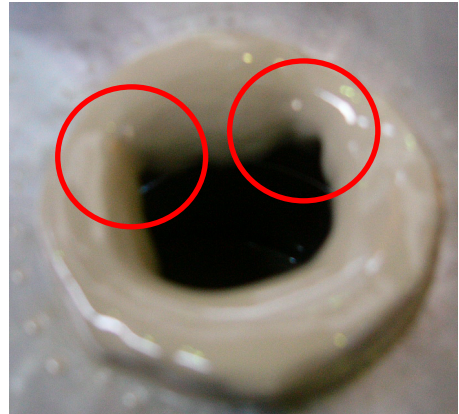
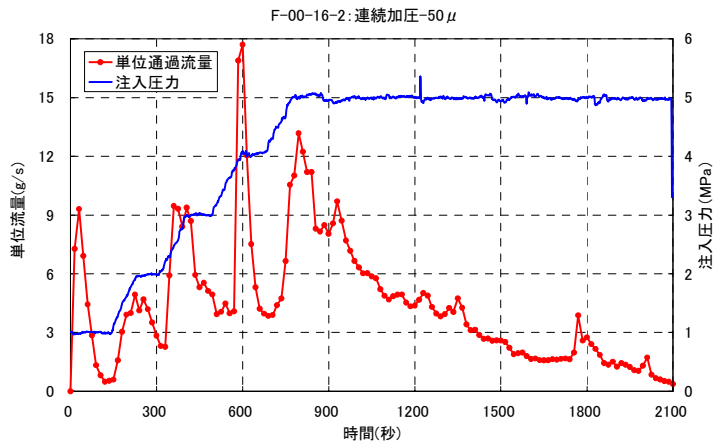


図 5.4-12 F-00-16、スリット開口幅 $50\mu\text{m}$ (2回目) の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

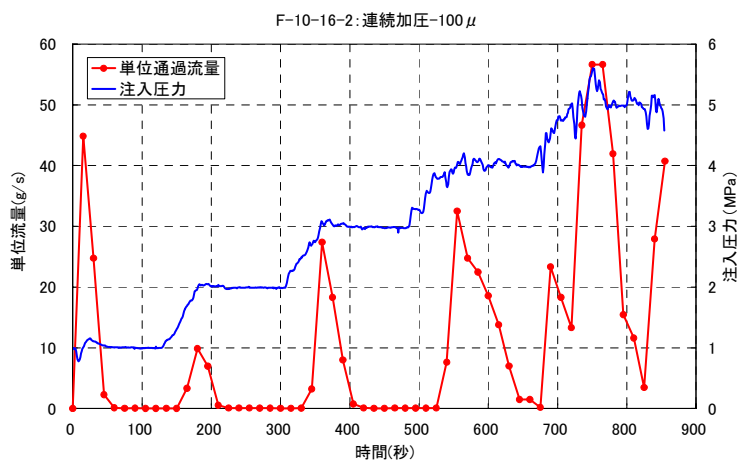


図 5.4-13 F-10-16、スリット開口幅 $100\mu\text{m}$ (1回目) の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

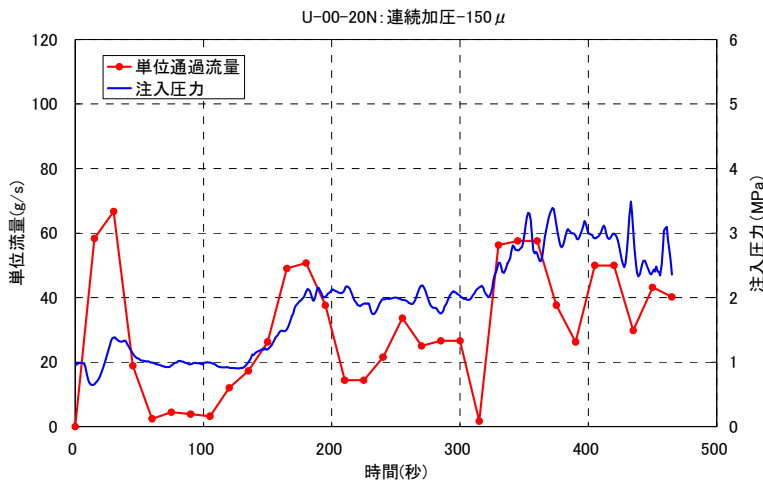


図 5.4-14 U-00-20N、スリット開口幅 150 μm の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

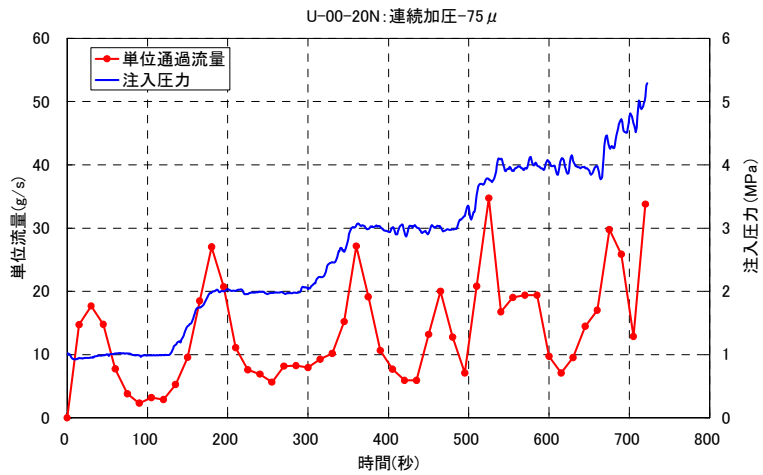


図 5.4-15 U-00-20N、スリット開口幅 75 μm の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

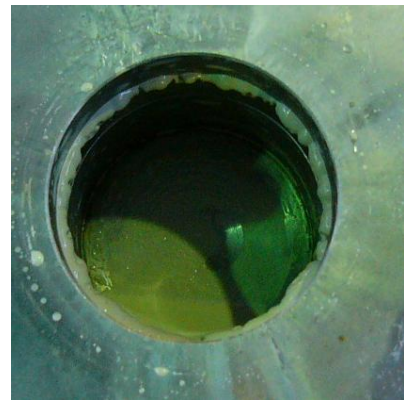
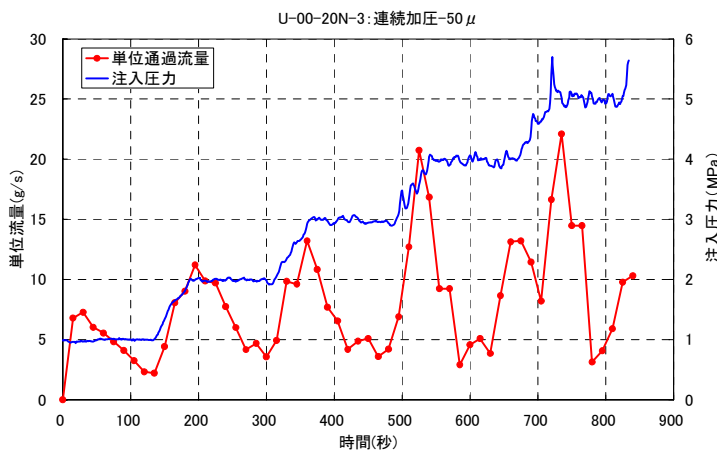


図 5.4-16 U-00-20N、スリット開口幅 50 μm の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

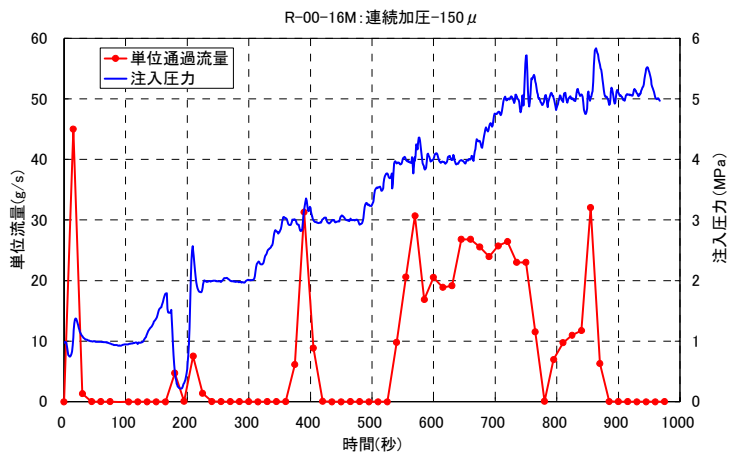


図 5.4-17 R-00-16M、スリット開口幅 150 μ m の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

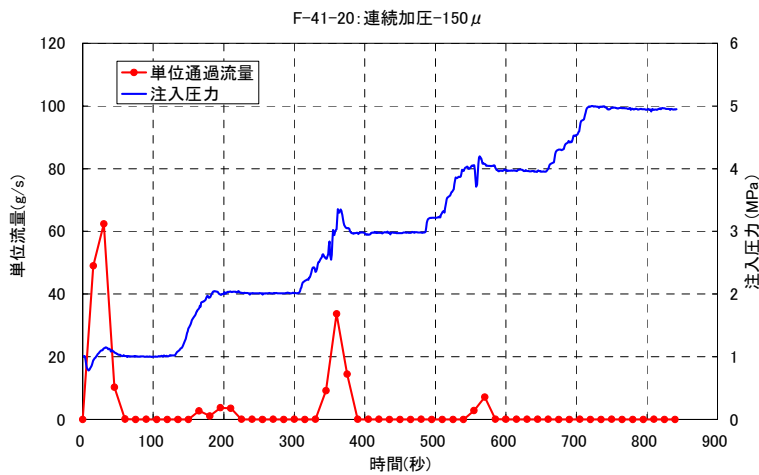


図 5.4-18 F-41-20、スリット開口幅 150 μ m の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

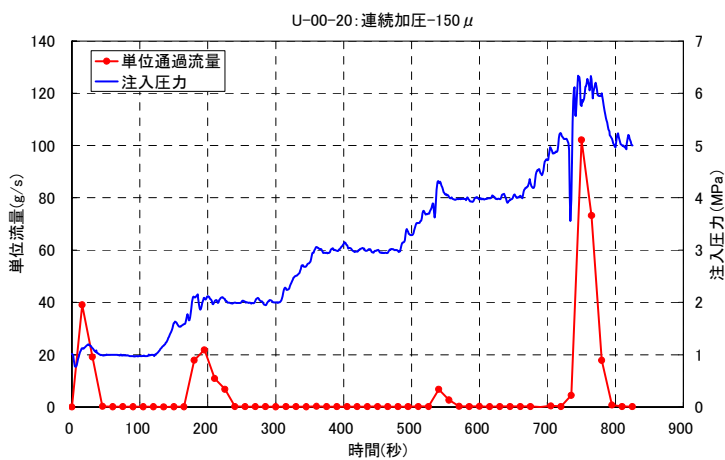


図 5.4-19 U-00-20、スリット開口幅 150 μ m の試験結果
(左図：単位時間当りの通過流量、右図：フィルターケーキの状況)

表 5.4-5 通過したグラウト材料の比重測定結果 (高圧加圧試験)

試験配合	セメント	グラウトエイト [®] 含有量	水/粉体比	分散剤	スリット幅 (μm)	注入ダ ラウト ①比重 (g/cm^3)	通過グラウト			比率 (①/②) (%)	備考
							重量 (g)	体積 (cm^3)	②比重 (g/cm^3)		
R-00-16	高炉セメントB種	0%	1.6	無添加	150	1.348	801.1	705	1.136	84%	
R-00-16N	高炉セメントB種	0%	1.6	ホリカルボン、1%	150	1.347	3543.9	2790	1.270	94%	
R-00-16M	普通ポルトランドセメント	0%	1.6	無添加	150	1.348	8007.8	6070	1.319	98%	
R-10-16	高炉セメントB種	10%	1.6	無添加	150	1.341	281.4	280	1.005	75%	
R-00-20	高炉セメントB種	0%	2.0	ホリカルボン、1%	150	1.287	1390.7	1180	1.179	92%	
F-00-10	超微粒子セメント	0%	1.0	ホリカルボン、1%	100	1.497	9979.9	7350	1.358	91%	
	超微粒子セメント	0%	1.0	ホリカルボン、1%	75	1.497	5289.6	3700	1.430	95%	
	超微粒子セメント	0%	1.0	ホリカルボン、1%	50	1.497	2279.2	1610	1.416	95%	
F-10-10	超微粒子セメント	10%	1.0	ホリカルボン、1%	150	1.487	10761.4	7610	1.414	95%	
	超微粒子セメント	10%	1.0	ホリカルボン、1%	100	1.487	4733.5	3310	1.430	96%	
F-41-10	超微粒子セメント	41%	1.0	ナフリン系、2.5%	150	1.454	1380.6	1038	1.330	91%	
F-00-16	超微粒子セメント	0%	1.6	ホリカルボン、1%	50	1.344	6114.1	4640	1.318	98%	1回目
	超微粒子セメント	0%	1.6	ホリカルボン、1%	50	1.344	9412.6	7000	1.345	100%	2回目
F-10-16	超微粒子セメント	10%	1.6	ホリカルボン、1%	100	1.337	9915.9	7160	1.385	100%※	
	超微粒子セメント	10%	1.6	ホリカルボン、1%	50	1.337	290.7	270	1.077	81%	
F-41-16	超微粒子セメント	41%	1.6	ナフリン系、2.5%	150	1.317	4478.5	3470	1.291	98%	1回目
	超微粒子セメント	41%	1.6	ナフリン系、2.5%	150	1.317	5983.1	4530	1.321	100%	2回目
F-00-20	超微粒子セメント	0%	2.0	ホリカルボン、1%	25	1.285	136.8	120	1.140	89%	
F-10-20	超微粒子セメント	10%	2.0	ホリカルボン、1%	75	1.279	540.9	510	1.061	83%	
F-41-20	超微粒子セメント	41%	2.0	ナフリン系、2.5%	150	1.264	3021.3	2430	1.243	98%	
U-00-20	超々微粒子セメント	0%	2.0	ホリカルボン、1%	150	1.279	4957.4	4130	1.200	94%	
U-10-20	超々微粒子セメント	10%	2.0	ホリカルボン、1%	150	1.277	15184.9	12420	1.223	96%	
U-00-20N	超々微粒子セメント	0%	2.0	ホリカルボン、5%	150	1.277	10128	8080	1.253	98%	
	超々微粒子セメント	0%	2.0	ホリカルボン、5%	75	1.277	6945.2	5470	1.270	99%	
	超々微粒子セメント	0%	2.0	ホリカルボン、5%	50	1.277	281.8	250	1.127	88%	
	超々微粒子セメント	0%	2.0	ホリカルボン、5%	25	1.275	1957	1660	1.179	92%	
S-00	懸濁型特殊シリカ	0%	2.5	ナフリン系、0.35%	150	1.235	4909.2	4060	1.209	98%	

*メスシリンダー一面に付着したグラウト液等の体積が加算できていない等の誤差に起因して計算上は比率が100%を超えるため、100%と記載

5.5 考察

5.5.1 低圧加圧試験

低圧加圧試験の結果、以下のことが判明した。

- ・ 必要グラウト量が通過したケースは、 100μ のスリット開口幅に対して超微粒子セメント（水セメント比：1.6）を使用したケースのみであった（表 5.4-1参照）。この場合には、単位時間当りのグラウト通過流量が安定しており（図 5.4-5参照）、フィルターケーキにグラウトが通過した跡が明瞭に見られ（図 5.4-4参照）、通過したグラウトの比重は注入グラウト比重の99%と同程度であり（表 5.4-2参照）、グラウト材がスリット間を円滑に通過した。一方、通過しなかった他のケースについては、円環状のフィルターケーキが綺麗に発達していた（図 5.4-6参照）。
- ・ 高炉セメント、普通ポルトランドセメントは、 150μ に対しても通過量が少なく（図 5.4-1参照）、分散剤を加えて粘性を低減させた場合では、フィルターケーキが十分に発達することはないが、グラウトは通過しないという結果となった。
- ・ 超々微粒子セメントは分散剤を1%添加した場合は、水セメント比を2.0としてもフィルターケーキが発達し（図 5.4-6の左下図(U-00-20, $150\mu\text{m}$)参照）、目詰まりが早かった。一方、5%添加した場合は、粘性が低いためフィルターケーキはあまり発達しなかったが（図 5.4-6の右下図(U-00-20N, $150\mu\text{m}$)参照）、目詰まりが発生した（図 5.4-3参照）。
- ・ 注入グラウト比重に対する通過グラウト比重の比率を、グラウトエイド添加量、スリット開口幅、水セメント比に関して分析した結果を図 5.5-1に示す。同図より、全体的に高炉セメントの場合に、通過グラウトの比重が低下していることがわかる。目視観察によっても、スリットにおいてセメント分が濾し取られ、余剰水が絞り取られていることが確認されている。この原因としては、粒径が大きいこと、ブリージングが大きいこと、の2種類の理由が考えられる。また、スリット開口幅が小さい程、通過グラウトの比重が低下していることがわかる。なお、グラウトエイド添加量、水セメント比による有意な影響は見られない。

スリット開口幅 100μ 、 150μ における通過グラウト量比率を、せん断粘度（ビンガム流体とモデル化）、真の降伏強度、見掛けの降伏強度（ビンガム流体とモデル化）に関して分析した結果を表 5.5-1 に示す。同表より、せん断粘度、降伏強度ともに通過比率と逆の相関があり、特に見掛けの降伏強度にこの傾向が見られる。しかしながら、見掛けの降伏強度が0にも拘らず通過比率が低い場合（U-00-20N：超々微粒子セメント）と高い場合（F-00-16：超微粒子セメント）の相反するケースが存在しており、粘性以外の要因（例えば、粒子径の違いによるスラリー一体積当りの粒子数の違い）が影響している可能性も否定出来ない。この点に関しては、今後の更なる研究が必要であると考えられる。

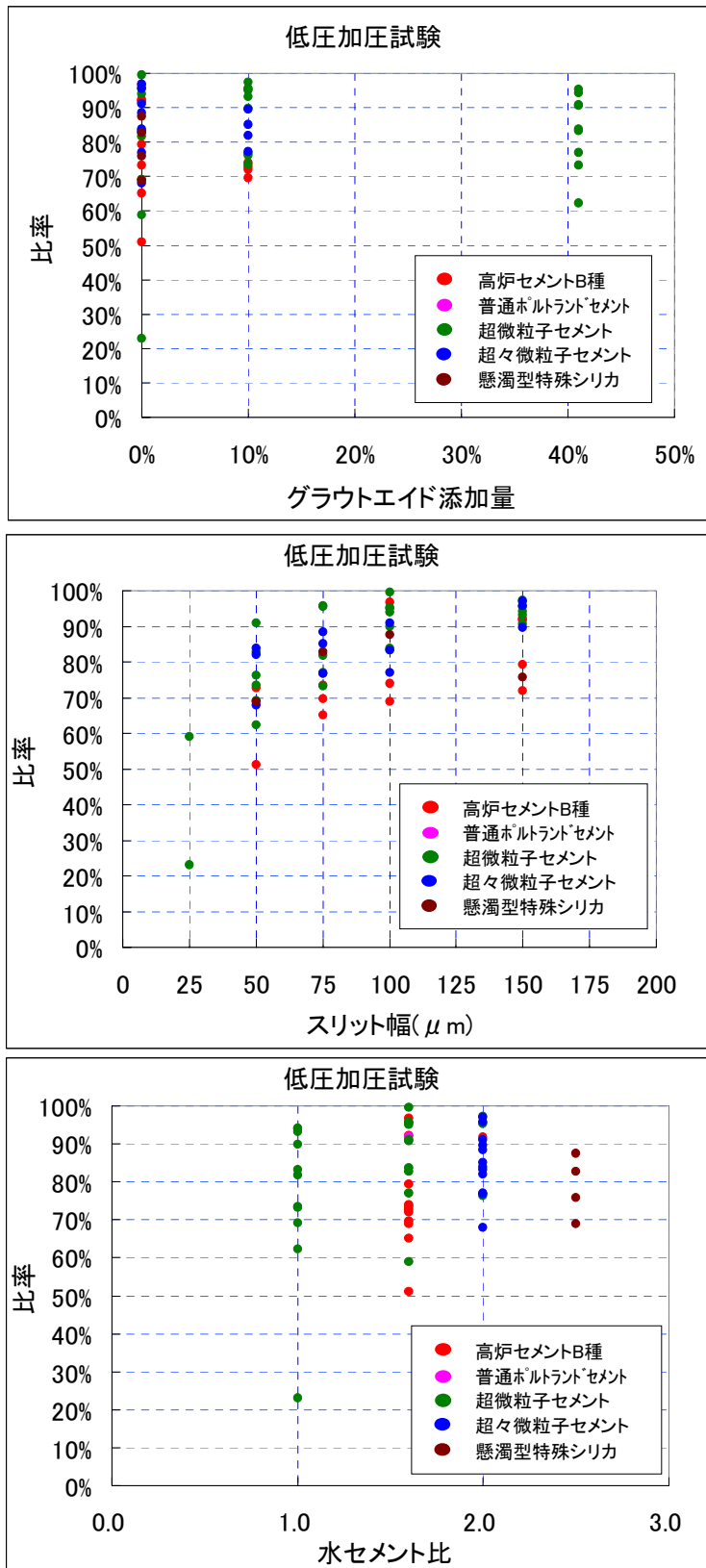
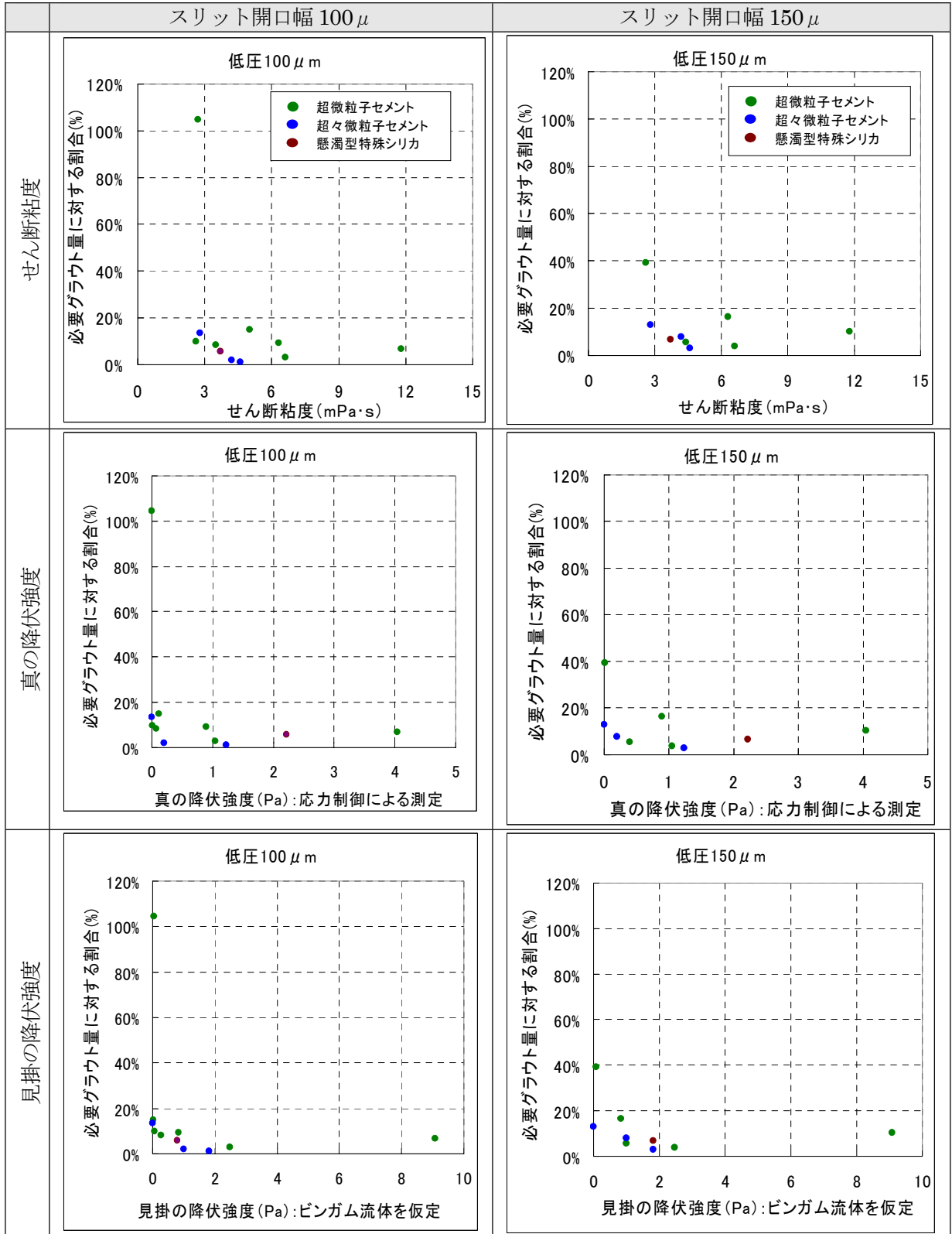


図 5.5-1 注入グラウト材比重に対する通過グラウト材比重の比率（低圧加圧試験）
 (上図：グラウトエド添加量の影響、中図：スリット開口幅の影響、下図：水セメント比の影響)

表 5.5-1 粘性特性と通過グラウト量比率の関係（低圧加圧試験）



5.5.2 高圧加圧試験

高圧加圧試験の結果、以下のことが判明した。

- ・ 同一条件（スリット開口幅、配合）に対する低圧加圧試験時の通過グラウト量と高圧加圧試験時の通過グラウト量の関係を図 5.5-2に示す（同一条件のケースのみを抽出していることに注意）。また、必要グラウト通過量に対する通過グラウト量比率に関する同様な図を図 5.5-3に示す。これらの図より、低圧加圧時に比べて、高圧加圧試験においては通過グラウト量が大きく増加しており、差圧を高めたことにより、特に圧力上昇仮定において、超微粒子セメント、超々微粒子セメント等の粒径の細かいグラウト材料の浸透性が大幅に向上したことがわかる。一方、高炉セメントについては粒径が大きいいため、差圧を高めたことによる通過グラウト量の増加量が比較的小さい。

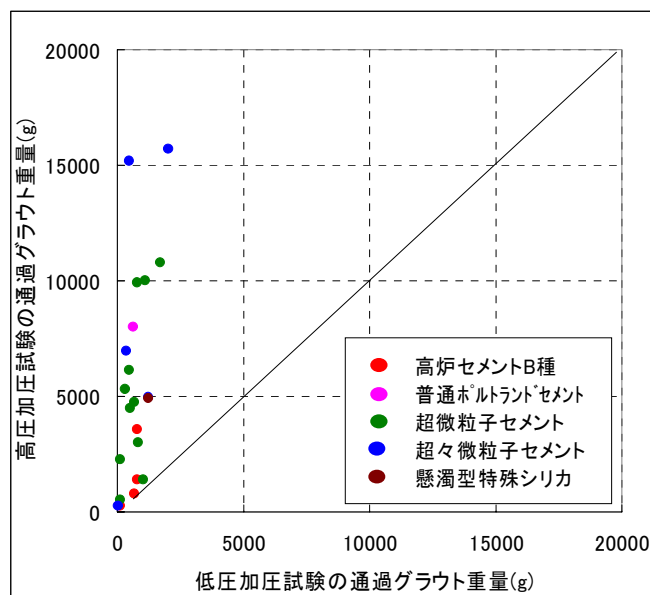


図 5.5-2 低圧加圧試験時と高圧加圧試験時の通過グラウト量の相関性

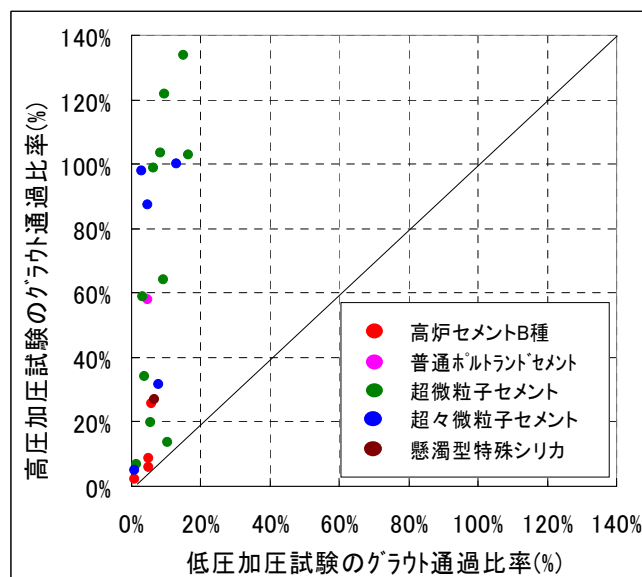


図 5.5-3 低圧加圧試験時と高圧加圧試験時の通過グラウト比率の相関性

- ・ 注入グラウトに対する通過グラウトの比重を比率で整理し、グラウトエイド添加量、スリット開口幅、水セメント比に関して図 5.5-4に示す。同図より、低圧加圧時と同様に全体的に高炉セメントの場合に、通過グラウトの比重が低下していることがわかる。次に、低圧加圧時の比重の比率と高圧加圧時の比重の比率の関係を図 5.5-5に示す。同図より、低圧加圧時に比べて高圧加圧時のほうが、通過したグラウトの比重が高く、より望ましい注入状況になっていることがわかる。このことは、低圧加圧状態に比べてフィルターケーキを壊すことにより、注入孔内における加圧脱水が防止されている可能性を示唆している。

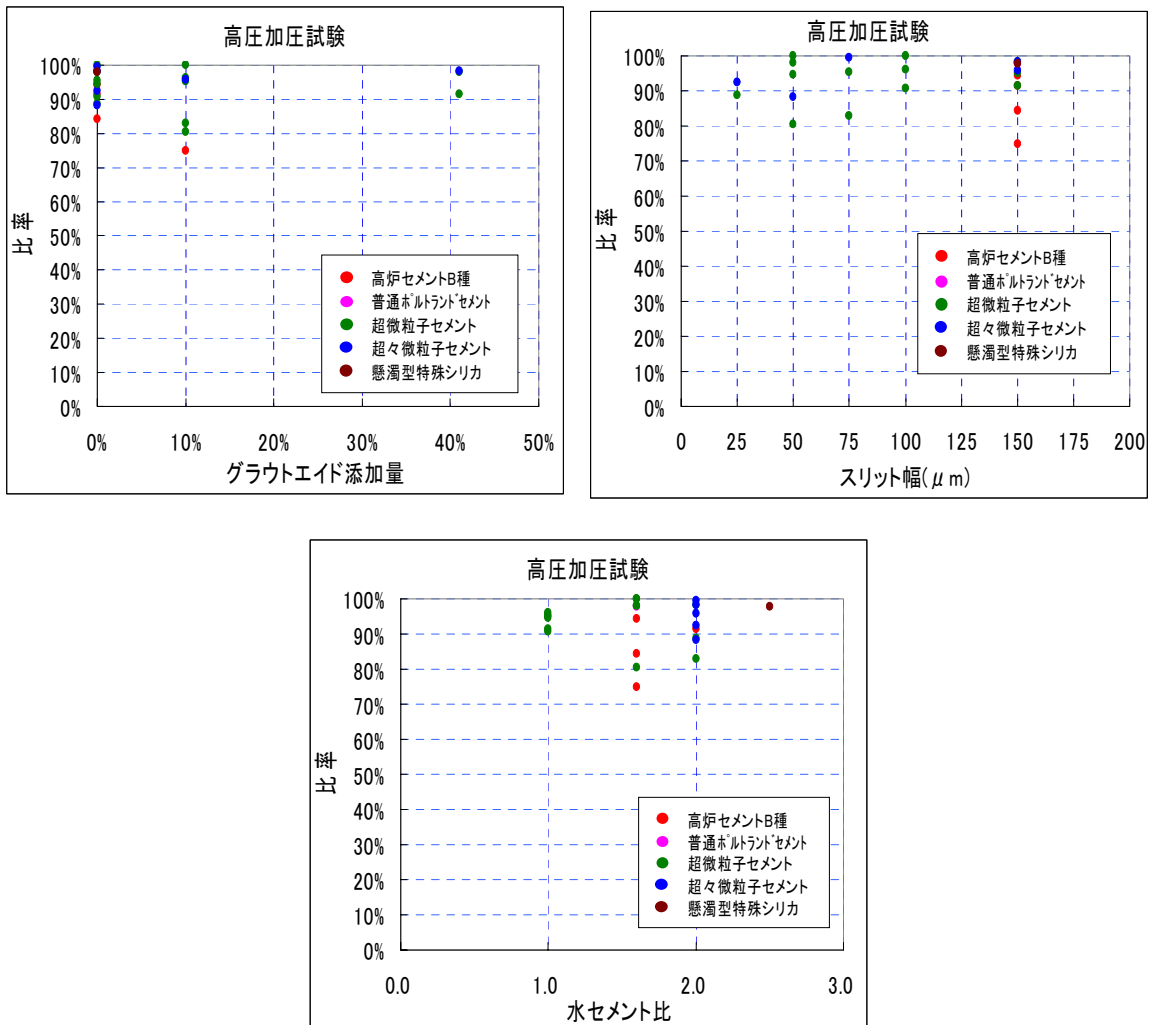


図 5.5-4 注入グラウト材比重に対する通過グラウト材比重の比率（高圧加圧試験）
 (上左図：グラウトエイド添加量の影響、上右図：スリット開口幅の影響、下図：水セメント比の影響)

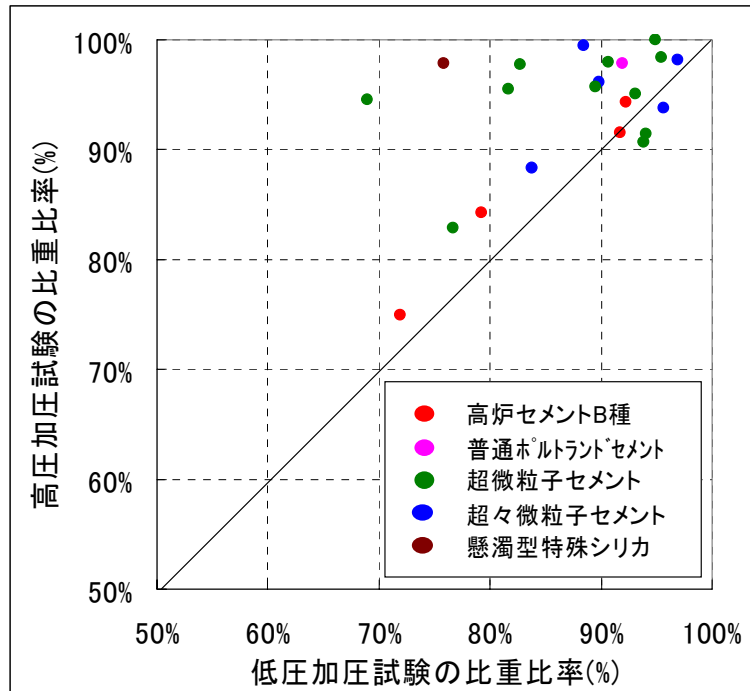


図 5.5-5 低圧加圧試験時と高圧加圧試験時の通過グラウト比重比率の相関性

- GA41%添加した配合は 150 μ に対しても必要グラウト量を通過しておらず、分散剤や攪拌方法を変更する必要があると言える。
- 超々微粒子セメントについては、低圧载荷時には超微粒子セメントより通過性能は劣っていたが、高圧载荷時には 5%分散剤を加えて水セメント比 2.0 のケースは、超微粒子 (1.6) より通過性能が若干すぐれていた。
- 高圧注入において通過したケースは、以下の2パターンに大別されると言える(表 5.5-2)。

表 5.5-2 グラウト材が通過するケース

通過パターン	スリット開口幅	グラウト材の粒径	粘性	通過状況
パターン1	小	小	小	フィルターケーキが発達するが、フィルターケーキにパイプ状の流路が発生しグラウトが通過する(例、F-00-16、50 μ 、図 5.5-6)。この流路は、試験装置の平面形状に依存してスリット長さが長い範囲に発生しやすいようである(図 5.5-7参照)。
パターン2	大	小	小	フィルターケーキが発達することなくグラウトが通過する(U-00-20N、150 μ)。

- 粘性特性と通過グラウト量比率の関係を、超微粒子セメント、超々微粒子セメント、懸濁型特殊シリカに関して図 5.5-8に示す。同図においては、全てのスリット開口幅が混在しているため、あくまで参考資料ではあるが、全体的にグラウト材料の降伏強度と通過グラウト比率の間には負の相関があることがわかる。

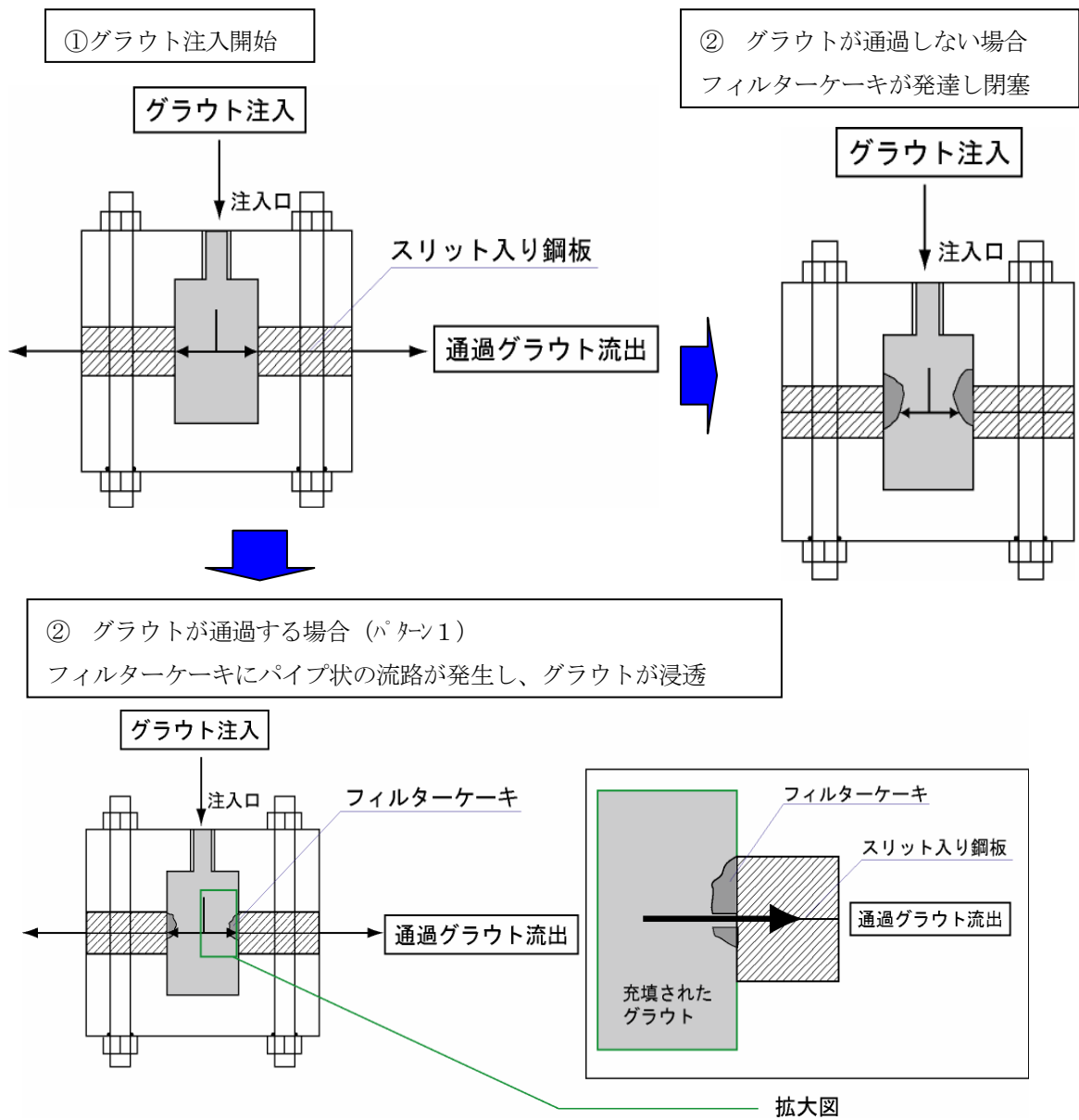


図 5.5-6 フィルターケーキとグラウト材通過の関係
(パターン1 の場合の推定メカニズム)

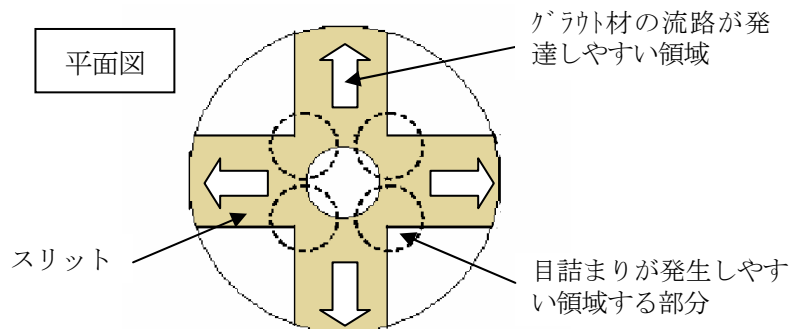


図 5.5-7 流路が発生しやすい範囲

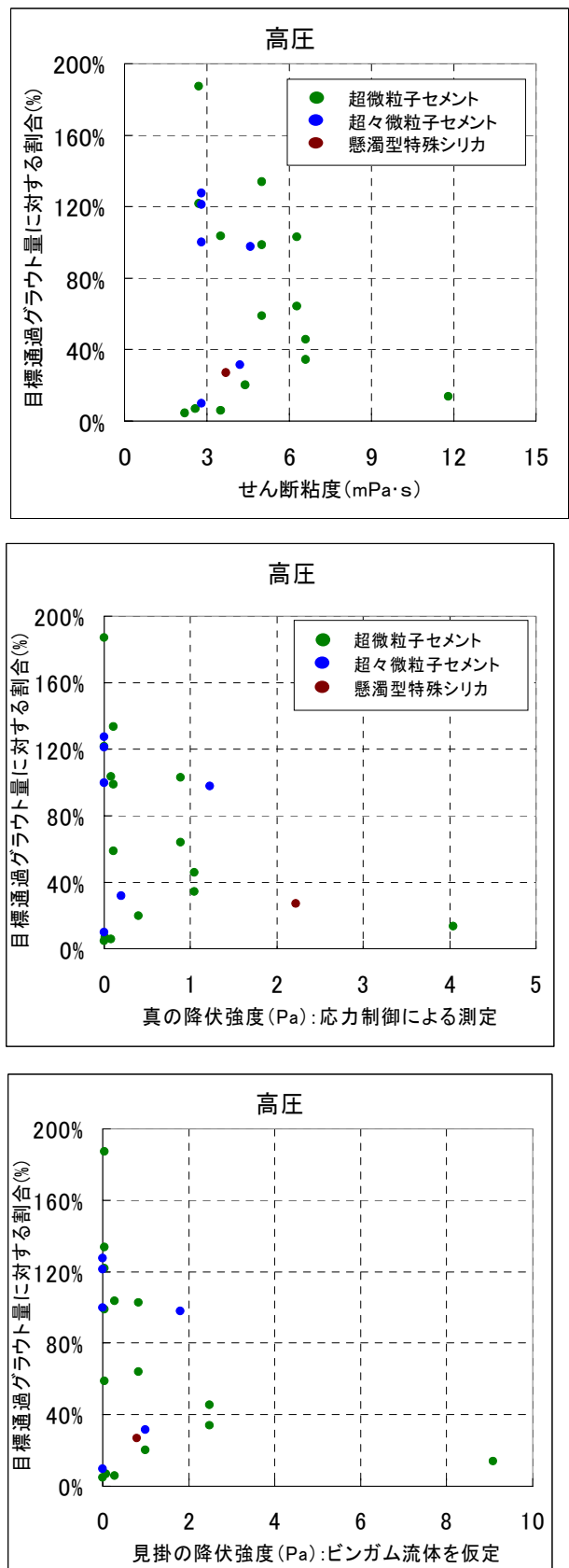


図 5.5-8 粘性特性と通過グラウト量比率の関係 (高圧加圧試験)
 (上図: せん断粘度、中図: 真の降伏強度、下図: 見掛の降伏強度)

6. 今後の研究の方向性の整理

本件においてこれまでに実施してきた研究成果の取りまとめを行い、解決すべき課題を抽出し、次年度以降の研究の方向性を整理する。

グラウト注入方法に関する既往研究を整理すると以下の通りとなる。

- ・ グラウトの浸透挙動に関する研究：国内では多数の浸透理論が提案されているが、現時点においては統一された理論が確立していない状況である。海外では、高濃度のグラウト材料に対して Lombardi や Stille による理論が体系化されているが、日本の岩盤への適用性については不明である。特に、彼らが使用しているグラウト材料は明らかなビンガム流体であり、ある程度の降伏強度を有することを前提としているが、日本のセメントと分散剤の組合せでは、降伏強度は発生しない場合が多い点が大きく異なる。
- ・ 配合切替に関する研究：西垣らが、複数亀裂におけるグラウトの浸透状況を研究することで配合切替の合理性を確認しているが、定量的な把握には至っておらず、開始する水セメント比、注入グラウト量、最終の水セメント比等に関する実証的な研究が必要である。
- ・ 亀裂入り口における目詰まり特性：西垣らの研究や Stille らの研究が実施されており、既に低圧状況についてはかなりの知見が得られている。但し、複数亀裂が存在する場合の目詰まり特性については、十分な検討が実施されていないのが現状である。
- ・ グラウトの停止基準に関する研究：Lombardi らによる GIN 理論が存在しダムグラウトにおいてはある程度適用されているが、地質条件による影響を考慮していないため、その汎用性については疑問視する意見もある。一方、Stille らが別途の研究が実施しており、今後もその動向を把握する必要があると言える。
- ・ 地質情報のモデル化に関する研究：Stille と Gustafson による研究がかなり体系化されているが、日本の岩盤条件に対する適用性については不明である。

また、平成 16 年度から開始した目詰まり試験の結果、単一亀裂における目詰まり特性について以下が判明している。

- ・ 注入圧力（差圧）を高めることにより、岩盤亀裂入り口においてグラウトが有意にろ過されること無く、所定のグラウト量が通過可能となり、グラウト浸透性能が大きく向上すること
- ・ 上記の高圧注入の効果がフィルターケーキ内のグラウト流路（パイプ状）の発生と関連している可能性があること

上記を考慮すると、図 6-1に示すように注入方法に関する今後の検討課題候補としては以下が挙げられる。

- 目詰まり特性の把握
- ・ フィルターケーキの生成とパイピング現象の詳細把握：亀裂入り口におけるフィルターケーキの生成過程及びパイピング現象を可視化し、推定したメカニズムを室内試験により確認する。具体的にはパイレックスガラス等の透明な材料を用いて、注入孔と岩盤亀

裂を模擬した供試体を製作し、低圧状態（0.1～0.2MPa 程度）におけるフィルターケーキの生成過程を目視により確認する。次に、圧力を可能な範囲で上昇させることにより、フィルターケーキが破壊される現象を目視により確認する。

- ・ フィルターケーキの物性の把握：高圧ポンプを新たに製作し、今年度使用した高圧目詰まり試験装置にグラウト材を注入し、フィルターケーキを生成させる。生成したフィルターケーキについて、その物性を測定する。上記の試験を、セメント材料、及びグラウト配合を変えて実施し、フィルターケーキの物性を把握することで、今年度実施した目詰まり試験の定量的な分析に利用する。
- ・ 複数亀裂の影響：実際の岩盤内の亀裂は単一ではなく、複数存在することから、注入孔内に複数亀裂が存在した場合の目詰まり現象を把握する。具体的には、今年度実施した目詰まり試験に使用した試験装置を改造し、複数亀裂を模擬する。同程度の亀裂が共存する場合、ある程度大きな亀裂と微小亀裂が共存する場合等について水セメント比を変えて試験を実施し、複数の亀裂が共存する場合の目詰まり特性を把握する。特に、水セメント比との関係について整理することで、以下に示す配合切替に関する研究の基礎データを蓄積する。
- 配合切替に関する研究
 - ・ 室内試験：上記の目詰まり試験により複数亀裂が存在する場合の目詰まり特性が把握された後に、細かい亀裂を水セメントの高い薄いグラウト材で改良した後に、水セメント比の低い濃い材料グラウト材で比較的大きな亀裂を改良することが可能かどうかを室内試験により確認する。
 - ・ 原位置試験：次に、①配合切替を実施する場合、②濃いグラウトから配合切替する場合、③配合切替しない場合について、原位置試験により止水効果に与える影響を把握するとともに、合理的なグラウト注入方法を目指して経済的な配合切替方法について検討する。
- グラウトの停止基準に関する研究
 - ・ 関連する研究（Stille らの研究等）動向をフォローするとともに、日本のグラウト材料や岩盤条件の特徴を考慮にいたった停止基準方法について検討する。特に、ダム押しの有効性について検討し、経済的なダム押し方法について検討する。
- 地質モデルの作成方法に関する研究
 - ・ 関連する研究動向をフォローし、原位置試験に適用可能な地質モデルの作成手法について検討する。

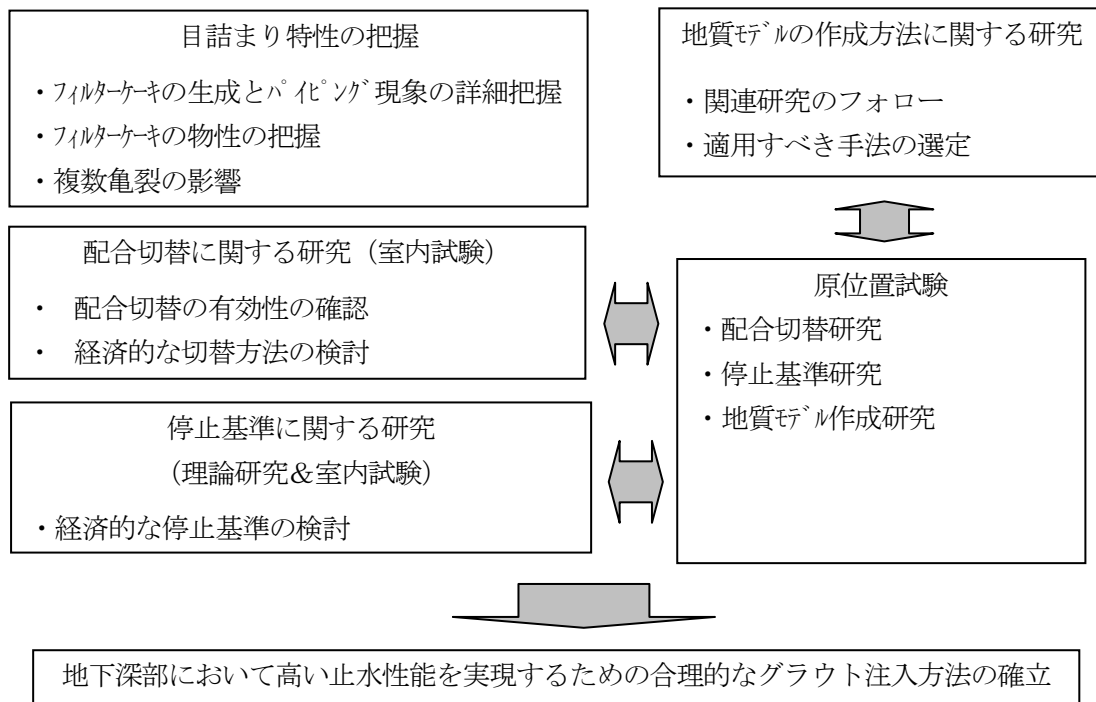


図 6-1 今後の研究の方向性 (案)

7. まとめ

本研究で実施した検討項目とその結果を以下に示す。

7.1 グラウト材料の基本物性の確認

粘性特性の検討や目詰まり試験に使用する適切な分散方法とグラウト配合を選定する目的で、分散方法に関する検討と基本物性確認試験を実施した。分散方法に関する検討の中では、まず適切な分散剤の種類と量を選定した後に、攪拌方法について検討した。その結果、シリカフュームスラリーを添加しない配合については、分散剤を無添加（高炉セメントB種）、或いはポリカルボン酸系を1.0%添加することとした。一方、シリカフュームスラリーを添加する配合については、十分な分散効果を得るために遅延剤入りのナフタリン系分散剤を2.5%添加することとした。また、攪拌方法については角型攪拌槽を使用することとした。次に、セメント材料として、普通粒径（高炉セメントB種、普通ポルトランドセメント）、超微粒子セメント、超々微粒子セメント、懸濁型特殊シリカを用い、シリカフュームスラリーの添加の有無及び添加量をパラメーターとした場合の基本特性を把握するための室内試験を実施した。

7.2 高粘性グラウト材料の粘性特性の検討

シリカフュームスラリーを添加した配合を含めて、様々なセメントグラウト配合の粘性をレオメーターにより測定した。その結果、シリカフュームスラリーを添加しない場合については、水セメント比が1.0の場合であっても適切な分散剤を使用することで、基本的にニュートン流体でモデル化可能であることが判明した。一方、シリカフュームスラリーを添加した場合はビンガム流体でモデル化でき、見掛の降伏値はシリカフュームスラリーの添加量により大きく影響されることが判明した。また、応力制御モードにより測定した真の降伏値は、ビンガム流動と仮定して算出した見掛の降伏値より有意に小さいが、定性的には上記と同様の傾向が確認された。

7.3 高圧目詰まり試験の実施

3章で選定した配合を用いて目詰まり試験を実施した。試験装置は、現実のグラウチングにおける注入孔と岩盤亀裂の関係を考慮して昨年度作成した目詰まり試験装置を大幅に改良した。低圧目詰まり試験（ $P=1\text{MPa}$ ）により、各配合とスリット幅の組合せに対する通過グラウト量を把握した後に、高圧目詰まり試験（注入圧力を階段状に 5MPa まで昇圧）を実施した。その結果、注入圧力を高めることによりスリット上に発生するフィルターケーキにグラウト流路が発生することによりグラウト材料の浸透性能は大幅に高まることが確認された。特に、超微粒子セメントを用いて水セメント比を1.6とした場合は、 $50\mu\text{m}$ （正確には、 $57.3\mu\text{m}$ ）に必要なグラウト量の1.8倍強通過することが確認された。また、通過したグラウトの比重は注入グラウトの比重とほぼ変わっておらず、スリット部において濾過されていないことが確認できた。

7.4 グラウト材料の浸透特性の整理と成果の取りまとめ

グラウト材料の浸透性に関する既往研究を調査するとともに、今年度までに実施してきた本研究の成果を整理した。その結果、注入方法に関する研究としては、目詰まり特性研究については、

フィルターケーキの生成過程、及びその物性、フィルターケーキ内に発生するパイピング現象、複数亀裂の場合における他の亀裂の影響等、が技術的課題として抽出された。また、上記を反映した形で配合切替に関する研究、グラウト停止基準に関する研究、地質モデルの作成方法に関する研究、が必要となることがわかった。これらの研究の進め方として、関連する類似研究のフォロー、理論的研究の実施、室内試験の実施、と平行して原位置試験を実施し、適宜原位置試験結果を反映するという研究の方向性について示した。

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	エクスト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ⁻¹ ・m ¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	1m/m ²	m ² ・m ⁻³ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ¹ ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ¹ ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =kg ¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	''	1''=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1海里=1852m
ノット	ノット	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≙10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位系に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	lx	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロ	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

