

可塑性グラウト材料の高機能化と
充填メカニズムに関する研究

阿部 智彦

目次

第1章	序論	1
1.1.	研究の背景	1
1.2.	研究の目的	3
1.3.	論文の構成	4
第2章	可塑性グラウト材料の概要と既往の研究	7
2.1.	可塑性グラウト材料の概要	7
2.1.1.	概要	7
2.1.2.	可塑性グラウト材料の用途	9
2.1.3.	可塑性グラウト材料の品質規格	10
2.1.4.	可塑性グラウト材料の種類	13
2.2.	可塑性グラウト材料に関する既往の研究	16
2.2.1.	フライアッシュを混合した可塑性グラウト材料に関する研究	16
2.2.2.	中性系材料を使用した可塑性グラウト材料に関する研究	17
2.2.3.	巨礫地盤の充填固化に関する既往の研究	18
2.3.	混和材を大量に混合したモルタル・コンクリート材料に関する既往の研究	21
2.4.	グラウト材料のレオロジー性状に関する既往の研究	22
第3章	可塑性グラウト材料における配合設計手法の高度化	26
3.1.	はじめに	26
3.2.	基礎的な検討	26
3.3.	使用材料	27
3.4.	本材料の代表的な配合例	28
3.5.	本材料の施工方法	29
3.6.	各材料の添加量を変化させた場合の性状確認試験	32
3.6.1.	はじめに	32
3.6.2.	試験配合	32
3.6.3.	試験項目	32
3.6.4.	材料の練混ぜ方法	33
3.6.5.	試験結果	34
3.7.	試験結果を踏まえた各材料配合の決定手法	35
3.8.	まとめ	38
第4章	環境負荷の低減を目的とした可塑性グラウト材料の開発	40
4.1.	開発の経緯	40
4.2.	可塑性グラウト材料の周辺水のpH上昇に関する基礎的な確認試験	41
4.2.1.	試験概要	41

4.2.2.	試験方法	41
4.2.3.	試験結果	43
4.3.	周辺水の pH を上昇させる諸要因の確認試験	46
4.3.1.	試験概要	46
4.3.2.	試験方法	46
4.3.3.	水セメント比および単位セメント量による影響の確認	48
4.3.4.	混和材の混合による影響の確認	51
4.3.5.	まとめ	53
4.4.	基礎的な検討	54
4.4.1.	既往の低アルカリ性固化材に関する研究	54
4.4.2.	セメント系材料における pH 上昇のメカニズム	54
4.4.3.	使用材料の検討	55
4.5.	試験配合および試験の流れ	57
4.6.	試験方法	60
4.6.1.	材料の練混ぜ方法	60
4.6.2.	試験項目	60
4.7.	試験結果	63
4.7.1.	Step 1	64
4.7.2.	Step 2	65
4.7.3.	Step 3	66
4.7.4.	Step 4	67
4.7.5.	Step 5	68
4.8.	最適な配合の選定	69
4.9.	まとめ	70
第 5 章	巨礫地盤への充填に適した充填材料に関する基礎検討	72
5.1.	はじめに	72
5.2.	巨礫地盤における理想的な充填形態	72
5.3.	円管を鉛直下方に流れる可塑性グラウト材料の流動モデル	74
5.4.	巨礫地盤の充填に求められる性状	76
5.5.	まとめ	77
第 6 章	巨礫間隙への充填に適した可塑性グラウト材料の開発	79
6.1.	はじめに	79
6.2.	既存の可塑性グラウト材料における試験結果	79
6.2.1.	試験概要	79
6.2.2.	試験方法	79
6.2.3.	試験結果	81

6.2.4.	試験結果のまとめ.....	83
6.3.	フレッシュ状態における引張強さの評価方法.....	84
6.4.	水中でのフレッシュ状態における引張強さの向上を目指した配合の開発.....	87
6.4.1.	試験配合および試験の流れ.....	87
6.5.	材料の練混ぜ方法.....	89
6.6.	試験項目.....	89
6.7.	試験結果.....	93
6.7.1.	基本配合における試験結果.....	93
6.7.2.	圧縮強度.....	93
6.7.3.	ベーンせん断強さとフロー値の関係.....	94
6.7.4.	引張強さ.....	94
6.7.5.	加圧ブリーディング率.....	95
6.7.6.	シリカフェームおよびベントナイトの混和による影響.....	97
6.8.	巨礫地盤の充填において最適な配合の選定.....	98
6.9.	まとめ.....	100
第7章	巨礫地盤に対する可塑性グラウト材料の充填モデルの提案.....	102
7.1.	はじめに.....	102
7.2.	巨礫地盤のモデル化.....	103
7.2.1.	間隙を円管で模擬したモデルの提案.....	103
7.2.2.	巨礫地盤のモデル化の流れ.....	103
7.3.	配合選定に必要なパラメータ.....	107
7.4.	配合選定に必要とする材料パラメータの算出.....	109
7.5.	提案した配合によって適用可能な巨礫地盤.....	112
7.6.	まとめ.....	114
第8章	結論.....	116

第1章 序論

1.1. 研究の背景

「グラウト」とは、JIS A 0203「コンクリート用語」によれば、「空隙、目地、ひび割れなどの細かい隙間を充填するために、注入用材料として用いるセメントペーストまたはモルタル」と定義されている。また、地盤改良を目的として地盤に水ガラス等を主材とした薬液を注入する薬液注入工法¹⁾に用いる注入材料も「グラウト」と呼ばれる。さらには、「細かい隙間」に限らず、例えばトンネルの覆工背面等に生じた比較的大きな空洞、空隙に対する注入材料²⁾に対しても「グラウト」が用いられる。

一概に「グラウト」といっても、その主材料からして、セメントに限られるものではなく、用途によっては水ガラスといった薬液¹⁾や、樹脂系の材料³⁾が用いられる場合がある。また、用途についても、コンクリートの補修補強⁴⁾や、地盤改良、構造物の背面に生じた空洞、空隙充填など多種にわたる。さらには、それぞれの用途、目的に応じて、その「グラウト」に求められる性状もまた多種多様であり、これまでも数多くの「グラウト」が開発され、それぞれの目的に供されている。

近年、社会資本の老朽化が大きな問題となっている。社会経済活動の基盤となるインフラの多くが、高度経済成長期以降に整備されたものであり、今後、建設から50年以上経過する施設が加速度的に増加する見込みである⁵⁾。さらに、近年、豪雨災害が激甚化、頻発化するとともに、巨大地震のリスクも切迫している中、防災、減災に重要な役割を果たすインフラもまた老朽化が急速に進んでおり、社会資本の維持補修、耐震補強が大きな課題となっている。

「グラウト」はこの社会資本の維持補修、耐震補強に欠かすことのできない材料である。

例えば、老朽化したコンクリートに生じたひび割れの補修として実施されるひび割れ注入工法⁶⁾では、普通ポルトランドセメントより粒子の細かい、超微粒子セメントと呼ばれるセメントを用いた注入材料（グラウト）や、エポキシ樹脂、アクリル樹脂等を主材とした注入材料が使用される。また、老朽化したコンクリート構造物において剥落や劣化部の除去により欠損した箇所を修復する断面補修工法においては、欠損部に型枠を設置してポリマーセメントモルタル等のグラウトを充填する充填工法⁴⁾が用いられる場合がある。この他、鉄筋コンクリート橋脚等の耐震補強として施工される鋼板巻き立て工法においては、コンクリート躯体と鋼板との間に、無収縮モルタル等の「グラウト」が充填される。このように、老朽化したコンクリート構造物の維持補修において、さまざまな場面で「グラウト」が用いられる。

可塑性グラウト材料²⁾は、比較的大きな（数 cm～数十 cm）空洞、空隙の充填材料として開発された「グラウト」である。可塑性グラウト材料は、レオロジー特性としては擬塑性流体もしくはビンガム流体に該当し（図 1.1 参照）、ポンプで押されると空洞・空隙をくまなく充填するのに必要な「軟らかさ」を発現し、ポンプが止まると充填範囲を限定す

るのに必要な、もしくは狭い隙間から漏れ出さない程度の「硬さ」を発現する（写真 1.1 参照）。このような性状を「可塑性」と呼び、一般的にはこの可塑性と呼ばれる性質に加え、水中不分離性（静水中で分離しない程度）および低収縮性（材齢 28 日で収縮率 2%以下）を有するグラウトを特に「可塑性グラウト材料」と呼ぶ。

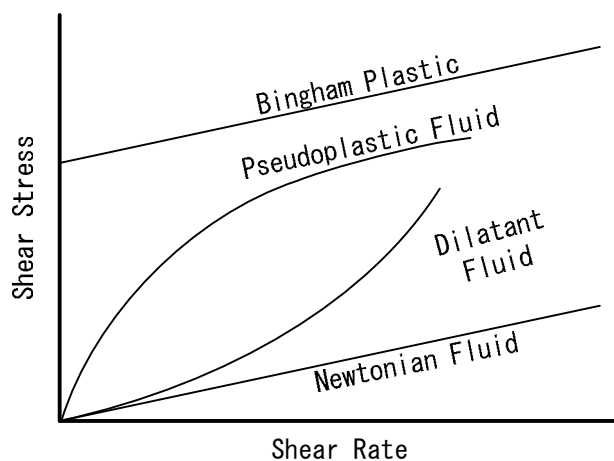


図 1.1 各種流体のせん断速度とせん断応力の関係



【流動状況】

【自立状況】

写真 1.1 可塑性グラウト材料の流動性と自立性⁷⁾

可塑性グラウト材料は、これらの性状により、限定注入（ある特定の範囲にグラウトを留まらせる注入）を可能とする。これによって比較的大きな空洞、空隙であっても、充填を不必要とする範囲へのグラウト材料の広がり抑制できる。また水が存在する環境下でも注入が可能であり、さらに硬化後の収縮が小さいことから、これまで主に既設トンネル覆工背面に生じた空洞を充填するのに最適な材料として多く用いられてきた。

可塑性グラウト材料の品質規格としては、高速道路会社各社により制定された品質規格（「矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領」に記載の「背面空洞注入材の品質規格」、以下 NEXCO 規格と記す）がある⁸⁾。これは、高速道路の維持補修として実施される、トンネルの覆工背面の空洞充填工事に可塑性グラウト材料を適用するにあたっての、材料の品質規格を定めたものである。この品質規格を満足する材料として、これまで多くの可塑性グラウト材料が開発されてきた。

しかし、この NEXCO 規格は、あくまでトンネルの覆工背面に生じた比較的大きな空洞・空隙（数 cm～数十 cm 程度）の空洞充填に最適な性状（流動性）を品質規格としている。また、あくまで覆工背面の裏込め充填の位置づけであり、材料に求められる強度も一般的なコンクリート構造物に比べるとかなり小さい（ 1.5N/mm^2 以上）。このようなことから、これ以外の用途（例えば、数 mm～数十 mm 程度の小間隙の充填、水中での打設、強度を必要とする構造物の補強、巨礫地盤への充填等）には適さない場合があった。

可塑性グラウト材料が持つ性状（可塑性、水中不分離性、低収縮性）は、トンネルの覆工背面の空洞充填以外の用途で活用できる可能性があり、さまざまな用途に応じた最適な配合を容易に設計可能となるよう、配合設計手法の高度化をはかることで、可塑性グラウト材料の適用範囲の拡大がはかれると考えられる。

1.2. 研究の目的

本研究は可塑性グラウト材料の適用範囲の拡大を大きな目的とし、具体的には下記項目について研究を行った。

一つ目として、これまでに開発された可塑性グラウト材料の多くは、NEXCO 規格を満足するよう微妙なバランスの元、配合設計されており、例えば流動性を変化させたり、強度を大きくしたりといった調整が難しい場合が多かった。そこで、できるだけ容易に流動性や強度を変更可能な新しい可塑性グラウト材料の開発を目的とした。

二つ目として、河川や湖沼等においてセメント系材料を使用すると、周辺水の pH が上昇する懸念がある。これはセメントを主材料とした可塑性グラウト材料においても例外ではない。そこで、河川や湖沼等の充填において、周辺水の pH の上昇を抑制できる可塑性グラウト材料の開発を目的とした。

三つ目として、巨礫地盤の充填における課題を挙げた上で、最適な配合について開発することを目的とした。

最後に、巨礫地盤を単純化したモデルを提案し、巨礫地盤の充填に最適な配合選定の一助とすることを目的とした。

これらの研究を通して、可塑性グラウト材料について、さまざまな用途に応じた配合設計の高度化および高機能化を行い、適用範囲の拡大をはかることを目的とした。

1.3. 論文の構成

本論文は全8章で構成される。各章の概要は以下のとおりである。図 1.2 に本論文の構成を示す。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を述べるとともに、本論文の構成を示した。

第2章「可塑性グラウト材料の概要と既往の研究」では、可塑性グラウト材料の概要を述べるとともに、可塑性グラウト材料に関する既往の研究、混和材を大量に混合したモルタル・コンクリート材料に関する既往の研究、およびグラウト材料（モルタル・コンクリート材料も含む）のレオロジー性状に関する既往の研究について調査し、まとめた。

第3章「可塑性グラウト材料における配合設計手法の高度化」では、既存の可塑性グラウト材料の課題（強度や流動性の調整といった配合調整が難しい）を示した上で、他の性状を損なわずに流動性や強度の変更が容易な可塑性グラウト材料の開発について述べた。

第4章「環境負荷の低減を目的とした可塑性グラウト材料の開発」では、河川や湖沼等において可塑性グラウト材料を含むセメント系材料を充填した場合の課題（水和反応による硬化過程における周辺水の pH の上昇）について示した上で、周辺水の pH の上昇を抑制できる可塑性グラウト材料の開発について述べた。

第5章「巨礫地盤への充填に適した充填材料に関する基礎的な検討」では、巨礫地盤への充填における理想的な充填形態について示し、可塑性グラウト材料の流動モデルから、可塑性グラウト材料を適用することによって理想の充填形態となる可能性があること、さらに高品質な充填を行うために必要とされる性状について述べた。

第6章「巨礫地盤への充填に適した可塑性グラウト材料の開発」では、第5章で示した、可塑性グラウト材料を高品質に充填するために求められる性状を踏まえ、より適した配合の開発について示した。

第7章「巨礫地盤に対する可塑性グラウト材料の充填モデルの提案」では、第5章で示した、巨礫間隙に対して可塑性グラウト材料を充填するにあたって必要とされる性状を踏まえ、巨礫の間隙を円管のネットワークにモデル化した上で、巨礫の大きさや間隙率に応じて、最適な充填に必要とされるレオロジー特性（ビンガム塑性における降伏値）を求める手法を提案し、第6章の成果も踏まえ、配合例を示した。

第8章「結論」では、本研究の成果を総括するとともに、今後の課題について述べた。

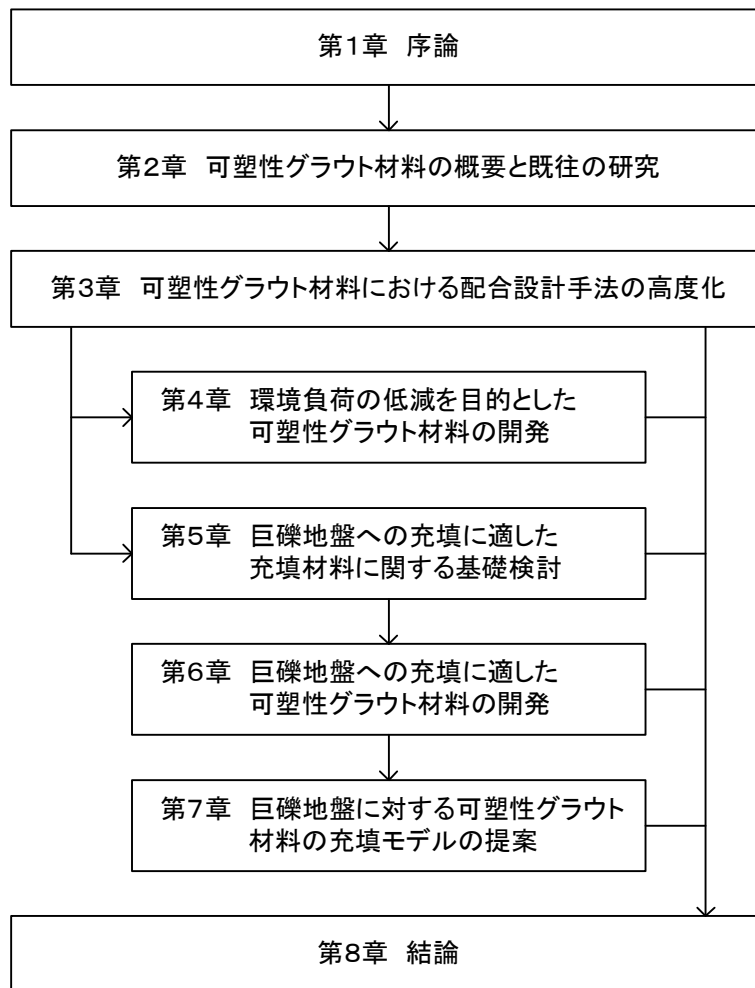


図 1.2 論文の構成

第1章の参考文献

- 1) 地盤工学会編：地盤工学・実務シリーズ 27 薬液注入工法の理論・設計・施工、丸善出版、2009
- 2) 三木五三郎ほか：可塑状グラウト注入工法、日刊建設工業新聞社、2001
- 3) 長束勇ほか：トンネル空洞への現場発泡硬質ウレタンフォーム充填による機能回復技術、水土の知、Vol.82、No.4、p.309-312、2014
- 4) セメント協会：すぐに役立つセメント系補修・補強材料の基礎知識、技報堂出版、2011
- 5) 国土交通省：国土交通白書 2021 第2章 第2節 災害リスクの増大や老朽化インフラの増加、2021
- 6) 日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針 2022、2022
- 7) 日特建設株式会社：パフェグラウト工法カタログ
- 8) 東日本高速道路株式会社ほか：矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領、NEXCO 中央研究所、2009

第2章 可塑性グラウト材料の概要と既往の研究

2.1. 可塑性グラウト材料の概要

ここでは、日本において一般的に可塑性グラウト材料と呼ばれる注入材料の概要について示す。

2.1.1. 概要

一般的に、土質基礎構造物は地盤と構造物が一体化してその機能が発揮できるように設計されている。そのため、例えば地震や地盤沈下、経年的な土砂の流出といった何らかの影響によって、地盤と構造物の間に隙間が生じた場合、その機能が発揮できなくなる可能性があり、その隙間を何らかの方法で埋める必要が生じる。また、過去に防空壕や炭鉱など、人為的に掘削されて生じた地下空洞や、自然にできた地下空洞によって、地盤沈下が生じ、上部構造物等への影響が懸念される場合も、その空洞を何らかの方法で埋める必要が生じる。

このような空洞を埋める方法として、ある程度の流動性を持った充填材料を細い注入管を通して空洞に送ることで、空洞を埋める方法がある。これは一般的に「空洞充填注入」と呼ばれ、特に構造物の背面等に生じた空洞、空隙に対する注入は「裏込め注入」¹⁾と呼ばれる。

この空洞充填注入に用いられる充填材料には、細い注入管で送ることができる程度の流動性が求められ、従来は主に「流動性グラウト材料」と呼ばれる材料が使用されてきた。この流動性グラウト材料には、セメントスラリーやモルタル、それらに空気を混入したエアミルク、エアモルタルといった材料や、セメントスラリーにベントナイトを混合したセメントベントナイトグラウトと呼ばれる材料等がある。

流動性グラウト材料は、その流動性によって空洞、空隙の隅々まで充填できるという利点がある一方、充填対象範囲外へ材料が逸走することで必要とする箇所への充填が不十分となる、配合によっては大きくブリーディングする、地下水、湧水によって材料が希釈され、必要な強度が発現しない、といった問題が生じる可能性がある。そこで、これらの問題点を解消できる空洞充填材料として開発された材料が「可塑性グラウト材料」²⁾である。

可塑性グラウト材料は、レオロジー特性としては擬塑性流体もしくはビンガム流体に該当し、ポンプで押されると空洞・空隙をくまなく充填するのに必要な「軟らかさ」を発現し、ポンプが止まると充填範囲を限定するのに必要な、もしくは狭い隙間から漏れ出さない程度の「硬さ」を発現する。このような性状を「可塑性」と呼び、一般的にはこの可塑性と呼ばれる性質に加え、水中不分離性（静水中で分離しない程度）および低収縮性（材齢 28 日で収縮率 2%以下）を有するグラウトを特に「可塑性グラウト材料」と呼ぶ。なお、この「可塑性」と呼ばれる性状は、「可塑状」と呼ばれることもあるが、本論文では「可塑性」という呼び方に統一している。

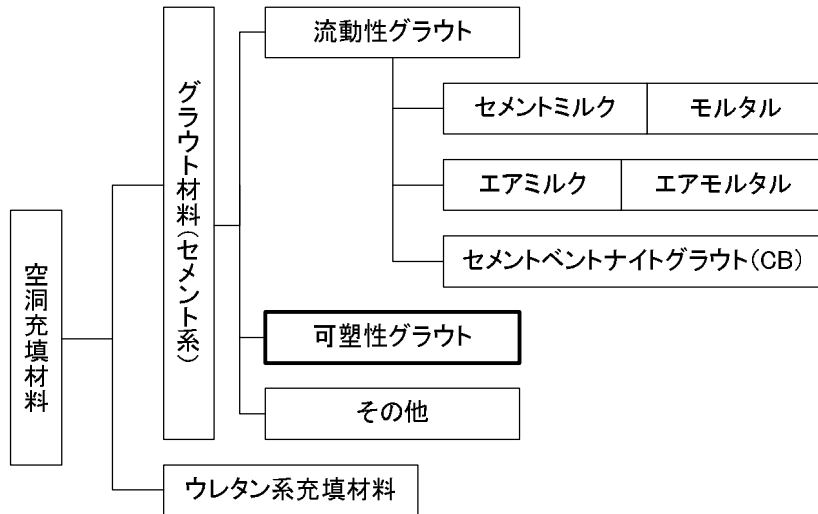


図 2.1 空洞充填材料の分類



写真 2.1 流動性グラウトの例 (φ80mm シリンダーフロー)



【静置】

【15回打撃後】

写真 2.2 可塑性グラウトの例 (φ80mm シリンダーフロー)

写真 2.1 および写真 2.2 に、流動性グラウト材料および可塑性グラウト材料のフロー試験の写真を示す。この流動性グラウト材料は、W/C=50%のセメントミルクに高性能 AE 減水剤を添加したグラウト材料であり、主にグラウンドアンカー工やロックボルト工における定着材として用いられる配合である。この可塑性グラウト材料は後述する NEXCO 規格を満足した、一般的な可塑性グラウト材料である。また、これらの写真は $\phi 80\text{mm}$ 、高さ 80mm のシリンダーを用いたフロー試験の状況であり、流動性グラウト材料については、シリンダーを引き上げた直後の状況、可塑性グラウト材料については、シリンダーを引き上げた直後と、モルタルフロー試験機によって 15 回の打撃を加えた後の状況である。これらの写真から、可塑性グラウトは静置状態ではほぼ自立し、振動を加えることで容易に流動する様子がわかる。

可塑性グラウト材料は、この可塑性、水中不分離性、低収縮性といった性状から、主に補修補強として施工されるトンネルの覆工背面空洞の充填材料として、多く適用されてきた。これは、可塑性グラウト材料を覆工背面空洞に注入した場合、覆工コンクリートのクラック等からの漏出が抑制できること、水中不分離性によりある程度の湧水があっても注入可能であること、注入固化後の収縮が少ないこと等による。近年は、可塑性グラウト材料が持つ性状（可塑性、水中不分離性、低収縮性）を生かし、トンネルの覆工背面の空洞充填以外の用途でも適用される例が多くなっている。

2.1.2. 可塑性グラウト材料の用途

可塑性グラウト材料は、当初、シールド工法におけるテールボイドの注入材料として開発された²⁾。シールドのテールボイドの注入では、シールドトンネルの外で材料を練り混ぜ、配管等で長距離圧送できる材料が望ましく、また注入後はすみやかに地山相当以上の強度 ($0.02\sim 0.1\text{N/mm}^2$) を発現することが求められる。

そこで、A 液としてセメントベントナイトグラウト液、B 液として水ガラスを使用し、それぞれ別々に圧送し、注入箇所の直前でこれらの 2 液を合流させることで可塑性を発現させる材料、施工方法が開発された。この材料は、A 液、B 液ともに高流動性の材料であることから長距離圧送が可能であり、2 液混合後は、瞬時に可塑性を発現し、さらに配合によっては 1 時間程度で 0.1N/mm^2 程度の強度を発現することから、現在では、ほぼすべてのシールド注入の現場で採用されている。

この水ガラスを使用した可塑性グラウト材料は、シールドのテールボイドの注入に対しては適した材料であったが、可塑性の保持時間が短く、比較的大きな空洞の充填には適さないこと、水ガラスを使用することから長期的には強度低下が懸念され、基本的に補修補強を目的とした他の用途には適用されてこなかった。

その後、起泡剤によってモルタルに数十%の空気を混合したエアモルタルに、特殊アルミニウム塩を可塑剤として添加することにより可塑性を発現させる材料が開発された²⁾。この材料は、可塑性の保持時間が長く、長期的な強度低下も起こさないことから、主に補

修補強として施工される既設トンネルの覆工背面空洞の充填材料として多く施工されるようになった。

その後、可塑性を発現させる材料として粘土鉱物系の材料を使用するものや高分子系の材料を使用するものなど、可塑のメカニズムの異なる可塑性グラウト材料が各種開発され、それに伴い、可塑性グラウト材料が適用される用途も広がってきた。



図 2.2 可塑性グラウト材料の用途³⁾

可塑性グラウト材料の用途としては、従来から適用されてきた、道路トンネルや導水路トンネル等の既設トンネル覆工背面の空洞注入に加え、河川護岸や既設のり面の背面空洞に対する注入、さらに近年コンクリート構造物並みの高強度を発現する可塑性グラウト材料が開発されたことから、堰堤等の河川構造物の基礎やグラウンドアンカーの定着材として適用される例もある。

2.1.3. 可塑性グラウト材料の品質規格

可塑性グラウト材料の品質規格としては、高速道路会社各社により制定された品質規格

（「矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領」記載の「背面空洞注入材の品質規格」、以下 NEXCO 規格と記す）がある⁴⁾。これは、高速道路の維持補修として実施される、トンネルの覆工背面の空洞充填工事に可塑性グラウト材料を適用するにあたっての、材料の品質規格を定めたものである。

この NEXCO 規格が策定されたのは、先に示した補修補強を目的として開発された特殊アルミニウム塩系の材料が、高速道路のトンネルにおける覆工背面の空洞充填材料として多く採用されるようになり、その後、後述する各種の可塑性グラウト材料（粘土鉱物系、高分子系等）が開発されたことで、改めて NEXCO 管内におけるトンネルの覆工背面空洞充填の材料に関する統一的な基準、品質等を定める必要が生じたためである。表 2.1 に「矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領」記載の「背面空洞注入材の品質規格」を示す。

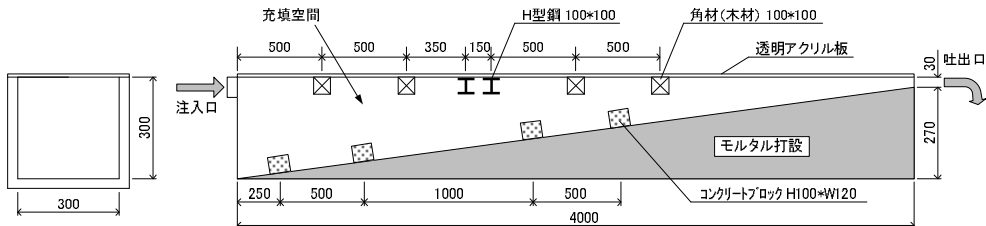
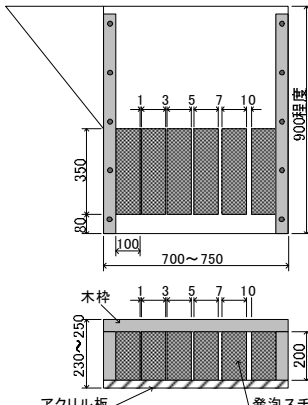
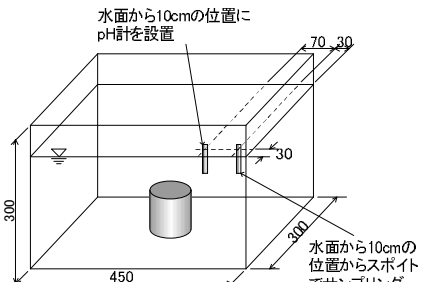
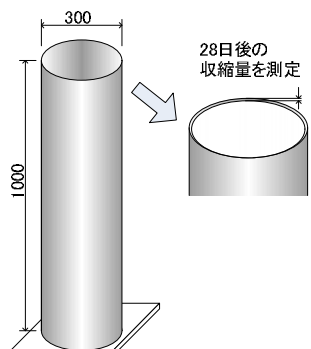
表 2.1 背面空洞注入材の品質規格（NEXCO 規格）⁴⁾

項目	規格項目	規格値	試験方法
流動性	フロー値 (静置時)	フロー値：80～155mm 60分後のフロー値：100mm以下	JIS 313 コンシステンシー試験方法のシリンダー法
	フロー値 (打撃時)	フロー値：130mm～205mm 60分後のフロー値：170mm以下	JIS R5201 フロー試験 フローコーンに代わって JIS 313 コンシステンシー試験方法のシリンダー法で適用する硬化プラスチック製シリンダーを用いる。
強度	一軸圧縮強度	$\sigma_{28}=1.5\text{N/mm}^2$ 以上	1. 供試体の作り方 JIS 313 の 3. 圧縮強度試験方法 (40mm×40mm×160mm) あるいは JSCE-F 561 (Φ50mm×100mm) とする。 2. 圧縮強度試験方法 JIS A 1108
比重	比重	エア系：1.1～1.2KN/m ³ エア系以外：1.1～1.5KN/m ³	質量法による
充填性	充填性	容器内全体に注入材が充填され角材やH型鋼との間にも隙間がなく密実に充填がなされていること	4.8 試験法による
非漏出性	隙間への非漏出性	60分経過後において5mm以下の隙間に完全流出があってはならないこと	
水中分離抵抗性	濁度	分光光度計により測定した光透過率の値により、濁り具合を確認する。水槽内に注入材を投入する前の水の測定値と、投入後60分経過後の水の測定値の増減比率が±2%であること。	
	PH	注入直後からの60分経過後のPH測定比率が±10%であること。	
非収縮性	収縮量	28日硬化後の収縮量が2cm以下であること	

この NEXCO 規格においては、空洞充填材料に求める性状として、流動性、強度、比重といった一般的な充填材の性状に加え、充填性、非漏出性、水中分離抵抗性、非収縮性といった、実際のトンネルの覆工背面空洞充填を想定し、所定の品質で確実な充填を行うために必要と考えられる性能を示していることに特徴がある。

これら（充填性、非漏出性、水中分離抵抗性、非収縮性）の性能を確認するための試験方法の概要を表 2.2 に示す。

表 2.2 覆工背面空洞注入材の適用性確認試験方法（案）4)

<p>【充填性試験】</p> <p>下図に示す試験装置に可塑性グラウト材料を所定の流量（30L/min 程度）で注入し、試験装置内の支障物（H 鋼、角材）の周辺にかけて、グラウト材料が隙間なく密実に充填がされるかどうかを確認する試験。</p> 	
<p>【非漏出性試験】</p> <p>右図に示す試験装置の左側のシュートからグラウト材料を 30L/min で 300mm の高さまで流し込む。1mm～10mm までの各隙間に入り込んだ（進入した）グラウト材料の深さを、注入後 10min、30min、60min で計測する。</p> 	
<p>【水中分離抵抗性試験】</p> <p>φ 80mm、高さ 80mm のフローコーンにグラウト材料を注ぎ、水槽内にフローコーンを入れ、素早くフローコーンを除去する。</p> <p>グラウト材料を水槽に投入する前、投入直後、および 10min、30min、60min 後の pH と濁度を計測する。</p> 	
<p>【非収縮性試験】</p> <p>φ 300mm、高さ 1000mm の硬質塩化ビニール管の下端を平板等で塞いだ容器を用意し、容器内の上端までグラウト材料を入れ、28 日経過後の収縮量を計測する。</p> 	

充填性試験は、トンネルの覆工背面空洞を充填するにあたり、空洞内に障害物等があった場合でも、密実な充填ができることを確認する目的で実施する試験である。NEXCO規格では、H鋼や角材の周辺に対して、グラウト材料が密実に充填されることを求めている。

非漏出性試験は、トンネルの覆工コンクリートにクラックが生じていることを想定し、グラウト材料を注入した際の、そのクラックからのグラウト材料の漏出の程度を評価することを目的とした試験である。施工上、グラウト材料が漏出するのは好ましくないことから、そのクラックを模擬した幅1mm～10mmのスリットを用いて、漏出の程度を評価する。NEXCO規格では、幅5mm以下のスリットにおいて、完全に流出しないこと（スリットの途中で流出が止まること）を求めている。

水中分離抵抗性試験は、トンネルの背面に湧水等が存在することを想定し、グラウト材料が湧水等によって希釈しないことを確認する目的で実施する試験である。NEXCO規格では、水中にグラウト材料を入れてから、60分間におけるpHと濁度の変化率が10%以内であることを求めている。

非収縮性試験は、空洞充填完了後のグラウト材料の硬化収縮の程度を評価することを目的とした試験である。NEXCO規格では、注入してから28日経過後の収縮量が2cm以下（2%以下）であることを求めている。

現在、可塑性グラウト材料として世の中に出回っている材料の多くは、これらの試験を実施し、NEXCO規格を満足していることを確認している。

2.1.4. 可塑性グラウト材料の種類

可塑性グラウト材料の種類についても、「矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領」⁴⁾にまとめられている。同要領ではTYPE1～6に分類し、それぞれのTYPEにおける代表的な配合を記載している（表2.3～表2.8参照）。なお、これらTYPE1～6の可塑性グラウト材料は、同要領は発刊された時点で、世の中に存在していた可塑性グラウト材料のうち、代表的な材料について示したものであり、同要領の発刊以後に開発され、これらTYPE1～6に該当しない可塑性グラウト材料も多く存在する。

表 2.3 可塑性グラウト材料（TYPE1） 1m³当たり

A液					B液		設計圧縮強度
空気量	セメント	水（希釈水【20倍】を含む）	細骨材	特殊起泡剤	可塑剤	水	
(%)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(N/mm ²)
43±5	288	226	577	1.27	22.62	27.2	1.5

表 2.4 可塑性グラウト材料 (TYPE2) 1m³ 当たり

A液					B液		設計圧縮強度
空気量	セメント	水	細骨材	起泡剤 (液体)	可塑剤 (液体)	水	
(%)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(N/mm ²)
40±5	300	230	600	16.8	30	-	1.5

表 2.5 可塑性グラウト材料 (TYPE3) 1m³ 当たり

セメント	ベントナイト	混和剤	水	設計圧縮強度
(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(N/mm ²)
350	285	8.4	774	1.5

表 2.6 可塑性グラウト材料 (TYPE4) 1m³ 当たり

セメント	細骨材	特殊増粘材	水	設計圧縮強度
(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(N/mm ²)
245	245	125	775	1.5

表 2.7 可塑性グラウト材料 (TYPE5) 1m³ 当たり

主材			添加材A		添加材B		設計圧縮強度
セメント	ベントナイト	水	可塑剤A	水	可塑剤B	水	
(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(N/mm ²)
300	300	720	3	32	15	30	1.5

表 2.8 可塑性グラウト材料 (TYPE6) 1m³ 当たり

A液		B液		設計圧縮強度
可塑性セメント	水	可塑剤	水	
(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(N/mm ²)
400	200	89	633	1.5

可塑性を発現させるメカニズムは、主として使用される材料によって異なり、下記のとおりであるとされている²⁾。

(1) アルミニウム塩系

弱酸性を示すある一定濃度以上のアルミニウム塩溶液は、セメント等のアルカリに接すると瞬時に含水水酸化アルミニウムゲルを生成する。この反応を利用したのが、アルミニ

ウム塩系の可塑性グラウトである。使用されるアルミニウム塩としては、ポリ塩化アルミニウムや硫酸アルミニウム等があるが、実際に可塑性グラウト材料に用いられるのは、これらのアルミニウム含有量、pH等を調整したものである。

表 2.3 および表 2.4 に示した、TYPE1 および TYPE2 がアルミニウム塩系の可塑性グラウト材料に該当する。

(2) 粘土鉱物系

粘土鉱物系の可塑性グラウト材料には、主にモンモリナイト粘土鉱物が使用される。このモンモリナイトは水に接すると著しく膨潤し、コロイドとなり、著しい粘性とチクソトロピー性を示す。このモンモリナイト溶液にセメントを加えると、セメント中のカルシウムイオン Ca^{2+} がモンモリナイト粒子表面に吸着し、電気化学的作用によりゲル化反応を起こす。

表 2.6 および表 2.8 に示した、TYPE4 および TYPE6 が粘土鉱物系の可塑性グラウト材料に該当する。

(3) 高分子系

高分子系の可塑性グラウト材料には、特殊吸水性樹脂（吸水性ポリマー）を使用したものや、増粘性のポリマーを使用したもの、高分子凝集剤を使用したものなどがある。高分子系の場合、高分子材料単独での適用は難しく、何らかの助材（剤）を加えることが一般的である。

表 2.5 および表 2.7 に示した、TYPE3 および TYPE5 が高分子系の可塑性グラウト材料に該当する。

なお、第3章において示す可塑性グラウト材料は、TYPE1～6のいずれにも該当しない材料であるが、可塑性を発現させるメカニズムとしては、高分子系に該当し、高分子系の材料に無機系の助剤を組み合わせることで、可塑性を発現させている材料である。

2.2. 可塑性グラウト材料に関する既往の研究

2.2.1. フライアッシュを混合した可塑性グラウト材料に関する研究

石炭火力発電所において副産物として排出されるフライアッシュの有効利用をはかることを目的として、可塑性グラウト材料の固化材の一部をフライアッシュに置換した材料の開発も行われている。

大本ら^{5),6)}は、石炭火力発電所から発生するフライアッシュの有効利用を目指し、できるだけ大量にフライアッシュを配合し、かつ長距離圧送できることを目指した可塑性グラウト材料を開発している。1m³当たり 350kg のフライアッシュを混合し（表 2.9 参照）、圧送試験によって 2000m 以上の長距離圧送性を確認している。また、NEXCO 規格の各試験も実施し、全ての試験で NEXCO 規格に適合している（写真 2.3 参照）ことを確認している。

表 2.9 フライアッシュを混合した可塑性グラウト材料の配合⁵⁾

基材(A液)					可塑性材(B液)			
セメント	フライアッシュ	水	減水剤 SC	空気調整剤	可塑性剤	可塑性剤 SA	可塑性剤 SB	水
350kg	350kg	590kg	1.8kg	0.55kg	1.1kg	1.1kg	9.0kg	138kg

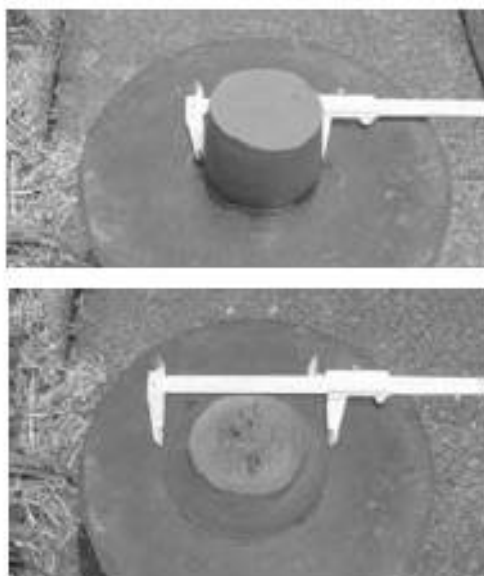


写真 2.3 フロー試験（上：静置、下：15 打）⁵⁾

大谷ら⁷⁾は、石炭火力発電所に併設されたフライアッシュブレンディングサイロ基礎の地盤沈下に伴い生じた空洞の充填処置に向けて、フライアッシュを有効活用した可塑性グラウト材料の適用を検討している。空洞の大きさ、場所によって流動性の異なる配合を充填することとし、静置フロー値として、100mm、150mm および 200mm の 3 配合を設定し、

一軸圧縮強度については、いずれの配合も $1\text{N}/\text{mm}^2$ を目標として、配合試験を実施している。

配合試験の結果、セメントを $260\text{kg}/\text{m}^3$ 、フライアッシュを $415\text{kg}/\text{m}^3$ とすることで、目標の強度を満足でき、さらに可塑性剤の添加量を調整して、フロー値が 100mm 程度、 150mm 程度、および 200mm 程度となる配合を決定している。なお、これらの配合は、ブレンディングサイロの基礎の充填という特定の条件のもとで設定した要求品質を踏まえて開発したものであり、先に述べた NEXCO 規格には適合しない配合である。



【設定フロー値 100mm】



【設定フロー値 200mm】

写真 2.4 フロー試験結果⁷⁾

2.2.2. 中性系材料を使用した可塑性グラウト材料に関する研究

田中ら⁸⁾は、トンネルや河川構造物の背面に発生した空洞の充填材施工に伴う周辺環境への影響を最小限にすることを目的として、硬化前後において水素イオン濃度 (pH) が中性域での施工を可能にした可塑性グラウト材料を開発している。

表 2.10 中性系可塑性充填材の材料⁸⁾

材料名	内容	密度 (g/cm^3)
硬化材	酸化マグネシウム	3.20
pH 調整材	硫酸アルミニウム	1.32
増粘材	グァーガム	1.50

表 2.11 中性系可塑性充填材の標準配合⁸⁾

A 液 (kg/m^3)			B 液 (kg/m^3)	
pH 調整材	増粘材	水	硬化材	水
340	2.6	232	309	412
目標一軸圧縮強度 $\sigma_{28} = 1.5 \text{ N}/\text{mm}^2$				

表 2.10 および表 2.11 に本可塑性グラウト材料に使用する材料と標準配合を示す。本グラウト材料は硬化材に酸化マグネシウムを使用し、pH 調整材として硫酸アルミニウムを使用している。酸化マグネシウムの飽和水溶液の pH は 10.5 程度であり、セメントの飽和水溶液 (pH 12 以上) と比較して低アルカリであることから、pH の調整を容易としている。

本グラウト材料においても、NEXCO 規格の各試験も実施し、全ての試験で NEXCO 規格に適合している (写真 2.5 参照) ことを確認している。

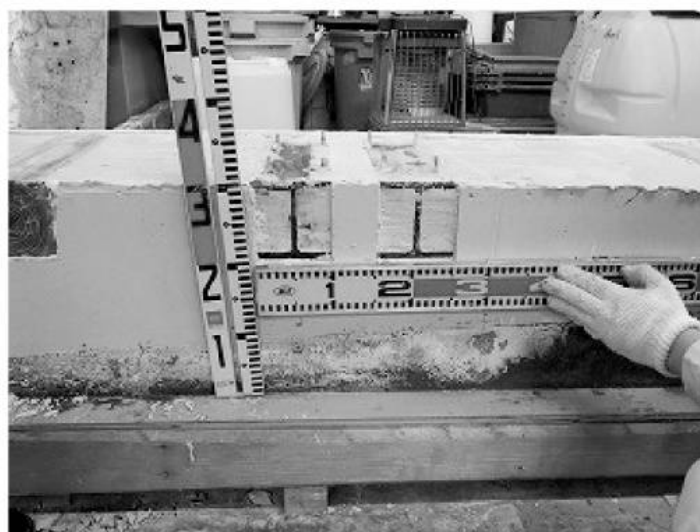


写真 2.5 充填性試験状況⁸⁾

2.2.3. 巨礫地盤の充填固化に関する既往の研究

ここでは、本論文においても研究の目的の一つとしている、巨礫地盤の充填固化に関連する既往の研究を示す。

石井ら⁹⁾は、捨石マウンド等の巨礫地盤に対する可塑性グラウト材料による注入改良に関して、いくつかの注入実験や実施工における注入圧力のデータを分析したうえで、注入圧力の予測計算法を提案し、この注入圧力に基づき可塑性グラウト材料に推奨される粘性水準を提示している (図 2.3 参照)。

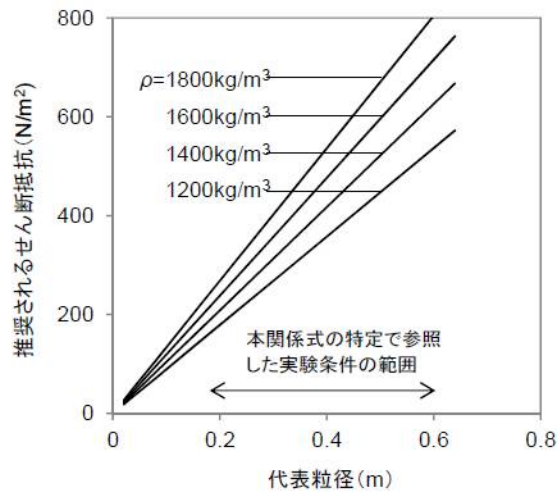


図 2.3 代表粒径に応じて推奨される可塑性グラウトの粘性水準⁹⁾

小笠原ら¹⁰⁾は、既設の重力式係船岸において、より大きな船舶が停泊できるよう増深するにあたり、捨石マウンドの一部を改良、固化してからマウンドを掘り下げること、法線位置を変更せずに数 m 増深する工法の研究を行っている。

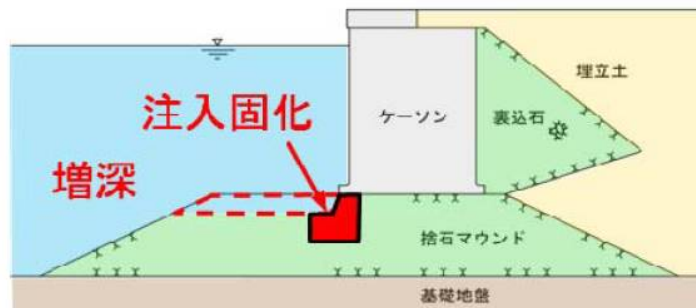


図 2.4 重力式係船岸の増深工法イメージ図¹⁰⁾

本工法において、捨石マウンドの一部を改良・固化するための注入材料が重要であり、いくつかのグラウト材料について実験を行った上で、最も適している注入材料として高強度の可塑性グラウト材料（表 2.12 参照）を選定している。この可塑性グラウト材料について、最大粒径 200mm の捨石材を用いて 2 次元の模擬地盤を作製し（図 2.5 参照）、注入実験を行っている。実験の結果として、可塑性グラウト材料による捨石の限定範囲への注入が可能であることを示している（図 2.6 参照）。

表 2.12 可塑性グラウト材料の配合¹⁰⁾

タイプ	基材(kg/m ³)			可塑性剤(kg/m ³)				備考	
	セメント	水	減水剤	可塑性剤 A	可塑性剤 B	可塑性剤 C	水	フロー値 (静置時)	圧縮 強度
硬練り	1212	485	6.06	0.91	6.06	2.50	121	90mm 程度	24 N/mm ²
標準				0.61				100mm 程度	
軟練り				0.48				110mm 程度	

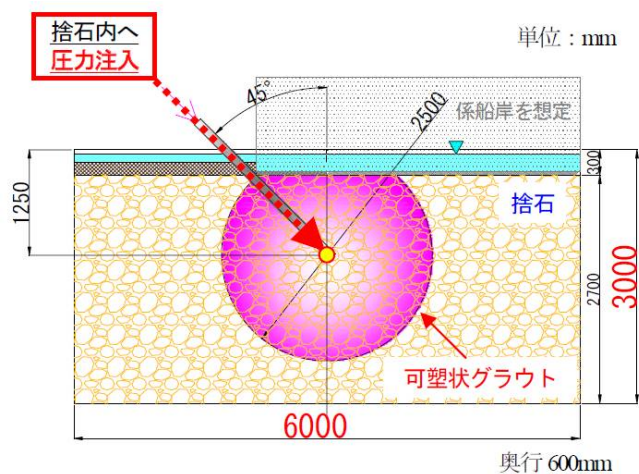


図 2.5 捨石への注入実験構造図¹⁰⁾



図 2.6 捨石への注入実験出来形¹⁰⁾

2.3. 混和材を大量に混合したモルタル・コンクリート材料に関する既往の研究

本研究において、第4章に示す研究では、アルカリ成分の溶出を抑制し、水中における打込み、充填においても周辺水の pH 上昇を抑制できる高強度の可塑性グラウト材料を開発するにあたり、混和材を大量に混合し、セメント量をできるだけ少なくすることで pH 上昇の抑制を試みている。

ここでは、混和材を大量に混合したモルタル、コンクリート材料に関する既往の研究についてまとめる。

山梨ら¹¹⁾は、超高強度コンクリートの開発にあたり、大量のセメントを使用することによる弊害（温度ひび割れ、自己収縮）を解消するために、セメントの混和量を20%以下に低減し、微粉ポゾラン物質および高炉スラグ微粉末を主材料とした配合の実験を行っている。

ポゾラン物質としては、シリカフェームやフライアッシュ、メタカオリン等を使用し、高性能 AE 減水剤を使用することで水粉体比をできるだけ小さくし（W/P=20%）、これによってセメントを混和しない場合でも、60℃温水養生で100N/mm²（材齢28日）程度の強度が発現するとしている。

岩田ら¹²⁾は、セメントを使用しないクリンカーフリーのモルタル、コンクリートの開発を目指し、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末を主材とし、品質のことなる3種類の消石灰と、生コンスラッジを乾燥、粉砕した乾燥スラッジ粉をアルカリ刺激材として使用した際の諸性状について検討している。

その結果、アルカリ刺激剤の混合割合を10%程度とすることで、20℃水中養生で60N/mm²（材齢28日）以上の強度が得られたとしている。また、高性能 AE 減水剤を用い、水粉体比を20%と限りなく小さくしている影響で、フレッシュ状態においてダイラタンシーと考えられる性状が見られたとし、これはシリカフェームの混合で改善できたとしている。

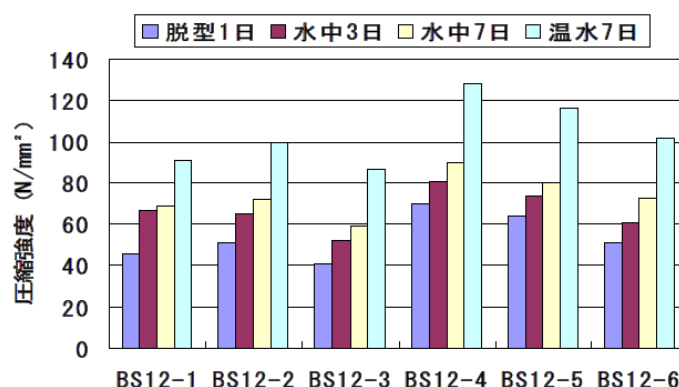


図 2.7 圧縮強度試験の例¹²⁾

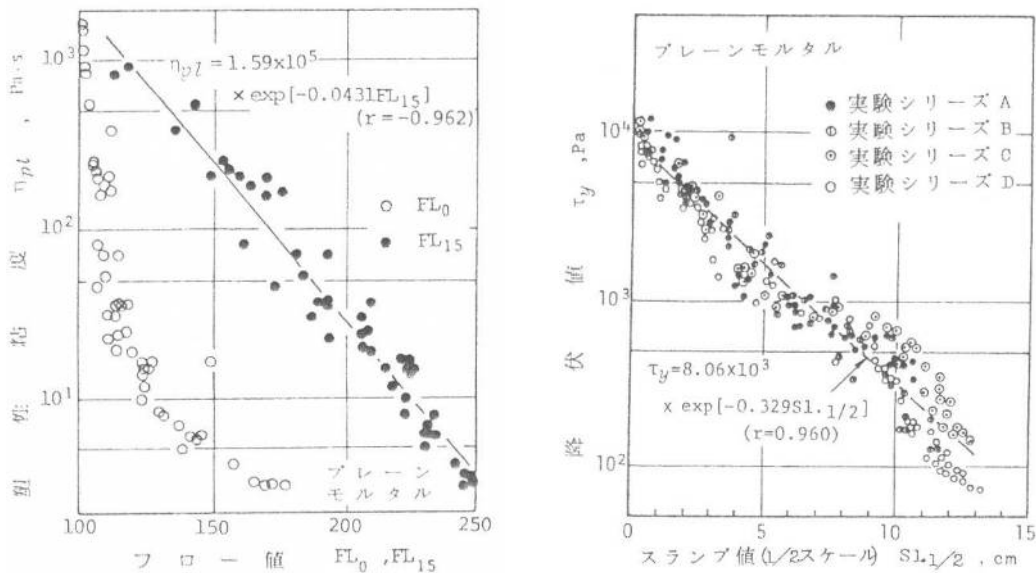
2.4. グラウト材料のレオロジー性状に関する既往の研究

可塑性グラウト材料はレオロジー性状としては、ビンガム流体に該当するとされている。本研究においても、第5章において、可塑性グラウト材料をビンガム流体と考え、円管を鉛直下方に流れる可塑性グラウト材料の流動モデルを提案している。

ここでは、グラウト材料（モルタル、コンクリートも含む）のレオロジー性状に関する既往の研究をまとめる。

水口¹³⁾は、スランプ値、フロー値およびVB値のレオロジー的意義を検討するため、これらのコンシステンシー試験値とビンガム流体と仮定したフレッシュモルタルおよびコンクリートのレオロジー定数である降伏値と塑性粘度の関係を実験的に求めている。

フレッシュモルタルおよびコンクリートのレオロジー定数は平行板ブラストメータを用いて測定している。この平行板ブラストメータは、試料に一定荷重をかけ、その時の試料高さの時間的変化を測定し、荷重の大きさ、試料高さおよびその高さ変化からレオロジー曲線を求めるものである。試験の結果、モルタルのフロー値（15回打撃後）と塑性粘度の間には線形関係があり、高い相関関係があるとしている。さらにモルタルのスランプ値と降伏値の間にも線形関係があり、高い相関関係があることから、モルタルではフロー値（15回打撃後）とスランプ値から、レオロジー定数（塑性粘度、降伏値）をある程度推定できるとしている。また、コンクリートについてもスランプ値から降伏値をある程度推定できるとしているが、モルタルに比べると誤差が大きいとしている。



【フロー値と塑性粘度の関係】

【フロー値と降伏値の関係】

図 2.8 モルタルのコンシステンシー試験値とレオロジー定数の関係¹³⁾

森ら¹⁴⁾は、フレッシュコンクリートを均質で理想的なビンガムモデルと仮定し、筆者らが提案したフレッシュコンクリートの粘塑性有限要素解析法を用いて、スランプ試験、フロー試験のシミュレーションを行い、さらに実際にモルタルを用いたスランプ試験およびフロー試験の結果との比較を行っている。

これらのシミュレーションおよび実験の結果から、スランプ試験は降伏値に敏感に反応し、フロー試験は降伏値および塑性粘度がともに小さい範囲において、それらに敏感に影響を与えるとしており、モルタルのスランプ値およびフロー値の実測値と解析値を比較することによって、レオロジー定数（降伏値、塑性粘度）の推定が可能であるとしている。

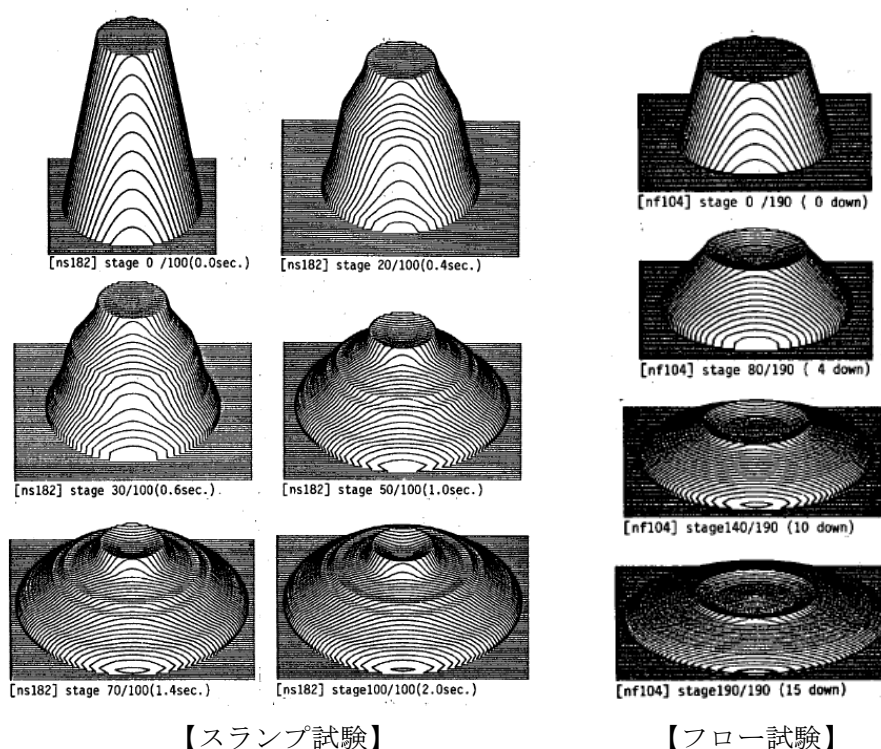


図 2.9 シミュレーション結果の例¹⁴⁾

小村ら¹⁵⁾は、数値解析によらない単純化した解析モデルを用い、スランプ値から降伏値を算出する手法を示し、さらにスランプ試験を拡張したスランピング試験から塑性粘度を推定する方法について検討を行っている。

スランプ試験において、試料内部に自重による垂直方向の軸応力のみが生じていると仮定すると、最も大きな圧縮応力は底面における垂直応力 σ_B であり、スランピング後の試料が停止した状態では、底面の偏差応力の 2 次不変量 $\sqrt{\sigma_B/2}$ は降伏値 τ_y に等しいとし、次式が得られるとしている。

$$\tau_y = \sqrt{\sigma_B J^2} = -\frac{\sigma_B}{\sqrt{3}} = \frac{\alpha \rho G h}{\sqrt{3}} = \frac{\alpha \rho G (h-Sl)}{100\sqrt{3}}$$

$$\alpha = \frac{1+a+a^2}{3}$$

a : 上面半径と底面半径の比

ρ : 試料の密度 (kg/m³)

G : 重力加速度 (9.807m/s²)

H : 最初の高さ (cm)

Sl. : スランプ値 (cm)

上記の理論解は一般に大きめの降伏値を算出するとしており、それは試料の底面に上部の自重が均等に分布しているという仮定が実際には成り立たないためであるとしている。

なお、本研究の第 7 章においては、小村らの上記の考えのもと、スランプ値ではなく、スランプフロー値から降伏値を算出する手法を用いて、本研究において得られたフロー値 ($\phi 80\text{mm}$ シリンダーフロー) から、降伏値を算出している。

第2章の参考文献

- 1) 三木五三郎ほか：裏込め注入工法の設計と施工、山海堂、1990
- 2) 三木五三郎ほか：可塑状グラウト注入工法、日刊建設工業新聞社、2001
- 3) 日特建設株式会社：パフェグラウト工法カタログ
- 4) 東日本高速道路株式会社ほか：矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領、NEXCO 中央研究所、2009
- 5) 大本晋士郎ほか：フライアッシュを利用した長距離圧送型可塑性グラウトの開発とその適用事例、電力土木、No.367、pp.59-63、2013
- 6) 大本晋士郎ほか：フライアッシュを大量に使用する長距離圧送型可塑性グラウトの開発、土木学会第68回年次講演会、V-059、pp.117-118、2013
- 7) 大谷治郎ほか：杭基礎で支えられたスラブ下部の空洞充填（その1：フライアッシュ混合充填材の配合試験）、土木学会第69回年次学術講演会、VI-663、pp.1325-1326、2014
- 8) 田中徹、中山卓人：環境配慮型の中性系可塑性充填材の性能評価、水土の知、Vol.82、No.5、pp.35-38、2014
- 9) 石井裕泰ほか：捨石マウンドを対象とした可塑性グラウト注入工法の施工と適用性の検討、地盤工学ジャーナル、Vol.11、No.4、pp.327-339、2016
- 10) 小笠原哲也ほか：重力式係船岸増深のための基礎構造に関する研究、土木学会論文集B3（海洋開発）、Vol.70、No.2、pp.I_882-I_887、2014
- 11) 山梨泰斗ほか：低セメント型超高強度コンクリートの研究、第35回土木学会関東支部技術研究発表会、V-27、2008
- 12) 岩田正幸ほか：クリンカーフリーモルタルにおける各種アルカリ刺激材の検討と流動特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.1、pp.1547-1552、2010
- 13) 水口裕之：プレーンフレッシュコンクリートのレオロジー定数、コンシステンシー試験値間の関係、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.297-300、1985
- 14) 森博嗣ほか：フレッシュコンクリートの各種コンシステンシー試験方法に関するレオロジー的考察、日本建築工学会構造系論文報告集、第377号、pp.16-26、1987
- 15) 小村理恵ほか：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に対するレオロジー的研究、日本建築工学会構造系論文報告集、第462号、pp.1-10、1994

第3章 可塑性グラウト材料における配合設計手法の高度化

3.1. はじめに

可塑性グラウト材料は近年さまざまな用途に適用されるケースが増えていることは、先に説明した。また、可塑性グラウト材料の品質規格として「NEXCO 規格」¹⁾があり、この規格が可塑性グラウトの品質規格の基本となっており、この NEXCO 規格を満足するよう配合設計された可塑性グラウト材料が各種開発されてきたことも先に示した。

一方、この NEXCO 規格は既設トンネルの背面空洞に対する充填材料として最適な品質を示したものであり、他の用途で使用することを考えた場合、品質としてそぐわない場合もある。例えば、もう少し狭い間隙に対しても充填したい場合は、もう少し流動性を高く（フロー値を大きく）する必要がある。また、強度に関して NEXCO 規格では 1.5N/mm^2 という、あくまで一般的な充填材としての強度設計であり、例えば構造物との一体化をはかるために、強度を構造物並みに大きくしたい、といった要求にこたえることはできない。

これまで開発されてきた各種の可塑性グラウト材料は、NEXCO 規格を満たすために、可塑性、水中不分離性、低収縮性、強度といった性状を満足するよう、微妙なバランスの下で配合設計がなされており、ある性能を高めれば他の性能が低下するトレードオフの関係の有しているものがほとんどであった。

そこで、他の性状を損なわずに流動性や強度の変更が容易な可塑性グラウト材料を開発できれば、可塑性グラウト材料のさらなる用途の拡大がはかれると考え、開発を進めることにした。

3.2. 基礎的な検討

他の性状を損なわずに流動性や強度の変更が容易な可塑性グラウト材料を開発するにあたり、基礎的な検討を行った。

既存の可塑性グラウト材料の材料構成は、例えばセメントに1~2種類程度の混和剤(材)を添加するという材料構成としているものが多かった。このような材料構成の場合、使用する材料種類が少なく、施工時の材料調合が容易であるというメリットがある一方、例えば流動性を大きくしようとして混和材の添加量を減らすと、それに伴い水中分離抵抗性の低下や、収縮量が増加するといった問題が発生するデメリットがある。

そこで、本研究では、セメントをベースとして、添加する混和剤に対して、その混和剤が担う機能を明確に分けることで、可塑性、水中不分離性、低収縮性、強度といった性能を、それぞれ容易に変更できるようにすることとした。ただし、このような材料構成とすると、求める性能の分だけ添加する混和剤の数を多くする必要があり、施工時における現場での材料調合が手間になるというデメリットは生じる。

3.3. 使用材料

本研究における可塑性グラウト材料の使用材料を表 3.1 に示す。

表 3.1 使用材料

記号	使用材料	詳細	比重	外観	機能
C	セメント	普通ポルトランドセメント	3.15	粉末	水と反応して硬化物を形成する
W	水	水道水	1.00	液体	主に充填材の流動性を高め、かつセメントと反応して硬化物を形成する
SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	1.03 ~ 1.12	液体	基材の流動性を高め、さらに基材の可使時間を延長する
PA	可塑剤 A	高分子系化合物	無視	液体	充填材に可塑性を付与し、流動性をコントロールする
PB	可塑剤 B	無機系化合物	1.49	液体	充填材に可塑性を付与し、流動性をコントロールする可塑剤 A の働きを助ける
PC	可塑剤 C	水溶性セルロース系増粘剤	無視	粉末	充填材の材料分離抵抗性（水中分離抵抗性、ブリーディング抵抗性）を高める
DF	空気量調整剤	ポリアルキレングリコール誘導體	0.98 ~ 1.02	液体	充填材料に空気が過大に連行された場合に空気量を調整する

表中に各材料が担う機能を示したが、本研究における可塑性グラウト材料に求める性状、品質に対して、各材料が担う機能を表 3.2 に示す。

表 3.2 可塑性グラウト材料の性状と各材料が担う機能

記号	使用材料	詳細
C	セメント	水セメント比 (W/C) を変化させることで、 強度 を 変えることができる。
W	水	
PA	可塑剤 A	可塑性 を発現し 流動性 (フロー値) を コントロールする
PB	可塑剤 B	
PC	可塑剤 C	水中分離抵抗性 を付与し、 ブリーディング を抑制する

詳細は後述するが、本材料の施工方法として、2液 1.5 ショット方式と呼ばれる、2液に分けて製造、配管で圧送し、充填箇所直前において2液を配管内で混合することで、可

塑性を発現させて、充填する方法としている。高性能 AE 減水剤および空気量調整剤は、この施工方法とするにあたって、セメントを混合する側の材料の可使時間や圧送性の向上、空気量の過剰な混入を防止することを目的として使用する材料である。

また可塑性を発現し、流動性をコントロールする材料として、可塑性剤 A および可塑性剤 B という 2 種類の材料を用いている。これは、可塑性剤 A のみを使用した場合でも、W/C を富配合とした場合で概ねの目的は達成できるが、貧配合とした場合は、目的とした流動性を達成できないケースがあり、その可塑性剤 A を補助し、さらに可塑性剤 A の効果を高める目的として、可塑性剤 B と呼ぶ混和剤も使用している。

3.4. 本材料の代表的な配合例

本材料は、現在、多くの施工現場で適用されている。表 3.3 に、本可塑性グラウト材料の代表的な 2 つの配合^{2),3)}を示す。

表 3.3 代表的な配合例 (1m³ 当たり)

使用材料	単位	配合①	配合②
セメント	kg	576.0	1,212.0
減水剤	kg	1.44	6.06
可塑性剤A	kg	1.15	0.61
可塑性剤B	kg	14.40	6.06
可塑性剤C	kg	2.69	1.51
空気量調整剤	kg	0.54	—
水	kg	806.0	606.0
密度	g/cm ³	1.4	1.8
設計強度	N/mm ²	1.5 以上	24 以上

なお、これらの配合のうち、配合①は先に示した NEXCO 規格を満足する配合である。それに対し、配合②は、NEXCO 規格で想定していない、24N/mm²以上という、一般的な構造物並みの高強度を実現した配合である。この配合を NEXCO 規格に照らし合わせると、強度を大きくするためにセメント量を大きくしていることから、NEXCO 規格における比重の基準 (11~15kN/m²) を満足していない。つまり、配合②については、公的な機関等が定めるいずれの基準も該当しない配合となっている。

3.5. 本材料の施工方法

本材料の施工方法は、2液 1.5 ショット方式と呼ばれる方法で施工される^{2),3)}。これは、図 3.1 に示すように、材料を 2 つの液（本材料ではそれぞれ「基材」「可塑材」と呼ぶ）に分けてそれぞれ練混ぜ、これらをポンプで圧送し、配管の先端に設けた静止ミキサ（スタティックミキサとも呼ばれる）内を流れることで 2 液は混合され、そのまま充填する施工方法である。

なお、この静止ミキサ（図 3.2）は、配管内に設置された互い違いに組み合わされたブレード内を材料が流れることで 2 液が自然に攪拌混合されるミキサであり、材料を攪拌混合するのに動力を必要としないことから、このような 2 液 1.5 ショットによる施工に適した混合方式となる。

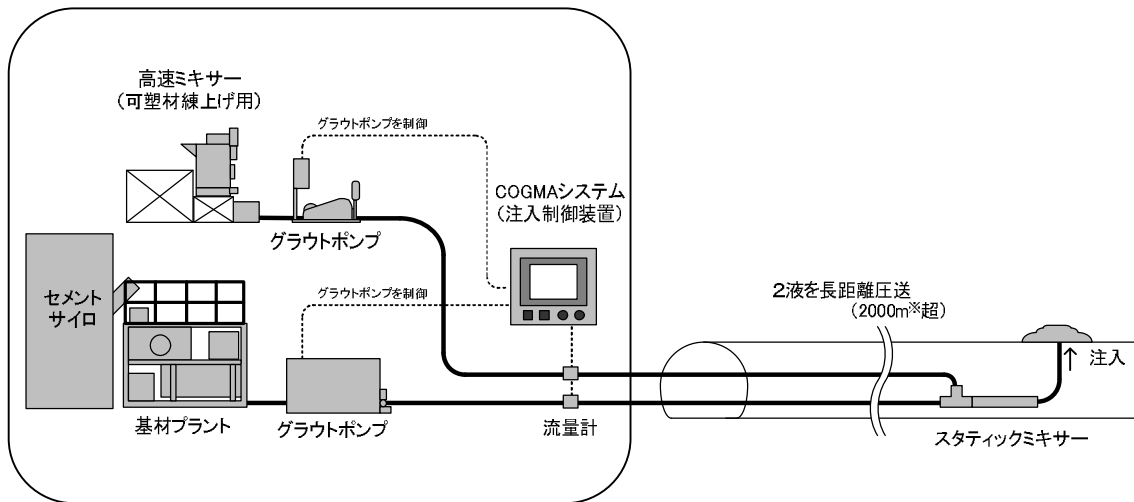


図 3.1 施工方法の模式図

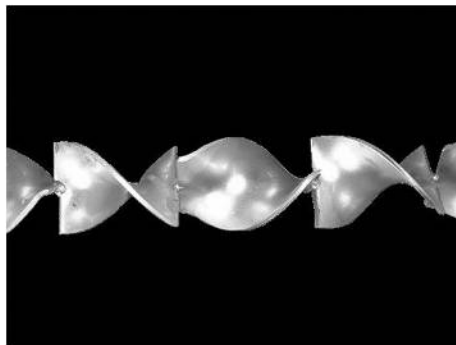


図 3.2 静止ミキサ

可塑性グラウト材料は、ポンプで押すことで流動する材料ではあるが、可塑性を発現させた状態で長距離（数百 m 以上）を圧送することは困難である。そこで、製造プラントに

においては 2 液を分けた状態で製造し、これらをそれぞれ圧送し、配管内で合流させて混合することで可塑性を発現させるような機能を設けることで、長距離圧送（数百 m 以上）の施工を可能とする。なお、長距離圧送性は、2 液それぞれの液の流動性や材料分離抵抗性による。

可塑性グラウト材料にこのような長距離圧送性を付与するのは、施工機械や車両を搬入することのできない、小断面の導水路トンネルや、施工時間が夜間の数時間に限られる鉄道トンネル等における覆工背面の空洞充填工事に対応するためである。このような 2 液 1.5 ショットの長距離圧送による施工方式であれば、トンネル内は、圧送配管のみ敷設すればよく、また先端においても動力を必要としない静止ミキサを使用することから、トンネル内に大きな施工機械を搬入する必要がない。また、鉄道トンネルの施工においては、通常施工時間が夜間の数時間程度に限られる場合がほとんどであり、事前に圧送配管をトンネル内に敷設しておけば、施工機械の搬入、撤去といった時間を省くことができるので、効率的な施工が可能となる。

本材料では、先に示した設計強度を 1.5N/mm^2 以上とし、NEXCO 規格に適合した配合①については、2km 以上の長距離圧送による施工を可能としており、これまで、多くの導水路トンネルや鉄道トンネルでの施工実績がある。

なお、先に示した配合①および配合②のうち、長距離圧送性を付与しているのは配合①のみである。長距離圧送による施工を行うためには、2 液それぞれの粘性をできるだけ低くすることが重要であるが、各液の材料分離も抑制する必要がある。通常、可塑性グラウト材料の施工では、例えば数 m^3 充填するごとに注入孔を変えながら施工する。このような施工の場合、配管内で材料の流動が停止する時間があり、その間に材料が分離すると、圧送中に配管内の閉塞等のリスクがあることから、材料分離の抑制は、可塑性グラウト材料の配合設計において重要な要素となる。

本材料においては、表 3.4 の配合①に示す通り、セメントを主材とした基材について、セルロース系の増粘剤である可塑剤 C を添加することで、基材の材料分離を防止し、長距離圧送を可能としている。なお、可塑剤 C は水溶性セルロース系の増粘剤であり、水の量に対して添加量が決まる材料である。すなわち、同じ添加量であれば水の量が少なければ粘性があがり、水の量が多ければ粘性は下がる。よって、配合②においては、可塑剤 C を水量の少ない可塑材側に添加している都合上、可塑材の粘性がかなり大きくなり、長距離圧送には不向きな配合となっている。

表 3.4 施工時の配合例

液名	使用材料	単位	配合①	配合②
基材	セメント	kg	576	1,212
	減水剤	kg	1.44	6.06
	可塑剤C	kg	2.69	—
	空気量調整剤	kg	0.54	—
	水	kg	691	485
可塑材	可塑剤A	kg	1.15	0.61
	可塑剤B	kg	14.40	6.06
	可塑剤C	kg	—	1.51
	水	kg	115	121

3.6. 各材料の添加量を変化させた場合の性状確認試験

3.6.1. はじめに

表 3.1 に示した材料の添加量を変えることで、強度、流動性、水中分離抵抗性といった、さまざまな性状を変化させた可塑性グラウト材料とすることが可能になる。ここでは、特に強度と流動性を変化させた試験の結果を示す。

3.6.2. 試験配合

表 3.5 に試験配合の一覧を示す。本試験においては、W/C を 50%～140%まで変化させ、それぞれの W/C に対して、可塑剤 A の添加量を 4～5 水準設定した。その他の材料の添加量は、事前に実施した予備試験の結果を踏まえ、所定の水中分離抵抗性、ブリーディング抵抗性を発揮できるよう W/C ごとに固定した添加量として試験を行った。

表 3.5 試験配合

W/C %	SP C×%	DF 可塑剤 C×%	PA C×%	PB C×%	PC W×%
50	0.50	20	0.01～0.07	0.50	0.250
75	0.43	20	0.02～0.15	1.05	0.273
100	0.36	20	0.025～0.20	1.61	0.296
140	0.25	20	0.025～0.20	2.50	0.333

3.6.3. 試験項目

試験により確認した項目は、下記に示す圧縮強度とフロー値である。

(1) 圧縮強度試験

試験は JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し測定した。ただし、供試体についてはφ50×100mm の円柱供試体を用い、材齢 1 日で脱型後、試験材齢まで 20℃ で水中養生を行った。

なお、W/C=100%および 140%の配合については、低強度であり JIS A 1108 では載荷速度が速いと考え、軸ひずみ制御 (0.5～1.0%/min) で試験を行った。

(2) フロー試験

試験は JIS R 5201 「セメント物理試験方法」記載の「フロー試験」に準拠し実施した。

ただし、フローコーンに替えて NEXCO 試験法 313 「エアモルタル及びエアミルクの試験方法」記載のシリンダー (内径 80mm、高さ 80mm) を使用し、モルタルフロー試験装置によって、15 回の打撃を加えた後の試料の広がり (15 打フロー) に加え、打撃を加える前の試料の広がり (静置フロー) も測定した。



【静置フロー】

【15打フロー】

図 3.3 フロー試験状況

3.6.4. 材料の練混ぜ方法

材料の練混ぜ方法は下記のとおりとした。

(1) 基材の練混ぜ

【W/C=50%、75%配合】

所定量の水をホバート型モルタルミキサ (ボウル容量 20L) に投入したのち、高性能 AE 減水剤 (SP)、セメント (C) を投入し 2 速で 3 分間攪拌した。

【W/C=100%、140%配合】

所定量の水をホバート型モルタルミキサ (ボウル容量 20L) に投入したのち、高性能 AE 減水剤 (SP)、空気量調整剤 (DF)、可塑剤 C (PC) を投入して軽く攪拌したのち、セメント (C) を投入し 2 速で 3 分間攪拌した。

(2) 可塑材の練混ぜ

【W/C=50%、75%配合】

所定量の水を 1000cc のビーカーに入れ、可塑剤 C (PC) をビーカーに投入後、調理用の小型ハンドミキサで 30 秒攪拌したのち、可塑剤 A (PA) および可塑剤 B (PB) を投入し、60 秒攪拌した。

【W/C=100%、140%配合】

所定量の水を 1000cc のビーカーに入れ、可塑剤 A (PA) および可塑剤 B (PB) を投入し、調理用の小型ハンドミキサで 60 秒攪拌した。

(4) 基材と可塑材の練混ぜ

基材を練混ぜたホバート型モルタルミキサに可塑材を投入し 2 速で 30 秒間攪拌した。

3.6.5. 試験結果

図 3.4 および図 3.5 にフロー試験の結果を示す。

試験の結果、いずれの W/C についても、可塑剤 A の添加量を増やすとフロー値小さくなる結果となった。また可塑剤 A を同じ添加量として比較した場合は、W/C が大きくなるほど、フロー値が大きくなる結果となった。

図 3.6 および図 3.7 に一軸圧縮試験の結果を示す。

試験の結果、当然のことではあるが W/C を小さくすると一軸圧縮強度は増加する傾向が見られた。なお、全ての W/C において可塑剤 A の添加量を増やすと強度が低下する傾向が見られたが、その低下自体はわずかであった。

なお、図 3.4～図 3.6 において点線で示しているのは、各 W/C について累乗近似を行った近似曲線である。また、図 3.7 中に示したのは、各 W/C において最も小さな値となったデータについて累乗近似を行った近似曲線である。

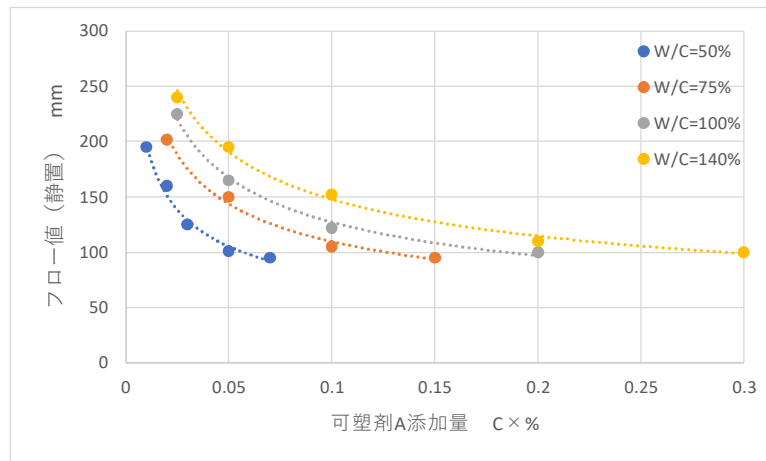


図 3.4 フロー試験結果（静置フロー）

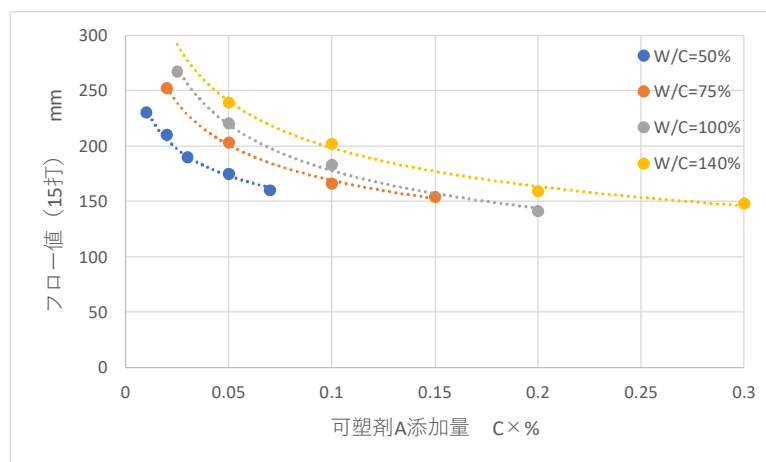


図 3.5 フロー試験結果（15打フロー）

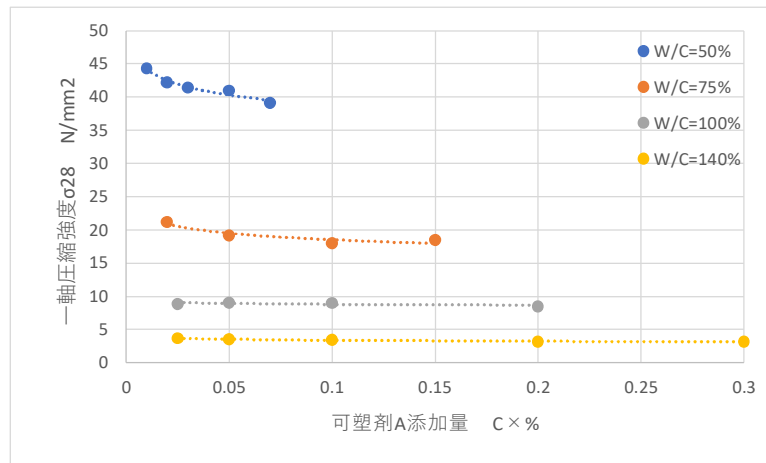


図 3.6 一軸圧縮試験結果（可塑剤 A 添加量と強度の関係）

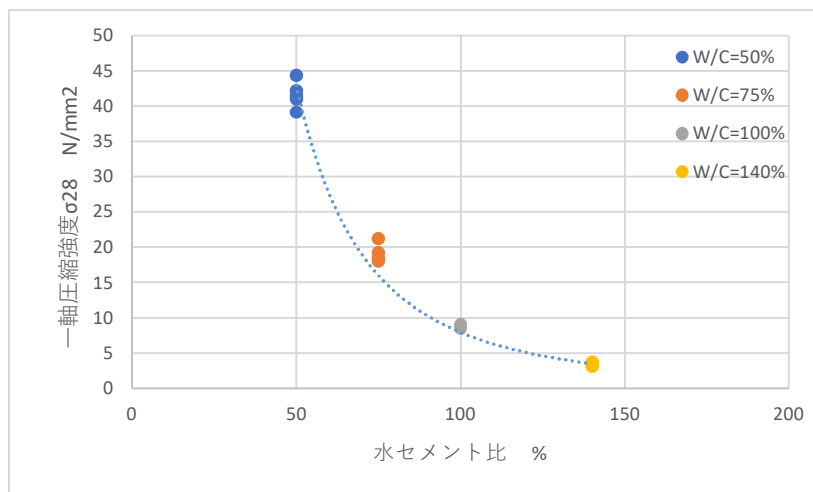


図 3.7 一軸圧縮試験結果（水セメント比と強度の関係）

3.7. 試験結果を踏まえた各材料配合の決定手法

先の試験結果を踏まえ、各パラメータについて下記のように定式化することができる。

(1) 強度と W/C の関係

先の試験結果から、強度はわずかではあるが、可塑剤 A の添加量の影響を受けることがわかった。しかし、その影響はわずかであることから、ここでは、各 W/C における圧縮強度試験結果のうち、最も値の小さいデータを用いて、強度と W/C の関係について定式化することとした。強度と W/C の関係を図 3.8 に示す。なお図中の点線は累乗近似を行った近似曲線である。

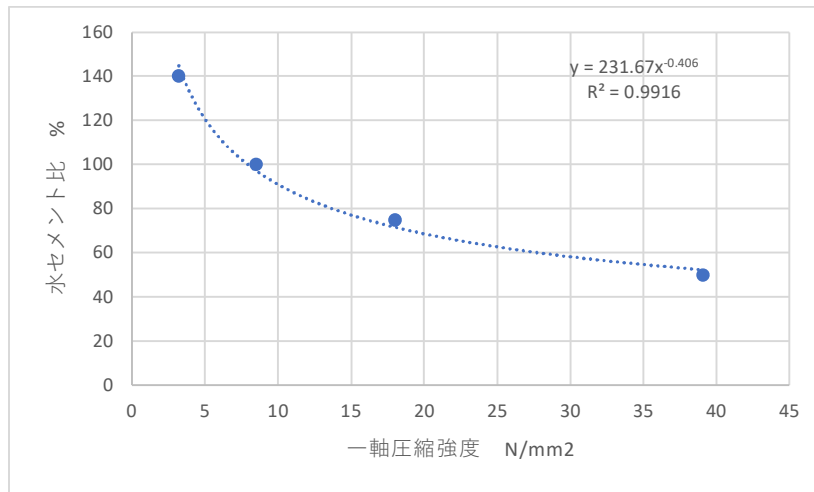


図 3.8 強度と W/C の関係

強度 (C_s) と W/C の関係について累乗近似を行った近似式は下記のとおりである。

$$W/C = 231.67 C_s^{-0.406} \quad \text{式 [3.1]}$$

ここに、W/C : 水セメント比 %

C_s : 目標とする一軸圧縮強度 N/mm²

この関係から、目標とする強度に対して W/C を決定することができるようになる。

(2) フロー値と可塑剤 A の関係

次に、可塑剤 A 添加量を P_a 、フロー値を F_v とし、表 3.6 に示すとおり、各 W/C において累乗近似によって定式化した。

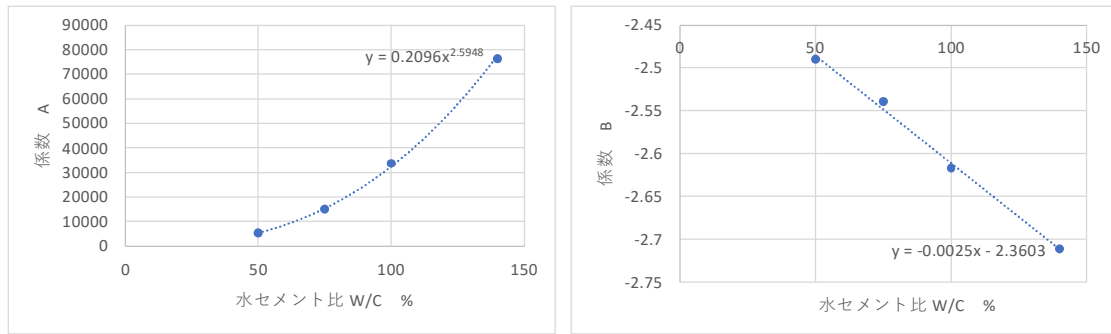
表 3.6 定式化 (フロー値と可塑剤 A 添加量の関係)

W/C	近似式 $P_a = A F_v^B$		相関係数
	A	B	
50%	5367	-2.49	0.9693
75%	15050	-2.539	0.9800
100%	33721	-2.617	0.9850
140%	76236	-2.711	0.9864

ここで、さらに W/C と表 3.6 に示す A との関係を累乗近似で、B との関係を線形近似によって定式化すると以下ようになる。

$$A=0.2096 (W/C)^{2.5948} \quad (\text{相関係数} : R^2=0.9991) \quad \text{式 [3.2]}$$

$$B=-0.002509 (W/C) - 2.3603 \quad (\text{相関係数} : R^2=0.9949) \quad \text{式 [3.3]}$$



【係数 A】

【係数 B】

図 3.9 係数 A および B の線形近似

よって、目標強度から決定した W/C によって、近似式のパラメータ A および B を決定することができ、その近似式に目標とするフロー値を入力することで、可塑剤 A の添加量を決定することができる。

(3) 他の材料の定式化

本試験において、可塑剤 B (P_b)、可塑剤 C (P_c) および高性能 AE 減水剤 (S_p) の添加量については、いずれも W/C と線形関係になるよう、配合設計しており、各材料添加量と W/C の関係は下記のとおりである。

$$\text{可塑剤 B} \quad P_b=0.0222 (W/C) - 0.6144 \quad \text{式 [3.4]}$$

$$\text{可塑剤 C} \quad P_c=0.000922 (W/C) - 0.2038 \quad \text{式 [3.5]}$$

$$\text{高性能 AE 減水剤 } S_p=-0.0028 (W/C) + 0.6385 \quad \text{式 [3.6]}$$

空気量調整剤 (D_f) については、いずれの W/C についても可塑剤 C 添加量の 20% としており、可塑剤 C の添加量が決定すれば、空気量調整剤の添加量も決定することができる。

よって、本可塑性グラウト材料は、任意の目標とする強度とフロー値を与えることで、各材料の配合を容易に決定することができる。

3.8. まとめ

本章の成果を以下のとおりまとめる。

- 1) これまでの多くの可塑性グラウト材料は、ある性能を高めれば他の性能が低下するトレードオフの関係を有しているものがほとんどであり、それを解決するためには、各添加剤に明確な役割を持たせることで、他の性状を損なわずに流動性や強度の変更が容易な可塑性グラウト材料とすることが可能であることを示した。
- 2) 上記の考えのもと、開発された可塑性グラウト材料の代表的な配合例と施工方法について示した。
- 3) 上記の考えのもと、開発された可塑性グラウト材料について、W/C や添加剤の配合量を変えた試験を実施した。
- 4) 試験結果を元に、任意の強度、流動性（フロー値）を設定した可塑性グラウト材料を、容易に配合設計するための手法について示した。

第 3 章の参考文献

- 1) 東日本高速道路株式会社ほか：矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領、NEXCO 中央研究所、2009
- 2) 日特建設株式会社：パフェグラウト工法技術資料（第 3 版）、2010
- 3) 阿部義宏ほか：さまざまな構造物の維持補修に適用できるグラウト充填工法（パフェグラウト工法）、土質基礎に関する「新工法・新技術」技術報告会報告集、北海道土木技術会土質基礎研究委員会、pp.52-61、2009

第4章 環境負荷の低減を目的とした可塑性グラウト材料の開発

4.1. 開発の経緯

可塑性グラウト材料は近年さまざまな用途に適用されるケースが増えていることは、先に説明したが、特に水中不分離性を有することから、例えば堰堤や河川護岸などの河川構造物や港湾構造物の基礎や背面に生じた空洞に対する充填材料として適用される例もある¹⁾。

しかし、可塑性グラウト材料は、固化材としてセメントを使用しており、水中に打込み、充填した際、可塑性を発現させる混和剤により、セメント粒子の拡散を抑制することで、短期的（数時間程度）には pH の上昇を抑制できるが、その後の硬化過程（水和反応）に伴うアルカリ成分（水酸化カルシウム）の溶出によって、中長期的（十数時間から数日程度）には周辺水の pH の上昇が懸念される。また、これは可塑性グラウト材料に限らず水中不分離性混和剤を添加した一般的な水中不分離性コンクリートにも言えることである。

そこで、施工時における環境負荷の低減を目的として、アルカリ成分の溶出を抑制し、水中における打込み、充填においても周辺水の pH 上昇を抑制できる高強度の可塑性グラウト材料を開発することになった。

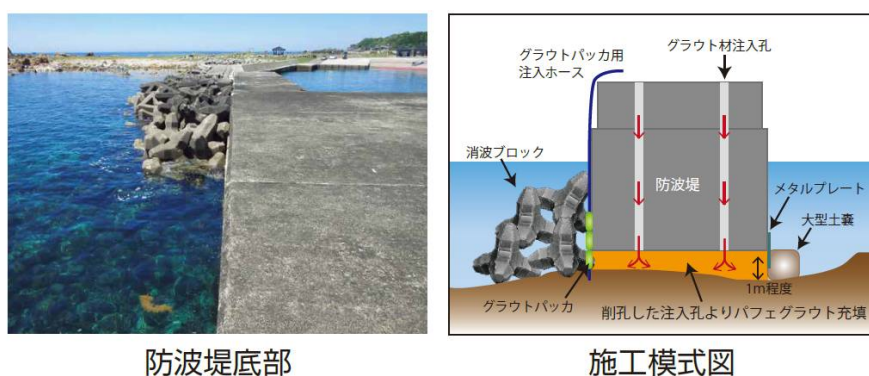


図 4.1 可塑性グラウト材料の水環境における施工事例¹⁾

4.2. 可塑性グラウト材料の周辺水の pH 上昇に関する基礎的な確認試験

4.2.1. 試験概要

本研究を進めるにあたり、可塑性グラウト材料を水中に打設してからの中長期的なアルカリ成分の溶出の状況、具体的には可塑性グラウト材料の周辺水の pH の上昇傾向を把握することを目的とした試験を実施した。

4.2.2. 試験方法

先に示した NEXCO 規格において、可塑性グラウト材料の水中不分離性を確認するための試験として、「水中分離抵抗性試験」が示されている。この試験は、所定量の水で満たした所定の大きさの水槽に、練混ぜ直後の可塑性グラウト材料を浸漬し、浸漬後の pH および濁度の変化を計測する試験である。本試験は基本的に浸漬後 1 時間の pH および濁度を計測する試験であるが、ここでは計測時間を浸漬後最長 120 時間として試験を行い、可塑性グラウト材料を水中に打設してからの中長期的な周辺水の pH 上昇傾向を把握することとした。

なお本試験では、可塑性グラウト材料を浸漬させる試験水として、水道水と海水（神奈川県小田原市で採取）を用いて試験を行った。本試験で使用した可塑性グラウト材料は、前章で示した高分子系の可塑性グラウト材料とし、表 4.1 に示す 2 種類の配合（標準配合、高強度配合）で試験を行った。

表 4.1 試験配合

材料名	単位	標準配合	高強度配合
普通ポルトランドセメント	kg	576.0	1,212.0
減水剤	kg	1.44	6.06
可塑性剤A	kg	1.15	0.61
可塑性剤B	kg	14.40	6.06
可塑性剤C	kg	2.69	1.51
空気量調整剤	kg	0.54	—
水	kg	806.0	606.0
設計強度	N/mm ²	1.5 以上	24 以上

以下に、水中分離抵抗性試験の詳細な試験方法を示す。なお、NEXCO 規格に示された水中分離抵抗性試験方法では、分光光度計を用いて濁度を計測することとしているが、本試験では、あくまで pH の変化の確認を目的としていることから、濁度の計測は行わな

った。また、先に示した通り、通常は1時間の計測時間であるところ、本試験では最長120時間、pHの計測を行っている。

【試験装置】

- a) 幅450mm程度、奥行300mm程度、高さ300mm程度の水槽を用意し、26Lの水を張る。なお、通常は水道水で試験を行うが、本試験では水道水に加えて、海水でも試験を実施した。
- b) 水槽の中にpH計を設置する。この時pH計の設置位置は、水面から10cmとする。なお、本試験では、データロガー付きの連続的に自動でデータを取得できるpH計を使用した。

【試験方法】

- a) $\phi 80\text{mm}$ 、高さ80mmのフローコーン（シリンダー）を、20cm角程度の亚克力板に載せ、そのフローコーンの中に可塑性グラウト材料を投入する。なお、グラウト材料の上面はへら等で平滑に均す。
- b) 水を張った水槽内に、亚克力板ごとフローコーンを沈め、素早くフローコーンを除去する。この時、振動等の衝撃をできるだけ与えないように留意する。
- c) グラウト材料を投入する直前から、10分間隔で最長120時間、連続的にpHを測定する。

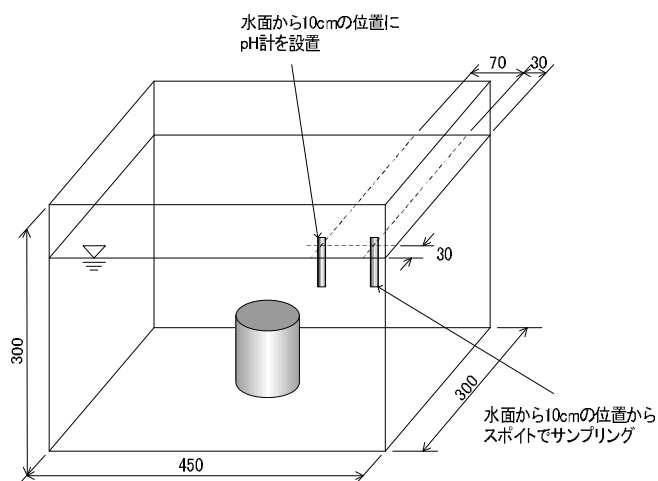


図 4.2 水中分離抵抗性試験装置

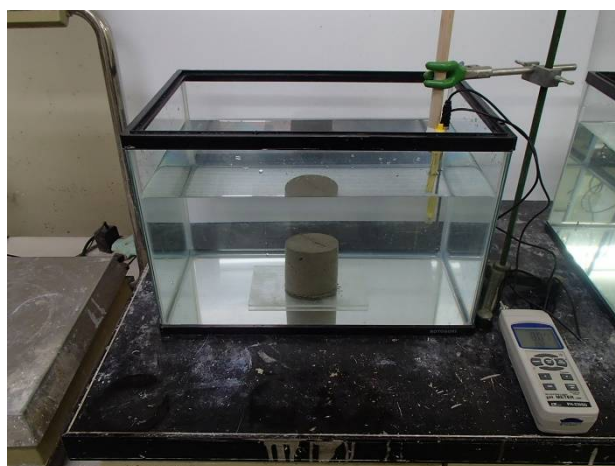


写真 4.1 水中分離抵抗性試験状況

4.2.3. 試験結果

本試験の結果を図 4.3～図 4.4 に示す。

本試験の結果、水道水に浸漬したケースでは、標準配合、高強度配合ともに 72 時間程度で pH が概ね一定となり、その値は 10.7 程度であった。それに対し、海水に浸漬したケースでは、標準配合、高強度配合ともに 120 時間経過しても pH の値は 9.0 以下であり、水道水に浸漬したケースに比較して、pH の上昇はかなり小さかった。この原因として、海水に含まれる各種イオンによる緩衝作用によって、pH の上昇が抑制されたものと考えられる。なお、本試験の結果において、標準配合と高強度配合との間には、pH の上昇傾向に明確な差は見られなかった。

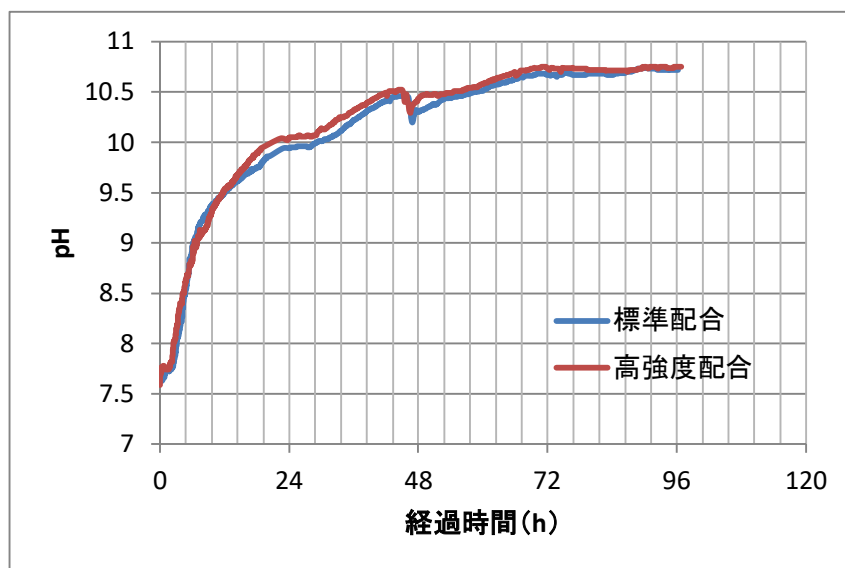


図 4.3 試験結果 (水道水)

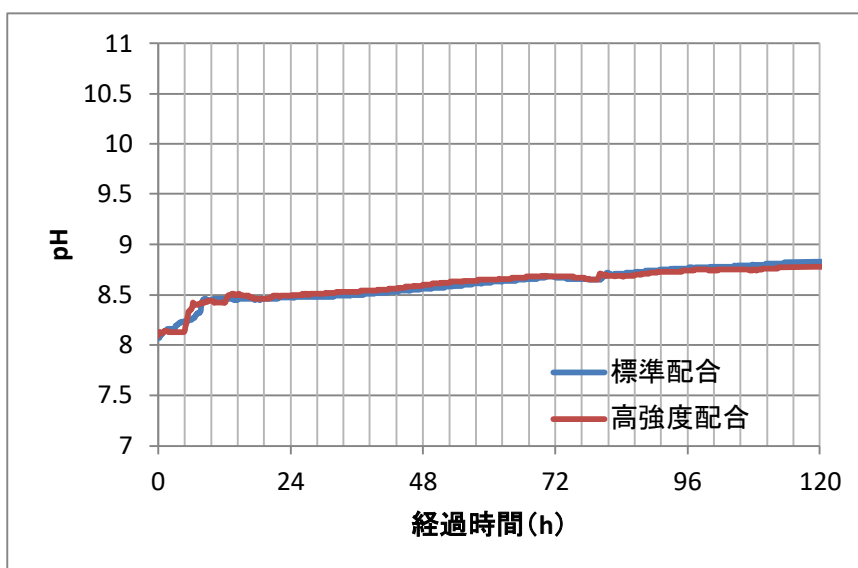


図 4.4 試験結果（海水）

図 4.5 および図 4.6 に、前記試験結果の時間軸を対数表記に変更した図を示す。これらの図より、水道水に浸漬したケースでは、浸漬開始から 2~3 時間程度、海水に浸漬したケースでは、浸漬開始から 3~4 時間程度はほとんど pH が上昇していないことがわかる。NEXCO 規格では、水中分離抵抗性試験における 1 時間後の pH の上昇を 10%以内とする基準を定めているが、この基準を満足する可塑性グラウト材料でも、中長期的にはさらに周辺水の pH が上昇させる可能性があることがわかった。

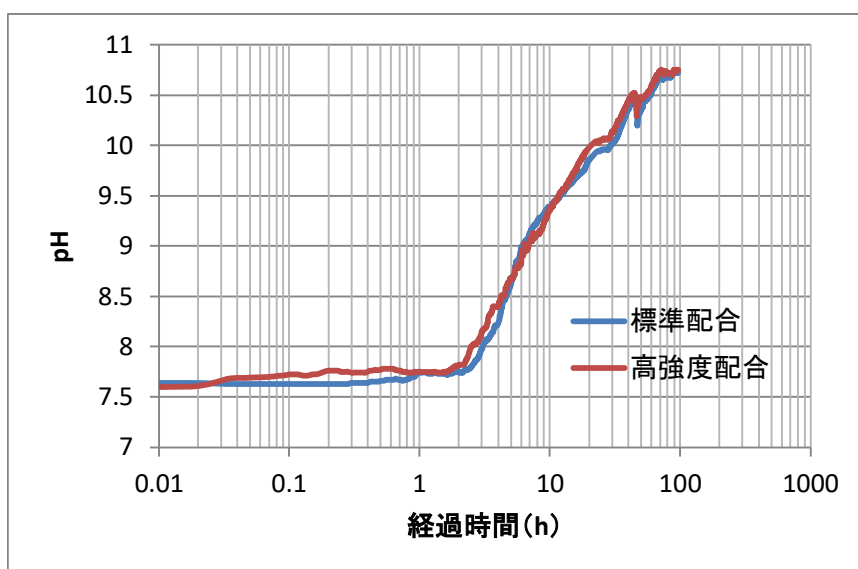


図 4.5 試験結果（水道水・時間軸を対数に変更）

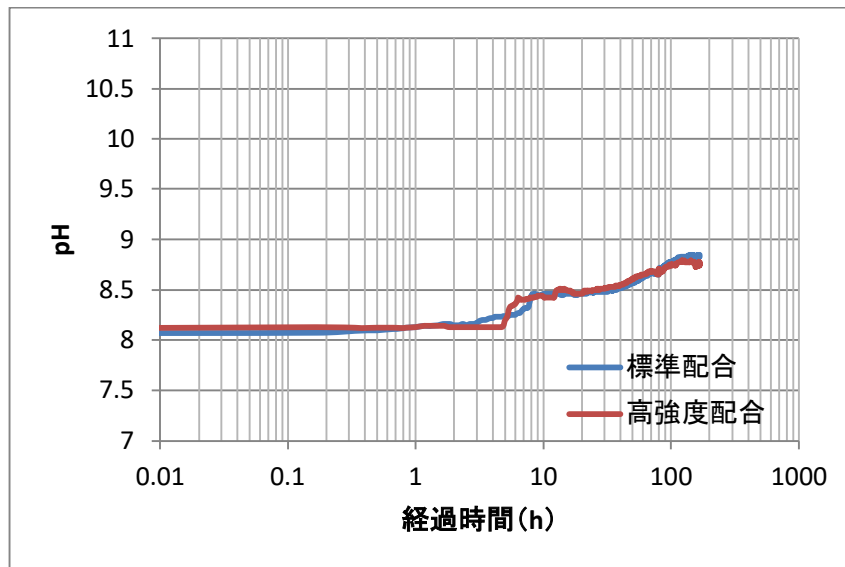


図 4.6 試験結果 (海水・時間軸を対数に変更)

4.3. 周辺水の pH を上昇させる諸要因の確認試験

4.3.1. 試験概要

先の試験において、可塑性グラウト材料における水中における周辺水の pH の上昇傾向について確認した。ここでは、pH の上昇傾向に関して、水セメント比や単位セメント量、高炉スラグ微粉末、シリカフェーム等の混和材による影響について確認することを目的とし、試験を実施した。

4.3.2. 試験方法

先の試験では、NEXCO 規格に示された水中分離抵抗性試験方法を元にした方法により、グラウト材料による周辺水の pH の上昇傾向について試験を行った。しかし、この方法では、水槽内において、場所によって pH 値にバラツキがでる可能性があることや、水中内において自立する必要があること（自立せずに、横に広がる配合の場合、水との接触面積が異なり、比較が困難になる）など、流動性の異なる配合で比較試験を行うには問題がある。

そこで、流動性の異なる配合でも比較可能とし、かつ水槽内における pH 値のバラツキをなくすために、下記試験方法を考案し実施した。

試験は図 4.7 および写真 4.2 に示す装置を用い、下記手順で実施した。試験状況を写真 4.3 に示す。

- i) 水槽（W:30cm×D:17cm×H:24cm）に水道水を 10L 投入する。
- ii) 水槽内に攪拌子を入れマグネティックスターラにより 200～250rpm 程度で攪拌する。攪拌は pH の測定終了まで継続する。
- iii) pH 計を設置し pH の測定を開始する。pH 計はデータロガー機能を有するものを使用し、連続的にデータを測定する。
- iv) 容量約 55cc のカップに練混ぜ直後のグラウト材を 50cc 入れたものを 2 ケ用意し、水槽の 2 隅に対角状に静置する。なお、カップ 1 ケ当たりのグラウト材と水との接触面積は約 1,400mm² であり、カップ 2 ケでは約 2,800mm² となる。
- v) グラウト材を水槽に静置後、pH の低下が確認できるまで pH の測定を行う。

試験中マグネティックスターラによって攪拌状態としたのは、水槽内の pH を均一にするためである。また、試験に用いた水道水の水温、試験室温度ともに 20℃として試験を行った。

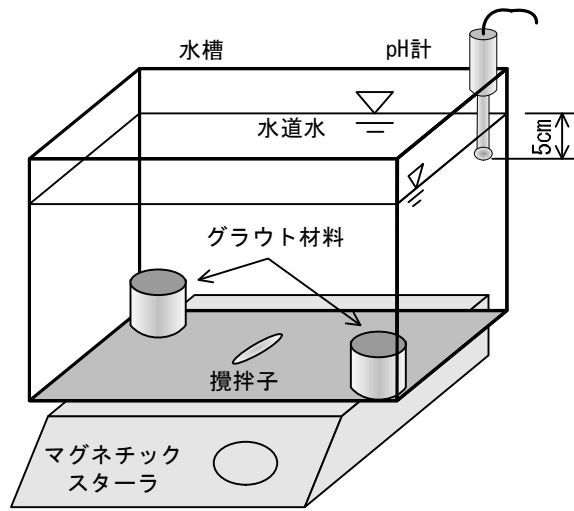


図 4.7 試験装置

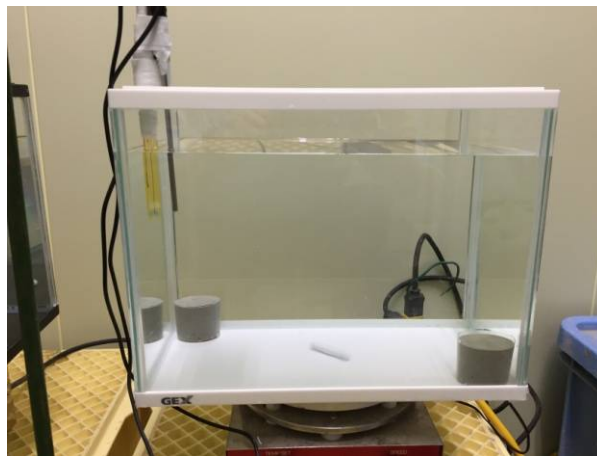


写真 4.2 試験装置

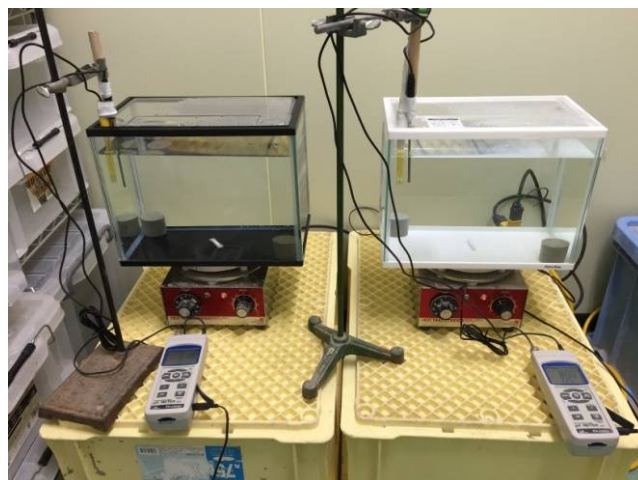


写真 4.3 試験状況

4.3.3. 水セメント比および単位セメント量による影響の確認

ここでは、水セメント比および単位セメント量が周辺水の pH 上昇に与える影響を確認した。表 4.2 に試験配合の一覧を示す。

表 4.2 試験配合

W/C	1m ³ 当たり配合 kg			
	セメント	珪砂	水	増粘剤
50%	1224	0	612	6.12
	918	651	459	4.59
	612	1301	306	3.06
80%	895	0	716	7.16
	612	823	490	4.90
	459	1268	367	3.67
132%	612	0	807	8.07
	459	647	606	6.06
	306	1298	404	4.04

本試験では、水セメント比を 3 水準 (W/C=50%、80%、132%)、それぞれの水セメント比に対して細骨材 (珪砂 5 号) を加えることで単位セメント量を 3 水準設定した配合について pH の上昇傾向について確認した。なお、セメントは普通ポルトランドセメント (太平洋セメント製) を使用した。また、増粘剤 (水溶性セルロース) を水の 1% 添加することで、硬化前のセメント粒子の拡散を防止することとした。

図 4.8～図 4.10 に pH の経時変化を示す。また、この pH の上昇を水中における水酸化物イオンの増加と考え、水酸化物イオンの増加量の経時変化として整理した図を図 4.11～図 4.13 に示す。これは、本試験において試験開始前の水道水の pH が若干異なること、このような整理をすることで、試験結果がより明確となることから、このような整理を行った。さらに、各配合における水酸化物イオン増加量の最大値と単位セメント量の関係を図 4.14 に示す。

本試験の結果、単位セメント量が大きくなるほど水酸化イオンの増加量は大きくなり、さらに同じ単位セメント量であれば、水セメント比が大きくなるほど (貧配合になるほど)、水酸化物イオンの増加量は大きくなることがわかった。つまり、単位セメント量が小さく、かつ水セメント比が小さく緻密な配合ほど、周辺水の pH の上昇を抑制できる可能性があることが分かった。

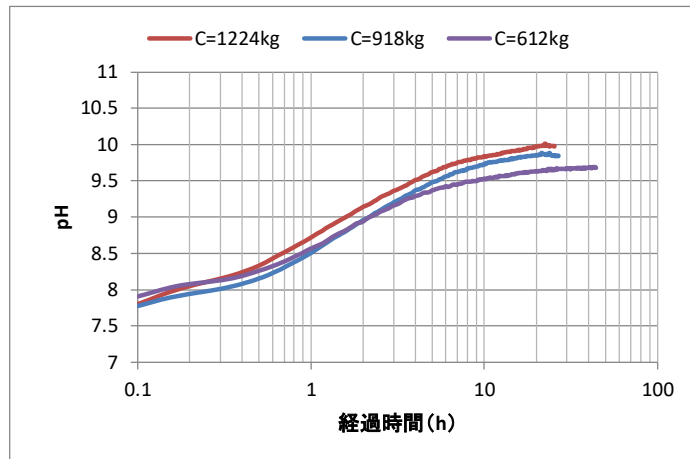


図 4.8 pH の経時変化 (W/C=50%)

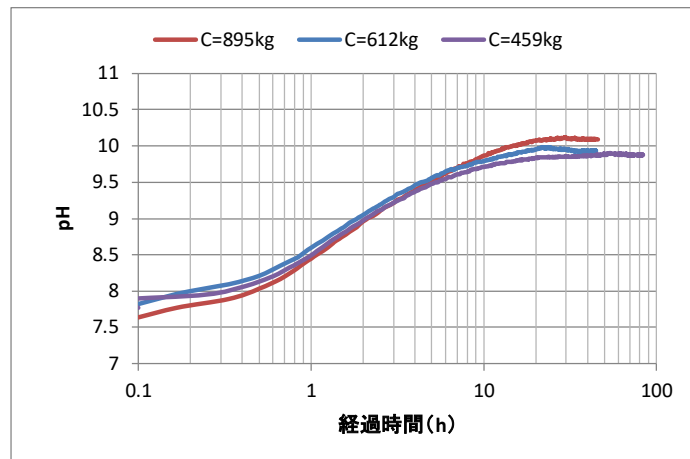


図 4.9 pH の経時変化 (W/C=80%)

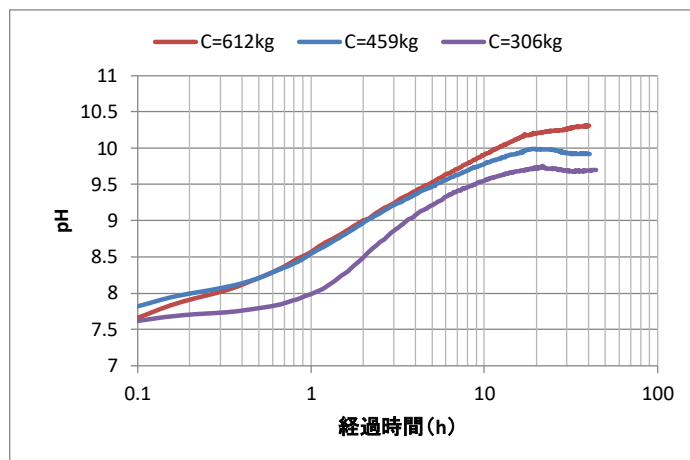


図 4.10 pH の経時変化 (W/C=132%)

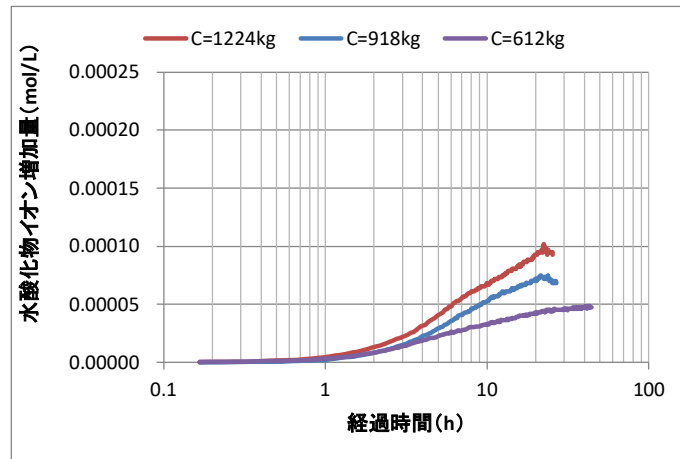


図 4.11 水酸化物イオン増加量の経時変化 (W/C=50%)

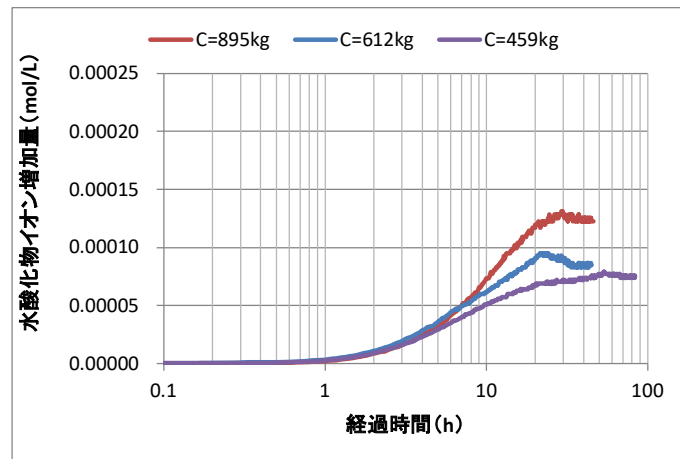


図 4.12 水酸化物イオン増加量の経時変化 (W/C=80%)

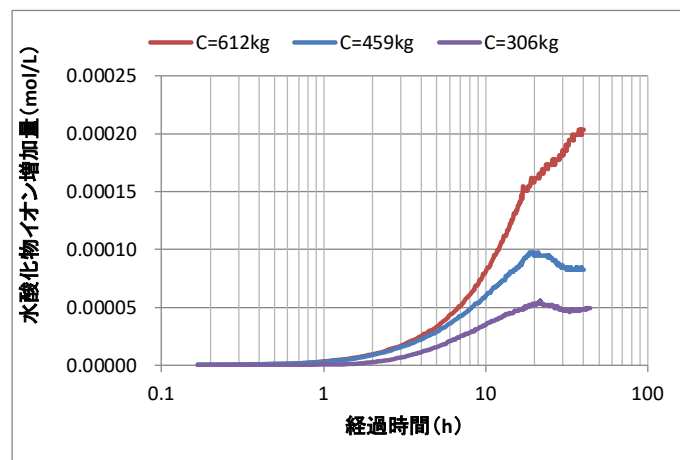


図 4.13 水酸化物イオン増加量の経時変化 (W/C=132%)

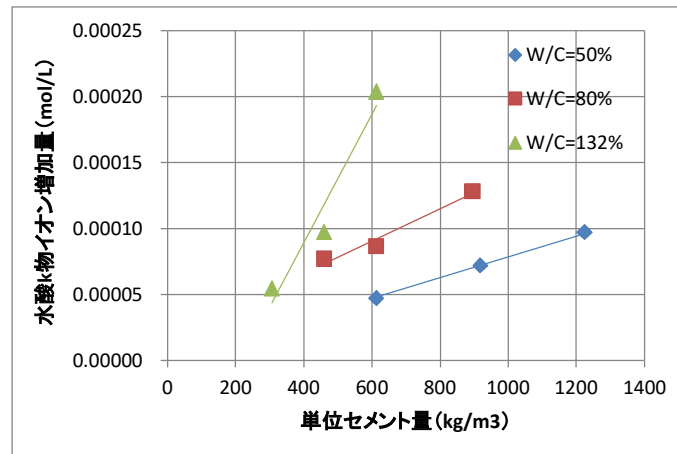


図 4.14 水酸化物イオン増加量と単位セメント量の関係

4.3.4. 混和材の混合による影響の確認

ここでは、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームの混合が周辺水の pH 上昇に与える影響を確認した。

本試験において、セメントは普通ポルトランドセメント（太平洋セメント製）、高炉スラグ微粉末は 4000 ブレーン（ダイシイ製）、シリカフェームはカナダ産を使用した。

試験配合について、高炉スラグ微粉末を混合した配合は、水セメント比 50% のセメントミルクに対して、重量比でセメントの 0%、25%、50%、75%、高炉スラグ微粉末を置換した配合とした。シリカフェームを混合した配合は、水セメント比 50%、単位セメント量 612kg/m³ のモルタル（骨材は珪砂 5 号使用）に対して、重量比で 50% 高炉スラグ微粉末を置換した配合について、さらにシリカフェームを 0%、5%、10% 置換した配合とした。いずれの配合も、先の試験同様、増粘剤（水溶性セルロース）を水の 1% 添加することで、硬化前のセメント粒子の拡散を防止することとした。

図 4.15 に高炉スラグ微粉末を置換した配合の、水酸化物イオン増加量の経時変化を示す。また図 4.16 に高炉スラグ微粉末置換率と水酸化物イオン増加量の関係を示す。本試験の結果、高炉スラグ微粉末の置換率が 50% までは、置換率を大きくするにつれて水酸化物イオンの増加量が減少するが、置換率を 75% にすると逆に増加する結果となった。この結果より、高炉スラグ微粉末の置換率は 50% 程度とするのが、周辺水の pH 上昇を抑制するのに効果的であることがわかった。

図 4.17 にシリカフェームを置換した配合の、水酸化物イオン増加量の経時変化を示す。また図 4.18 にシリカフェーム置換率と水酸化物イオン増加量の関係を示す。本試験の結果、シリカフェームの置換率を大きくすると、水酸化物イオンの増加量が減少する傾向が見られたが、シリカフェームの置換率 5% と 10% の差は小さかった。この結果より、シリカフェームの置換も周辺水の pH 上昇を抑制する効果があることがわかった。

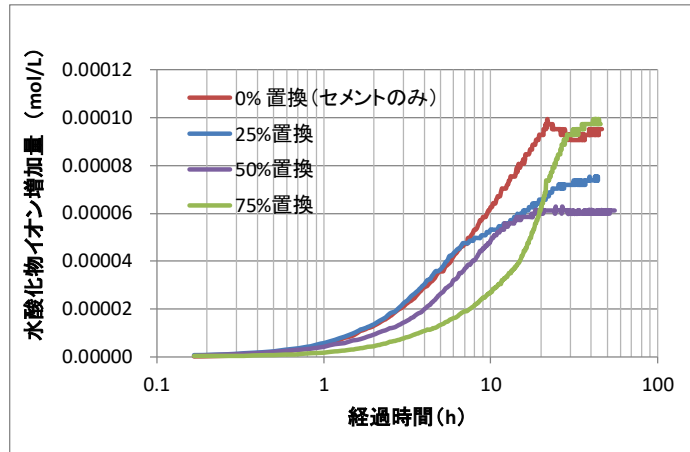


図 4.15 水酸化物イオン増加量の経時変化（高炉スラグ微粉末置換）

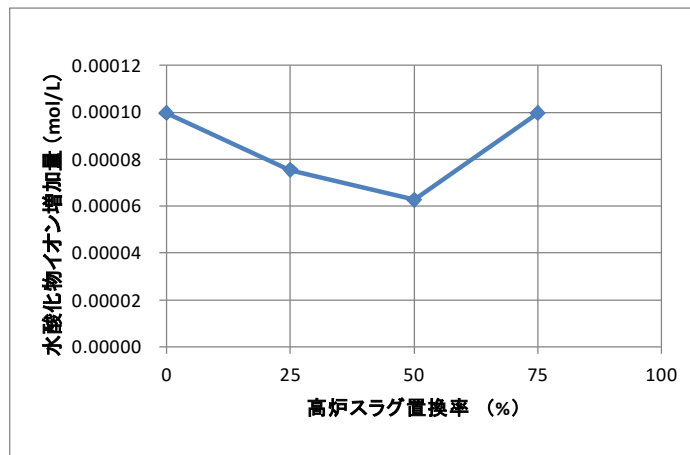


図 4.16 高炉スラグ微粉末置換率と水酸化物イオン増加量の関係

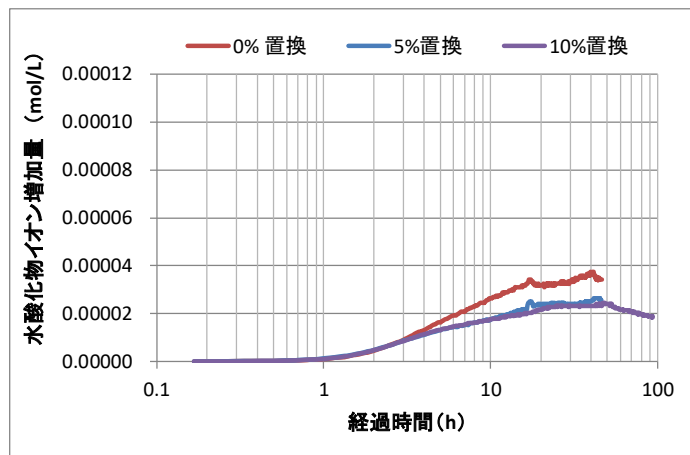


図 4.17 水酸化物イオン増加量の経時変化（シリカフェーム置換）

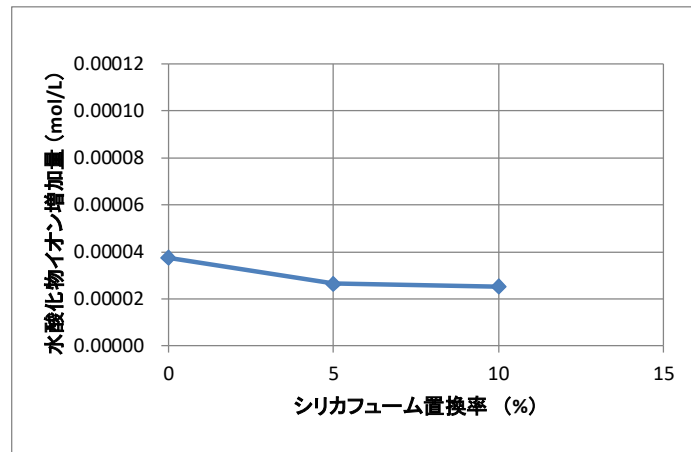


図 4.18 シリカフェーム置換率と水酸化物イオン増加量の関係

4.3.5. まとめ

本試験の結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) W/C が小さい方が pH の上昇は小さい。
- 2) 単位セメント量が少ない方が pH の上昇は小さい。
- 3) 高炉スラグを置換すると（置換率 50%程度）pH の上昇を抑制できる。
- 4) シリカフェームを置換すると（置換率 5~10%程度）pH の上昇を抑制できる。

4.4. 基礎的な検討

4.4.1. 既往の低アルカリ性固化材に関する研究

セメント系材料の低アルカリ化をはかる試みは、主に放射性廃棄物の地層処分の分野で進められている。これは処分施設の建設に当たり普通セメントを用いた場合、処分施設の周辺環境が高アルカリ性となり、バリア材料として用いられるベントナイトや周辺の岩盤が超長期的に変質する可能性があるためである²⁾。セメントの低アルカリ化をはかる方法として、フライアッシュやシリカフェーム等のポゾラン材料を多量に混合することで、浸出水の pH を低くする方法²⁾や、カルシウムサルフォアルミネートを主要構成化合物とする低アルカリ性セメント³⁾等が開発されている。

可塑性グラウト材料の分野においても固化材として酸化マグネシウムを使用した中性系可塑性充填材が開発されている⁴⁾。これは pH 調整剤として硫酸アルミニウムを用いることで、硬化前後において中性域 (pH5.8~8.6) での施工を可能としている。ただしグラウト材の強度については、一般的な空洞充填材として用いられる 1.5N/mm²程度 (材齢 28 日) が基本となっている。

この他、低アルカリを目的としているわけではないが、CO₂ 排出量の削減を目的とし、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末などの産業副産物を主材料とし、セメント量を限りなく少なくしたモルタル、コンクリートの研究が進められている^{5),6),7)}。これらはわずかなセメント量もしくはセメントを使用せずに、材齢 28 日で 60N/mm² 以上の圧縮強度が得られる材料であり、高強度で低アルカリ化がはかれる可能性がある。

4.4.2. セメント系材料における pH 上昇のメカニズム

セメント系材料を水中に打込みもしくは充填した場合において、周辺水の pH が上昇する主な要因は、セメント中にわずかに含まれる未反応の遊離酸化カルシウム (フリーライム) と水との反応で生成される水酸化カルシウム (反応 1) と、セメントと水の水和反応の過程で生成される水酸化カルシウム (反応 2) であると考えられる。これらの反応を以下に示す。

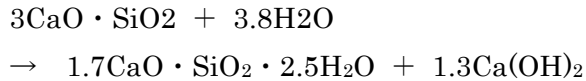
(反応 1)

セメント中の遊離酸化カルシウムと水が反応すると、水酸化カルシウムが生成される。

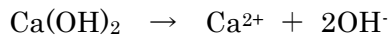


(反応 2)

セメントの水和反応により水酸化カルシウムが生成される。ここでは、比較的早い段階における反応であるエーライトによる反応⁸⁾について示す。



これらの反応によって生成された水酸化カルシウムの一部がグラウト材の外部に溶出すると、次に示すとおり、溶出した水酸化カルシウムは、水中では水酸化物イオンとカルシウムイオンに電離する。



電離することによって、水中の水酸化物イオン濃度が上昇するため pH が上昇する。上記に示した 2 種類の反応のうち、(反応 1) についてはセメントと水の混練時に起こる反応であり、グラウト材料そのものの pH が高くなる (pH : 12 以上) 要因となり、基本的には 1 次的なものと考えられる。それに対し (反応 2) については硬化の過程で生じる反応であり、ここでは示さなかったが、ビーライトによる反応も合わせて、長期間にわたって水酸化カルシウムの生成が継続することから、それらの一部の溶出により、周辺水の pH 上昇が継続することが考えられる。

早期の反応である (反応 1) については、水中不分離性混和剤等を混合し、間隙水を増粘させ、セメント粒子の拡散を抑制することで、周辺水の pH 上昇を抑制することができると考えられる。それに対し (反応 2) については、水和反応に伴う水酸化カルシウム生成自体を抑制する必要がある。

本材料の開発に当たり、(反応 1) に対しては増粘剤や可塑性を発現させるための混和剤等を使用することで対応できることから、(反応 2) を抑制することに対し主眼を置き、開発を進めることとした。

4.4.3. 使用材料の検討

本研究においては、特殊なセメント (固化材)、材料等を使用せず、できるだけ汎用的な材料で低アルカリ化をはかることを目指した。また、グラウト材の強度については、構造物の基礎等の空洞充填にも適用できるよう、材齢 28 日で 24N/mm^2 以上の圧縮強度を目標とし、使用材料について検討を行った。

本研究では、先に示した基礎的な試験の結果や、既往の研究も踏まえ、水和反応に伴う水酸化カルシウムの生成および溶出を抑制する方法として、「セメント量の低減」と「混和材の大量混合」を基本とすることとした。

「セメント量の低減」は、水酸化カルシウムが生成される主要因であるセメント (普通ポルトランドセメント) 自体の混合量を減らすことで、グラウト材全体として水酸化カルシウムの生成量を減らし、周辺水の pH の上昇を抑制しようとするものである。セメント量の低減に当たっては、セメントの一部を何らかの混和材に置換することや、珪砂の混合

等が考えられる。

「混和材の使用」は、フライアッシュ、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末等の混和材を混合することで、セメント量を低減させるとともに各混和材の効果によって、水酸化カルシウムの生成を抑制しようとするものである。

混和材の中で、フライアッシュ、シリカフェームといったポゾラン物質は、セメントの水和反応によって生成される水酸化カルシウムを消費し、カルシウムシリケート水和物を生成する。また生成されたカルシウムシリケート水和物によって、セメント硬化体中の微細な空隙が充填されるため、硬化体がより密実になる。つまり、ポゾラン物質を混合すると、ポゾラン反応によって水酸化カルシウムが消費され、さらに硬化体が密実になることで、硬化体の外部に溶出する水酸化カルシウムが低減することが期待される。高炉スラグ微粉末については、セメントに置換することでセメント量の低減がはかれる。また、高炉スラグ微粉末が有する潜在水硬性によって水酸化カルシウムも消費されることから、それに伴い水酸化カルシウムの溶出が低減することが期待される。

本材料の開発に当たっては、上記に示した「セメント量の低減」と「混和材の使用」を基本とすることとし、基本的な粉体の配合については、先に既往の研究例で示したセメント量を限りなく少なくしたモルタル、コンクリートの研究事例^{5), 6), 7)}を踏まえ検討した。さらにこれらを補助する目的で硬化促進剤や高性能 AE 減水剤、可塑性を発現させるための混和材（剤）等を混合することで、水酸化カルシウムの溶出を抑制した可塑性グラウトの開発を目指した。

4.5. 試験配合および試験の流れ

使用材料の一覧を表 4.3 に示す。また試験配合の一覧を表 4.4 に示す。

表 4.3 使用材料一覧

材料	種類	記号	密度 g/cm ³
結合材 (B)	普通ポルトランドセメント	OPC	3.16
	高炉セメントB種	BB	3.04
	フライアッシュJIS2種	FA	2.34
	高炉スラグ微粉末4000	BS	2.90
	シリカフェーム	SF	2.20
	無水石こう	AG	2.90
細骨材	珪砂6号	S	2.60
増粘剤	水溶性セルロース	VA	1.38
硬化促進剤	塩化カルシウム	AC	1.84
可塑材	粘土鉱物系	PM	2.60
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	SP	1.07
水	水道水	W	1.00

表 4.4 試験配合一覧

Step	配合	W/B %	S/B vol %	粉体配合比率 %						VA W×%	AC B×%	PM B×%	SP B×%
				OPC	FA	BS	SF	AG	BB				
1	OPC50-P-1	50	0	100	0	0	0	0	0	0.5	0.00	0.00	0.0
	BB50-P-1	50	0	0	0	0	0	0	100	0.5	0.00	0.00	0.0
	BB50-M-1	50	100	0	0	0	0	0	100	0.5	0.00	0.00	0.0
	LC22-M-2	22	100	10	40	40	0	10	0	0.5	0.00	0.00	2.0
1,2,3	LC22-P-2	22	0	10	40	40	0	10	0	0.5	0.00	0.00	2.0
2	LC22-P-3	22	0	10	60	20	0	10	0	0.5	0.00	0.00	2.0
	LC22-P-4	22	0	10	40	35	5	10	0	0.5	0.00	0.00	2.0
	LC22-P-5	22	0	10	40	30	10	10	0	0.5	0.00	0.00	2.0
3	LC22-P-2-5	22	0	10	40	40	0	10	0	0.5	0.58	0.00	2.0
	LC22-P-2-10	22	0	10	40	40	0	10	0	0.5	1.17	0.00	2.0
	LC22-P-2-15	22	0	10	40	40	0	10	0	0.5	1.75	0.00	2.0
4	LC22-P-6-15	22	0	5	40	40	5	10	0	0.5	0.89	0.00	2.0
	LC22-M-6-15	22	100	5	40	40	5	10	0	0.5	0.89	0.00	2.0
	LC22-P-7-50	22	0	2.5	40	40	7.5	10	0	0.5	1.50	0.00	2.0
	LC22-M-7-50	22	100	2.5	40	40	7.5	10	0	0.5	1.50	0.00	2.0
5	LC30-M-6-25	30	100	5	40	40	5	10	0	0.5	1.49	0.00	2.0
	LC30-P-6-25-25	30	0	5	40	40	5	10	0	0.5	1.49	1.49	2.0
	LC30-P-6-25-50	30	0	5	40	40	5	10	0	0.5	1.49	2.98	2.0
	LC30-M-6-25-25	30	100	5	40	40	5	10	0	0.5	1.49	1.49	2.0
	LC30-M-6-25-50	30	100	5	40	40	5	10	0	0.5	1.49	2.98	2.0

本研究では下記 5 つのステップで試験を進めた。

Step1 として、結合材 (B) に一般的な普通ポルトランドセメント (OPC) および高炉セメント B 種 (BB) を単独で使用した配合と、低セメント型コンクリート^{5),6),7)}を踏まえて設定した配合 (以下 LC 配合と記す) の性状を比較、確認することを目的として基礎的な検討および試験を実施した。

OPC および BB を使用した配合については、既存の高強度の可塑性グラウトの配合 (表 4.1 に示した高強度配合) を踏まえ、水セメント比を 50% とし、そこに水中不分離性を付与するための増粘剤 (VA) を添加した配合とした。LC 配合については、既往の研究⁷⁾を踏まえ、結合材として OPC、フライアッシュ (FA)、高炉スラグ微粉末 (BS) および無水石こう (AG) を 1:4:4:1 でブレンドした配合を用いた。

さらにここでは、BB 配合と LC 配合において、骨材を入れない配合 (セメントペースト) と骨材を入れた配合 (モルタル、細骨材として珪砂 6 号を使用) についても試験を実施し、性状を確認した。

Step2 として、Step1 の試験を実施する中で明らかになった課題 (グラウト材のダイラタンシー性状) について改善することを目的として、検討および試験を実施した。

ダイラタンシー性状は、図 4.19 に示すダイラタント流体に見られる、ずり応力とずり速度の関係においてずり速度が大きくなるにつれて傾きが大きくなる性状である。これは可塑性グラウト材料に求められる性状 (ビンガム塑性もしくは擬塑性) と相反する性状であり、Step1 における LC 配合の試験においてこの性状が見られたことから改善の必要が生じた。

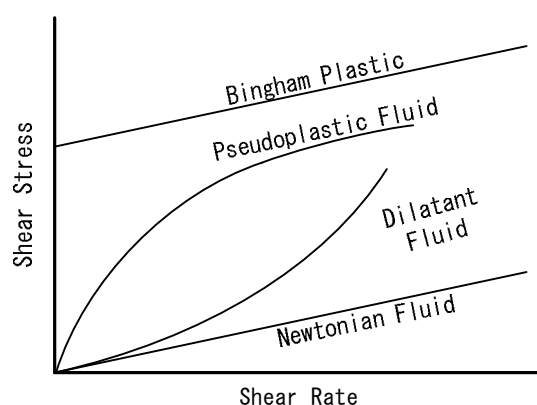


図 4.19 各種流体のせん断速度とせん断応力の関係

混和材を大量に混合したコンクリートにおけるダイラタンシー性状の発現およびその改善については、既往の研究⁹⁾においても報告されている。本研究においては、FA と BS の配合比率の変更やシリカフェーム (SF) の添加によりダイラタンシー性状の改善を試みた。

Step3 として、Step1 の試験を実施する中で明らかになった課題（初期硬化の遅延）について改善することを目的として、検討および試験を実施した。

Step1 で実施した LC 配合の試験では、材齢 1 日では脱型可能な強度に達しておらず、LC 配合の特に初期強度の発現が遅いことがわかった。そこで、硬化促進剤を添加することとし、硬化促進剤の効果および pH に対する影響について確認した。

Step4 として、pH をさらに低下させることを目的とし、セメント量のさらなる低減について、検討および試験を行った。

具体的には、LC 配合について Step2 においてダイラタンシー性状の改善に効果のあった SF を添加した上で、結合材中のセメント量を 5%、2.5% に低下させた。さらに、Step3 において効果を確認した AC を添加した。また、本 Step においては Step1 同様、骨材を入れた配合と入れない配合で試験を行っている。

Step5 として、可塑性を発現させるための混和剤（可塑剤）を混合した配合について、試験を行った。

可塑剤（PM）としては、粘土鉱物系の可塑剤を使用した。LC 配合に可塑剤を外割で添加するにあたり、本 Step においては W/B を 22% から 30% に大きくした配合とした。また本 Step においても、骨材を入れた配合と入れない配合で試験を行っている。

4.6. 試験方法

4.6.1. 材料の練混ぜ方法

本試験では、ホバート型モルタルミキサを使用し、材料の練混ぜを行った。材料の練混ぜは、水、高性能 AE 減水剤を除くすべての材料をビニール袋に入れ、そのビニール袋を良く振って粉体を混合した後、ミキサに水、高性能 AE 減水剤およびビニール袋内で混合した粉体を入れ、低速（139rpm）で 5 分間混合した。

4.6.2. 試験項目

本研究において実施した試験項目を以下に示す。

(1) 圧縮強度

グラウト材料の圧縮強度を確認することを目的として実施した。

試験は JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し測定した。ただし、供試体についてはφ50×100mm の円柱供試体を用い、材齢 1～3 日で脱型後、試験材齢まで 20℃で封緘養生を行った。

なお、材齢 1 日で実施した試験については、低強度であり JIS A 1108 では載荷速度が速いと考え、軸ひずみ制御（0.5～1.0%/min）で試験を行った。

(2) pH 変化測定

グラウト材料の周辺水の pH の経時変化を測定することを目的として下記方法を考案し実施した。

試験は図 4.20 および写真 4.4 に示す装置を用い、下記手順で実施した。試験状況を写真 4.5 に示す。

- i) 水槽（W:30cm×D:17cm×H:24cm）に水道水を 10L 投入する。
- ii) 水槽内に攪拌子を入れマグネティックスターラにより 200～250rpm 程度で攪拌する。攪拌は pH の測定終了まで継続する。
- iii) pH 計を設置し pH の測定を開始する。pH 計はデータロガー機能を有するものを使用し、連続的にデータを測定する。
- iv) 容量約 55cc のカップに練混ぜ直後のグラウト材を 50cc 入れたものを 2 ケ用意し、水槽の 2 隅に対角状に静置する。なお、カップ 1 ケ当たりのグラウト材と水との接触面積は約 1,400mm² であり、カップ 2 ケでは約 2,800mm² となる。
- v) グラウト材を水槽に静置後、pH の低下が確認できるまで pH の測定を行う。

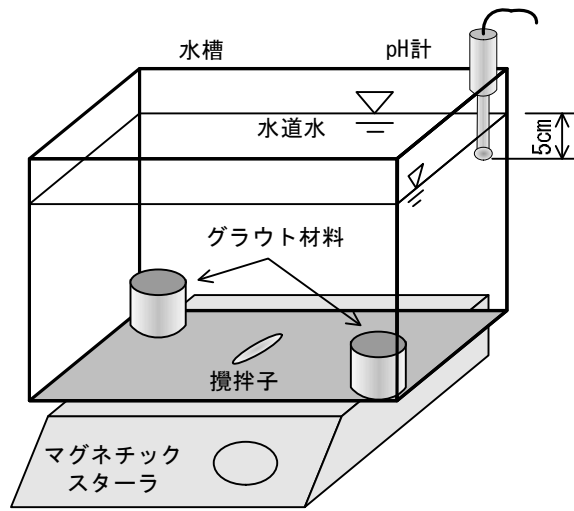


図 4.20 試験装置

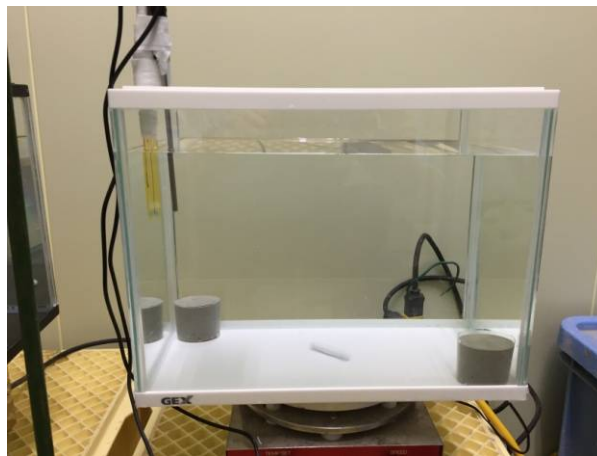


写真 4.4 試験装置

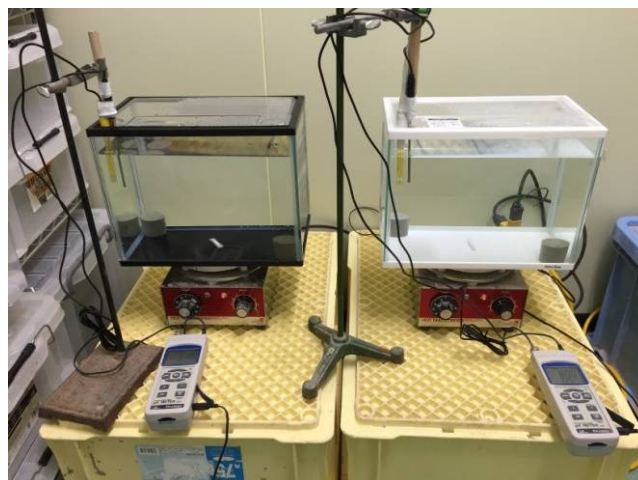


写真 4.5 試験状況

試験中マグネティックスターラによって攪拌状態としたのは、水槽内の pH を均一にするためである。また、試験に用いた水道水の水温、試験室温度ともに 20℃として試験を行った。

グラウト材料による周辺水の pH 上昇は、グラウト材と水との接触面積と水の体積が大きく影響する。本試験では、基本となる配合である OPC50-P-1 において予備試験を実施し、概ね pH の最大値が 10 程度となるよう水の体積と接触面積を設定した。

pH 測定の継続時間については、気中の二酸化炭素による中和が主な原因と考えられる pH の低下が確認できるまでとし、24～72 時間程度測定を行った。

本研究では、この基本となる配合 (OPC50-P-1) における pH の最大値である 10 程度 (実測値として 9.81) をスタートとして、どの程度まで pH の値を下げるができるかという観点で研究を進めた。

(3) 貫入抵抗試験

グラウト材料のレオロジー性状を簡易に判定することを目的とし、既往の研究で実施された貫入抵抗試験による方法⁹⁾をさらに発展させた下記方法を考案し実施した。

プロクター貫入試験器 (JIS A 1147 記載の貫入抵抗試験装置) を用い、貫入針の貫入速度を変化させることで、グラウト材料のダイラタンシー性状を確認した。なお一般的なコンクリートのプロクター貫入試験に比較し、貫入時の測定荷重の値が小さいことから、計量値を 0.1 秒間隔で連続的にパソコンに出力可能な電子ばかりを用い、その電子ばかり上で貫入試験を行うことで貫入時の最大荷重を測定した。貫入深度は 25mm で一律とし、貫入速度は 2.5mm/s (通常のプロクター貫入試験の貫入速度) からその 10 倍の 25mm/s まで変化させ、貫入抵抗の値の変化を確認した。

4.7. 試験結果

表 4.5 に試験結果の一覧を示す。表中には pH 変化測定における pH の最大値と所定の pH 値に至るまでの経過時間、および圧縮強度を示した。以下、試験の Step ごとに試験結果をまとめる。

表 4.5 試験結果一覧

Step	配合	W/B %	S/B vol %	pH最大値	pHが最大となるまでの時間 h : m				圧縮強度 N/mm ²		
					pH:8.0	pH:8.5	pH:9.0	pH:Maximum	材齢1日	材齢7日	材齢28日
1	OPC50-P-1	50	0	9.81	0:20	0:45	1:30	17:00	-	-	-
	BB50-P-1	50	0	9.51	0:30	1:15	2:35	20:25	-	-	-
	BB50-M-1	50	100	9.47	0:20	1:00	2:30	23:00	-	-	-
	LC22-M-2	22	100	8.98	2:15	5:05	-	21:55	-	48.6	70.0
1,2,3	LC22-P-2	22	0	9.43	0:40	2:05	5:15	20:50	-	46.1	70.0
2	LC22-P-3	22	0	-	-	-	-	-	-	36.5	59.7
	LC22-P-4	22	0	-	-	-	-	-	-	46.4	70.5
	LC22-P-5	22	0	-	-	-	-	-	-	48.9	62.2
3	LC22-P-2-5	22	0	-	-	-	-	-	0.94	66.5	76.7
	LC22-P-2-10	22	0	-	-	-	-	-	3.15	71.7	75.1
	LC22-P-2-15	22	0	9.18	1:45	3:35	8:45	17:05	5.43	71.9	76.7
4	LC22-P-6-15	22	0	8.82	1:55	6:00	-	18:55	-	57.7	66.0
	LC22-M-6-15	22	100	8.55	3:15	26:35	-	50:20	-	59.2	68.5
	LC22-P-7-50	22	0	8.73	3:20	9:50	-	21:50	-	45.8	62.2
	LC22-M-7-50	22	100	8.54	6:15	33:15	-	45:35	-	50.5	71.0
5	LC30-M-6-25	30	100	8.80	1:50	6:55	-	22:00	-	44.5	55.3
	LC30-P-6-25-25	30	0	9.16	2:30	5:05	11:20	20:00	0.31	48.4	58.3
	LC30-P-6-25-50	30	0	8.98	0:45	3:45	-	14:10	3.10	49.3	65.6
	LC30-M-6-25-25	30	100	8.72	2:20	7:30	-	18:05	-	54.2	60.5
	LC30-M-6-25-50	30	100	8.66	0:55	6:00	-	13:45	2.09	50.9	69.1

4.7.1. Step 1

Step1 では、結合材に一般的な普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を単独で使用した配合と、LC 配合の性状を比較、確認することを目的とし、全配合で pH 変化測定を、LC 配合のみ圧縮試験（材齢 7 日および 28 日）を実施した。

図 4.21 に pH 変化測定の結果を示す。

結合材を普通ポルトランドセメント (OPC) のみとしたセメントペースト配合 (OPC50-P-1) の pH の最大値は 9.81 となり、最も大きな値となった。それに対し、結合材を高炉セメント B 種 (BB) のみとしたセメントペースト配合 (BB50-P-1) の pH の最大値は 9.51 であり、OPC 配合に比べて低下した。また、結合材を BB のみとし珪砂を混合したモルタル配合 (BB50-M-1) の pH の最大値は 9.47 となり、セメントペースト配合に比べるとわずかに低下したが、その差は小さかった。

LC 配合については、セメントペースト配合 (LC22-P-2) の pH の最大値は 9.43 であり、BB 配合に比べてわずかに低い程度であったが、珪砂を混合したモルタル配合 (LC22-M-2) の pH の最大値は 8.98 となり大きく低下した。

圧縮強度については、表 4.5 に示すとおり、LC 配合において目標とする強度（材齢 28 日で 24N/mm²以上）を十分満足できることが確認できた。

以上の結果を踏まえ、既往の可塑性グラウトにおいて使用されている OPC や BB に変えて、結合材として LC 配合を用い、さらに骨材（珪砂）を加えた配合とすることで、高強度でかつ pH の上昇を抑制できる配合とすることができると考え、LC 配合について詳細に試験を進めることとした。

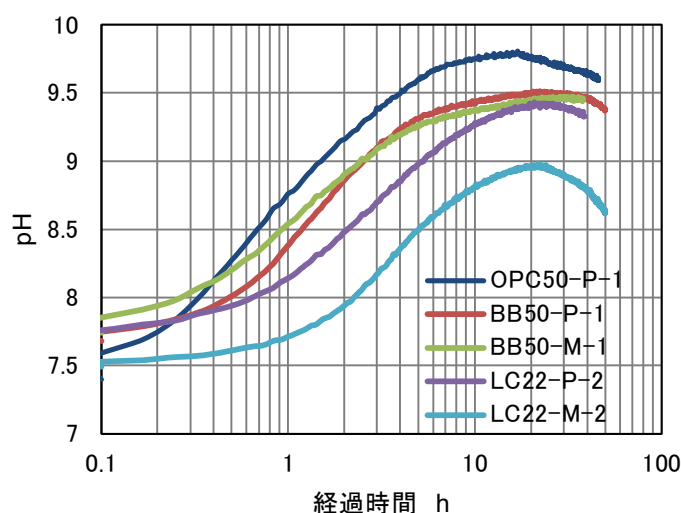


図 4.21 pH 変化測定試験結果 (Step1)

4.7.2. Step 2

Step1 の LC 配合の試験において、ミキサによる練混ぜ時にダイラタンシー性状が疑われる現象が見られた。具体的には、攪拌時にミキサに大きな負荷がかかり、攪拌を止めるとミキサ内の材料がすぐにレベリングしようとする性状である。

Step2 では、このダイラタンシー性状の改善を目的とし、全配合で貫入抵抗試験および圧縮試験（材齢 7 日および 28 日）を実施した。

図 4.22 に貫入抵抗試験の結果（貫入速度と貫入抵抗値の関係）を示す。貫入抵抗値と貫入速度は、それぞれせん断応力とせん断速度に関連すると考えられることから、このグラフの曲線形状から、レオロジー性状の判定を行うこととした。

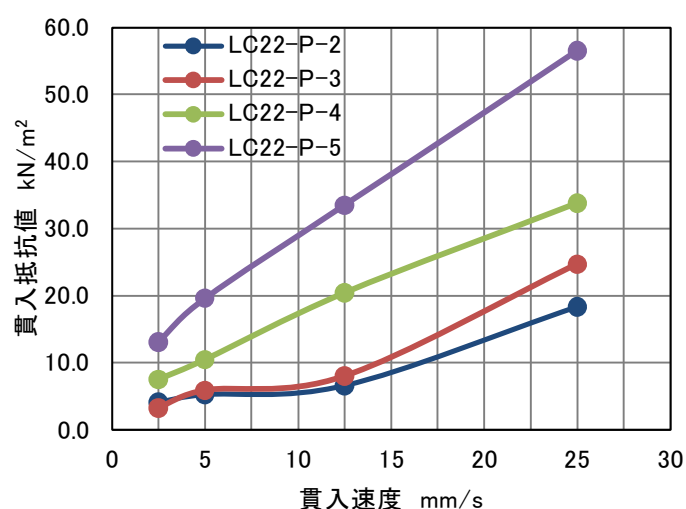


図 4.22 貫入速度と貫入抵抗値の関係 (Step2)

試験の結果、Step1 においてダイラタンシー性状が疑われた配合 (LC22-P-2) については、貫入速度が速くなるにつれて曲線の傾きが大きくなっており、ダイラタンシー流体としての特徴が見られた。また、結合材中の高炉スラグ微粉末 (BS) を減らしフライアッシュ (FA) を増やした配合 (LC22-P-3) についても同様に、貫入速度が速くなるにつれて曲線の傾きが大きくなる性状が見られた。それに対し、結合材中の FA の比率をそのままとし BS の一部をシリカフェーム (SF) に置き換えた 2 つの配合 (LC22-P-4 および LC22-P-5) については、いずれもほぼ直線もしくは貫入速度が速くなるにつれて曲線の傾きがわずかに緩やかになっており、ビンガム塑性もしくは擬塑性としての特徴が見られた。この結果から LC 配合におけるダイラタンシー性状の改善にはシリカフェームの添加が有効であることを確認した。

既往の研究⁹⁾において、特定の径の粒子が極端に多く存在する場合にダイラタンシー性状に似た状態を示しやすく、ダイラタンシー性状の改善には構成する全粉の粒度分布が広くなるよう考慮すべきであることが示されている。本研究においてもフライアッシュや高

炉スラグ微粉末と粒度分布の大きく異なるシリカフェームを加えることで、結合材全体の粒度分布のバランスが変化し、レオロジー性状に影響を与えたものと考えられる。

なお、シリカフェームの添加量が多くなるとそれに伴いグラウト材料の粘性も大きく上昇するため、添加量には注意が必要と考える。

圧縮強度については、表 4.5 に示すとおり、フライアッシュの割合を増やした配合 (LC22-P-3) が材齢 7 日、28 日ともに強度が低下する傾向が見られたが、いずれの配合も目標とする強度を十分満足した。

4.7.3. Step 3

Step3 では、初期の強度発現の改善を目的とし、硬化促進剤の効果を確認するために、全配合で圧縮試験 (材齢 1 日、7 日および 28 日) を実施し、一部配合で pH 変化測定を実施した。

図 4.23 に圧縮試験の結果を示す。硬化促進剤 (AC) を添加しない配合 (LC22-P-2) では、材齢 1 日では脱型もできない状態であった。それに対し、AC の添加量を増やすにつれて材齢 1 日の圧縮強度が大きくなることが確認できた。また AC を添加した配合は添加しない配合に比べて材齢 7 日における圧縮強度の増加が大きく、材齢 28 日においても増加する傾向が見られた。

図 4.24 に pH 変化測定の結果を示す。AC を添加しない配合 (LC22-P-2) に比べて AC を添加した配合 (LC22-P-2-15) の pH の最大値は低下することが確認できた。この理由として、AC によりポゾラン反応が促進されることで、より多くの水酸化カルシウムが消費されたこと、また反応促進による緻密化が進んだことなどが考えられる。

本試験の結果、LC 配合において硬化促進剤の添加は、初期強度の増加、pH の低下の両方に有効であることが確認できた。

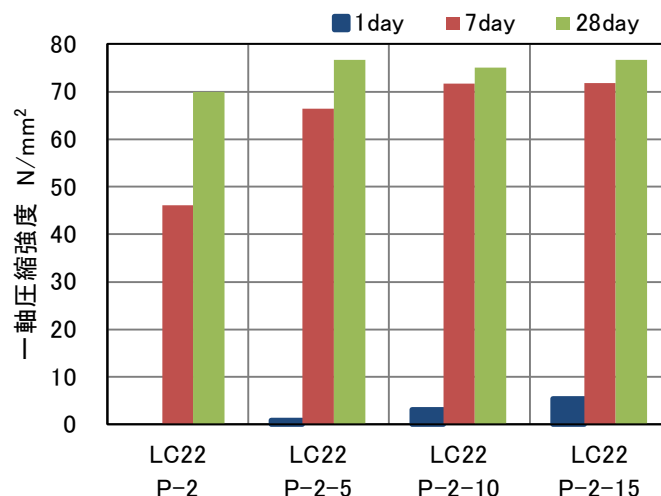


図 4.23 一軸圧縮強度試験結果 (Step3)

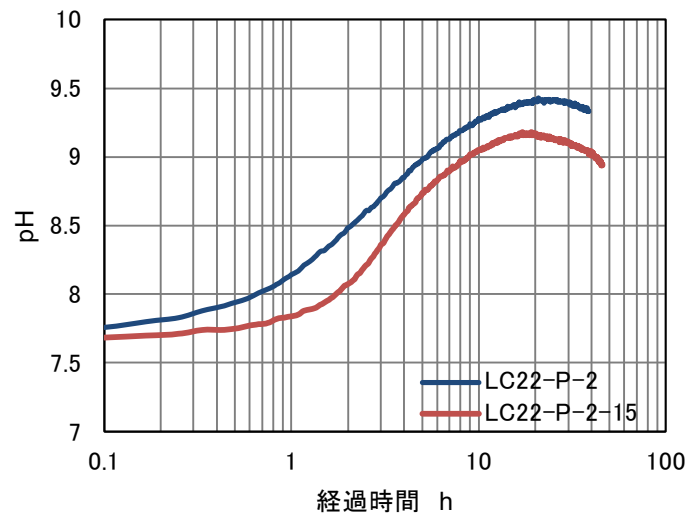


図 4.24 pH 変化測定試験結果 (Step3)

4.7.4. Step 4

Step4 では、さらなる pH の低下を目指し、セメント量をさらに減らした場合の性状を確認するために、全配合で pH 変化測定と圧縮試験（材齢 7 日および 28 日）を実施した。

図 4.25 に pH 変化測定の結果を示す。試験の結果、結合材中のセメントの比率を 5%とした配合は、セメントペースト配合 (LC22-P-6-15) で pH の最大値が 8.82、モルタル配合 (LC22-M-6-15) で pH の最大値が 8.55 となり、Step1 および Step3 で実施した結合材中のセメント比率を 10%とした配合に比べて、pH が大きく低下した。結合材中のセメント比率を 2.5%とした配合は、セメントペースト配合 (LC22-P-7-50) で pH の最大値が 8.73、モルタル配合 (LC22-M-7-50) で pH の最大値が 8.54 となり、セメント比率を 5%とした配合からの pH の低下はわずかであった。

圧縮強度については、表 4.5 に示すとおり、材齢 7 日において、結合材中のセメントの比率を 5%とした配合と 2.5%とした配合で差が生じたが、いずれの配合も目標とする強度を十分満足した。

以上の結果を踏まえ、結合材中のセメント比率は 5%を基本とし、さらに試験を進めることとした。

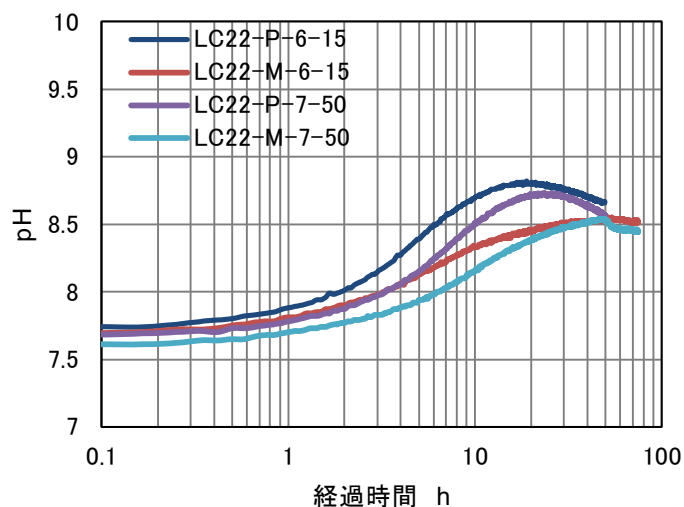


図 4.25 pH 変化測定試験結果 (Step4)

4.7.5. Step 5

Step5 では、可塑性を発現させるための混和剤（可塑剤）を混合した配合について試験を行った。

図 4.26 に pH 変化測定の結果を示す。Step4 において結合材の配合を同等とした配合（LC22-P-6-15、LC22-M-6-15）に比べて、全体として pH の最大値が大きくなった。これは、粘土鉱物系の可塑剤を添加するにあたり、水結合材比を 22%から 30%に大きくしたことが影響していると考えられる。また、可塑剤の添加量を増やすと pH の最大値は低下する傾向が見られた。これは使用した可塑剤を外割で添加しており、さらに粘土鉱物系の可塑剤を添加することでグラウト材がより密実となり、外部への水酸化カルシウムの溶出が抑制されたためと考えられる。

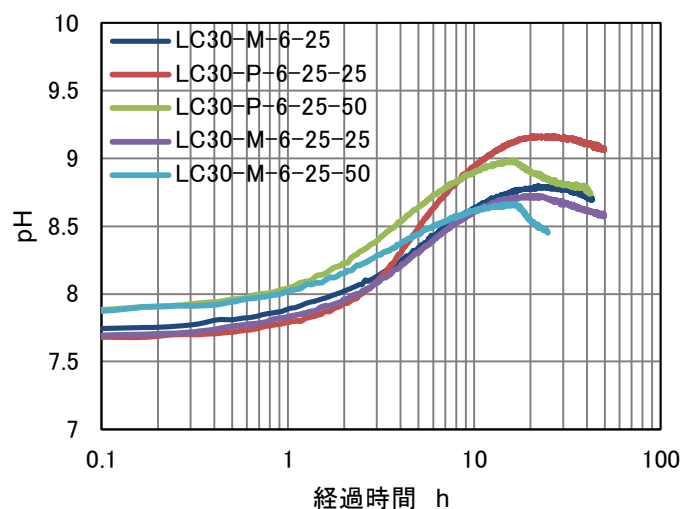


図 4.26 pH 変化測定試験結果 (Step5)

圧縮強度についても可塑剤の添加量を増やすと強度が増加する傾向が見られた。これについても、粘土鉱物系の可塑剤を外割で添加したことで、より密実となり強度が増加したものと考えらえる。また、いずれの配合も目標とする強度を十分満足した。

4.8. 最適な配合の選定

本試験の範囲において、可塑性を付与した配合で最も pH の上昇が抑制できる配合は、表 4.6 に示す、LC30-M-6-25-50 である。よって、本研究においては、最適な配合として本配合を選定する。ただし、本配合は、実現場における実際の pH の上昇等は確認できていないことから、実現場への適用性が課題である。

表 4.6 本試験範囲における最適な配合案

配合	W/B %	S/B vol%	粉体配合比率 %						VA W×%	AC B×%	PM B×%	SP B×%
			OPC	FA	BS	SF	AG	BB				
LC30-M-6-25-50	30	100	5	40	40	5	10	0	0.5	1.49	2.98	2.0

4.9. まとめ

本章の成果を以下のとおりまとめる。

- 1) セメントを極力少なくしフライアッシュや高炉スラグ微粉末を大量に混合した LC 配合は、従来の可塑性グラウトにおいて固化材として一般的に使用される普通ポルトランドセメントに比べて、**pH** の上昇が抑制できることがわかった。また LC 配合では骨材(珪砂)を入れることで、**pH** の上昇をさらに大きく抑制できることがわかった。
- 2) LC 配合におけるダイラタンシー性状の改善には、適量のシリカフェュームの添加が有効であることがわかった。
- 3) LC 配合における硬化の遅延に対しては、硬化促進剤の添加が有効であり、さらに硬化促進剤の添加は **pH** の上昇の抑制にも効果があることがわかった。
- 4) LC 配合における結合材中のセメント比率は 5%程度まで低下させることで、強度に大きな影響を与えず、**pH** の上昇を抑制できることがわかった。
- 5) 可塑性を発現させるための添加剤として粘度鉱物系の可塑剤を使用することで、**pH** の上昇を抑制でき、強度の増加もはかれることがわかった。
- 6) 本試験の範囲において、**pH** の上昇を抑制するのに最適な配合案を示した。

本研究では可塑性グラウト材料を水中に充填した際の周辺水の **pH** を 1~1.5 程度低下させることができた。これは水酸化物イオンとして考えると 1/10 以下となり、相当大きな低減であると考えられる。また、本可塑性グラウト材料は、水中における **pH** の上昇の抑制のみならず、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末といった産業副産物を大量に使用するという点においても、環境負荷低減をはかることができる材料である。ただし、本配合は、実現場における実際の **pH** の上昇については確認できていないことから、今後、本配合を実現場に適用し、その結果を踏まえてさらなる改良に努めたいと考える。

第4章の参考文献

- 1) 日特建設株式会社：パフェグラウト工法カタログ
- 2) 入矢桂史郎、三原守弘：ポゾランを高含有した低アルカリ性コンクリートの開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.185-190、2003
- 3) 井元晴丈、山本武志、廣永道彦：低アルカリ性セメントの水和制御に着目した材料設計に関する調査、電力中央研究所報告、調査報告 N05046、2006
- 4) 田中徹、中山卓人：環境配慮型の中性系可塑性充填材の性能評価、水土の知、Vol.82、No.5、pp.35-38、2014
- 5) 岩田正幸ほか：クリンカーフリーモルタルにおける各種アルカリ刺激材の検討と流動特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.1、pp.1547-1552、2010
- 6) 山梨泰斗ほか：低セメント型超高強度コンクリートの研究、第35回土木学会関東支部技術研究発表会、V-27、2008
- 7) H Fujiwara et al. : Study on Properties of Environment-friendly Concrete Containing Large Amount of Industrial by-products, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, vol.96, 012008, 2015
- 8) 高橋茂：セメントの水和反応と硬化組織、コンクリート工学、Vol.47、No.1、pp.32-35、2009
- 9) 丸岡正知ほか：環境負荷低減コンクリートの諸物性の改善に関する研究、セメント・コンクリート論文集、Vol.70、pp.328-335、2016

第5章 巨礫地盤への充填に適した充填材料に関する基礎検討

5.1. はじめに

第2章において、近年、可塑性グラウト材料の使用用途は広がっており、既設トンネル覆工背面の他、既設構造物背面に生じた空洞や、構造物基礎に生じた空洞、さらには防空壕や旧炭鉱といった地下空洞の充填など、さまざまな用途で適用される例が増えていることを示した。

可塑性グラウト材料の用途の一つとして、護岸の基礎として構築された捨石マウンド等の巨礫地盤の間隙の充填固化に適用される場合がある。これは、護岸の耐震補強を目的として施工される場合や、増深工法¹⁾における捨石マウンドの改良固化材としての適用についても研究されている。

今後、可塑性グラウト材料が巨礫地盤の間隙の充填材料として適用される例は増えてくると考えられるが、適用にあたっては後述する課題があり、この課題を克服するために、可塑性グラウト材料を巨礫地盤の間隙の充填材料として適用するにあたって、基礎的な検討を実施した。

5.2. 巨礫地盤における理想的な充填形態

可塑性グラウト材料を捨石マウンド等の巨礫地盤の間隙に充填する場合、ある特定の範囲に限定的に充填することが求められる場合が多い。その場合、図5.1に示すように、注入管の吐出口から同心円状（球状）にグラウト材料が充填されるのが理想である。

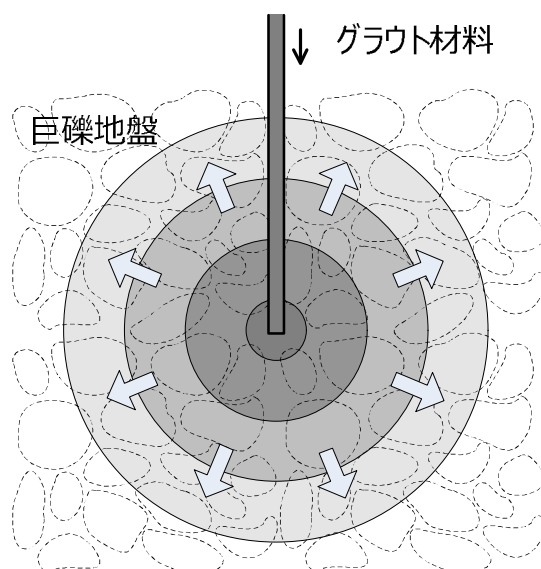


図 5.1 巨礫地盤に対する理想の充填形態

一般的なグラウト材料（例えば第 2 章において説明した流動性グラウト材料）の場合、グラウト材料は注入管吐出部の下方へ流れて大きく広がり（図 5.2 参照）、充填範囲のコントロールができず特定の箇所への充填が困難となる。巨礫地盤に対してグラウト材料を球状に充填するためには、グラウト材料が自重で下方方向に流動することを防ぐ必要があり、すなわち下方方向への流動のコントロールが重要となる。

可塑性グラウト材料は、レオロジー特性としては擬塑性流体もしくはビンガム流体に該当し、ポンプで押されると空洞・空隙をくまなく充填するのに必要な「軟らかさ」を発現し、ポンプが止まると充填範囲を限定するのに必要な「硬さ」を発現する材料である。このような可塑性グラウト材料の持つ特性を利用することによって、下方への流動をコントロールし、巨礫地盤において同心円状に近い充填形態とすることが可能となる可能性がある。

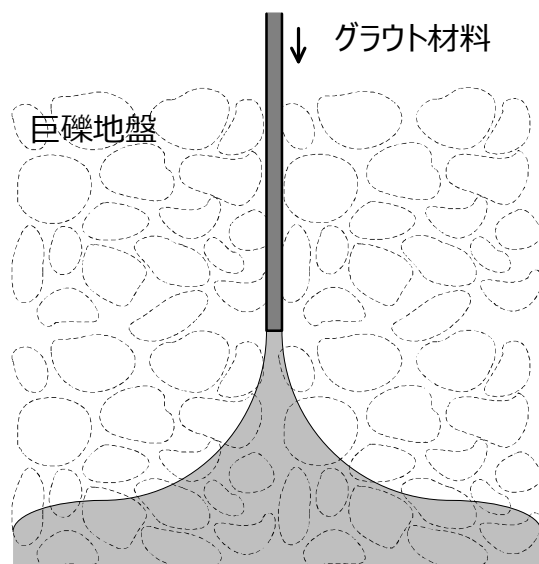


図 5.2 流動性グラウト材料における充填形態

5.3. 円管を鉛直下方に流れる可塑性グラウト材料の流動モデル

ここで、鉛直に設置された直径 d の円管内の可塑性グラウト材料が、自重と壁面との摩擦抵抗力によってつり合い、流動せずにとどまっている場合について考える。図 5.3 にビンガム流体におけるせん断応力 (τ) とひずみ速度 (γ) の関係を示す。このビンガム流体の流動式は下記のようなになる。

$$\tau = \tau_y + \eta_B \gamma \quad \text{式 [5.1]}$$

τ_y : 降伏応力

η_B : 塑性粘度

可塑性グラウト材料をビンガム流体と考えた場合、円管の壁面に生じるせん断応力がビンガム流体における降伏応力より大きくなると流動が開始すると考えることができる。よって、鉛直に設置された円管内においてグラウト材料が自重により下方に下がらずに留まる場合のつり合いは図 5.4 のようになり、次式が得られる。

$$\frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho_g g L \leq \pi d L \cdot \tau_y \quad \text{式 [5.2]}$$

d : 円管の直径

L : 円管内グラウト長

g : 重力加速度

ρ_g : グラウト材料の密度

式 [5.2] より次式が得られる。

$$d \leq \frac{4\tau_y}{\rho_g g} \quad \text{式 [5.3]}$$

よって、その可塑性グラウト材料をビンガム流体として考えた場合の降伏応力およびグラウト材料の密度に応じた、自重によって下方に流動することのない（円管内においてその場に留まることのできる）円管の直径 d が求められる。なお、式 [5.3] は気中における円管内のグラウト材料のつり合いから求めた式であり、水中においては次式のようなになる。

$$d \leq \frac{4\tau_y}{(\rho_g - \rho_w)g} \quad \text{式 [5.4]}$$

ρ_w : 水の密度

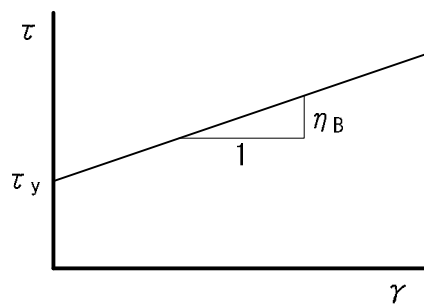


図 5.3 セン断応力とせん断速度の関係（ビンガム流体）

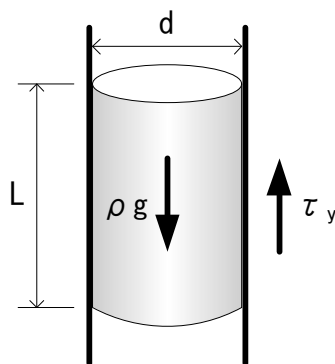


図 5.4 円管内におけるグラウト材料のつり合い

巨礫地盤の間隙を巨礫の大きさに応じた円管のネットワークと仮定すると（図 5.5 参照）、この巨礫の平均的な大きさおよび巨礫地盤の間隙率からその円管の直径 d が求められる。次に式 [5.3]（水中においては式 [5.4]）により、その直径 d の値より大きくなるような降伏応力、密度を持つグラウト材料を使用することで、グラウト材料が自重で下方に落ち込むことなく、理論的には巨礫地盤においてほぼ球状に可塑性グラウト材料を充填することが可能となる。なお、厳密にはグラウト材料の自重によって、球体の中心は下方に下がることになるがここではその影響は考えないこととする。

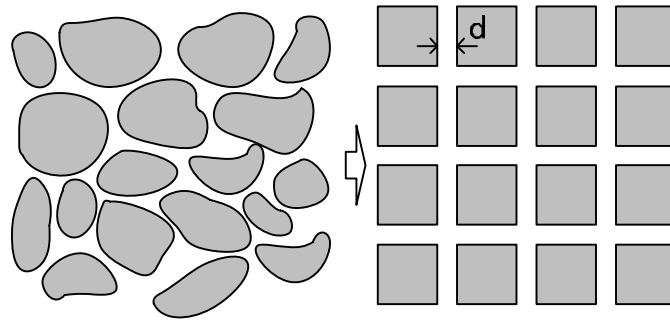


図 5.5 巨礫地盤のモデル化

5.4. 巨礫地盤の充填に求められる性状

実際の巨礫地盤では、その間隙の大きさにはばらつきがあり、想定した直径 d より大きな箇所もしくは小さな箇所も存在する。また図 5.6 に示すように、狭い空間から広い空間に押し出される場合も存在し、そのような場合、円管内における流動とは異なり、側面の支えがない状態で、気中もしくは水中にグラウト材料が押し出されるため、押し出された空間が特に大きい場合、グラウト材料が自重によって引きちぎられて落下することが考えられる。水中においてグラウト材料が下方に落下した場合、グラウト材料の落下時に周辺水と混ざること、下方のグラウト材料は、品質が不安定となることが懸念される。

以上のことから、巨礫間隙において可塑性グラウト材料を高品質に充填するためには、巨礫の大きさおよび間隙率に応じた可塑性グラウト材料の流動特性および密度、さらにはフレッシュ状態における引張強さが重要となる。

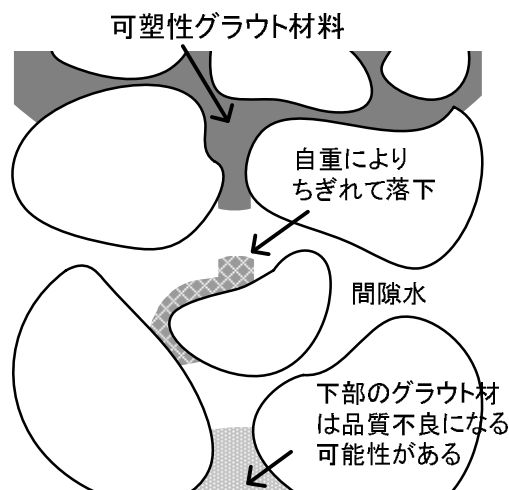


図 5.6 グラウト材料の自重による落下のイメージ

5.5. まとめ

本章の成果を以下のとおりまとめる。

- 1) 巨礫地盤の充填固化における充填形態は、注入管の吐出口から同心円状（球状）にグラウト材料が充填されるのが望ましいことを示した。
- 2) 巨礫地盤の充填固化には水中不分離性を有し、かつビンガム流体である可塑性グラウト材料の使用が適していることを示した。
- 3) 巨礫地盤における可塑性グラウト材料の流動について、円管を鉛直下方に流れる可塑性グラウト材料の流動モデルを提案した。
- 4) 水中における巨礫地盤に対して、可塑性グラウト材料によって高品質な充填を行うためには、グラウト材料のフレッシュ状態における引張強さが重要であることを示した。

本章において検討した結果を踏まえ、第 6 章においてフレッシュ状態における引張強さの向上を目指した配合の開発について、第 7 章においては、本章で提案している巨礫の間隙を円管に模擬したモデルを踏まえ、巨礫地盤の性状に応じた最適な配合選定手法について検討を行うこととした。

第 5 章の参考文献

- 1) 水谷崇亮ほか：重力式係船岸の新しい増深工法の開発、港湾空港技術研究所資料、No.1277、2013

第6章 巨礫間隙への充填に適した可塑性グラウト材料の開発

6.1. はじめに

前章において、巨礫地盤への充填には、ビンガム流体と考えられる可塑性グラウト材料が適していること、さらに、高品質な充填を行うためには水中における引張強さが重要であることを示した。

本章では、可塑性グラウト材料の引張強さに着目し、この引張強さをより大きくすることを目的とした配合開発について述べる。

6.2. 既存の可塑性グラウト材料における試験結果

6.2.1. 試験概要

ここでは、まず初めに、第3章で示した可塑性グラウト材料（第3章、表3.3に示した高強度の「配合②」）を用いて、気中および水中において、巨礫の間隙から下方に押し出された際の挙動を模擬する試験を実施した。

6.2.2. 試験方法

試験は図6.1および写真6.1に示す試験装置を考案し、実施した。圧縮試験機を使用して、上部より一定速度でグラウト材料を押し出し、その押し出された状況を目視により確認した。

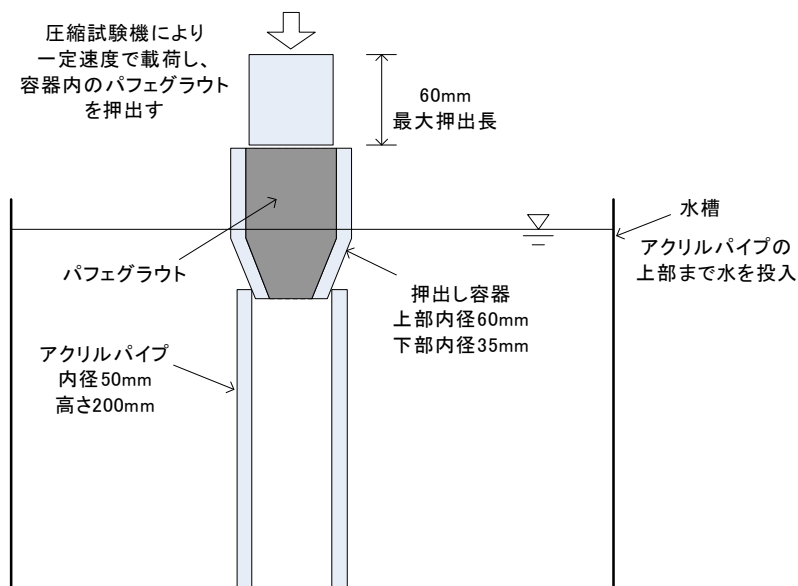


図 6.1 試験模式図



【装置全体】



【押し出し容器】

写真 6.1 試験装置

ここで、巨礫地盤内へ可塑性グラウト材料を 50L/min の一定流量で注入し、可塑性グラウト材料が注入吐出口から同心円状（球状）に広がると仮定した場合、改良体の端部（水との接触面）の流速は、注入吐出口からの距離が長くなればなるほど小さくなり、その計算上の流速は図 6.2 に示すとおりとなる（捨石の間隙率を 40%として計算）。

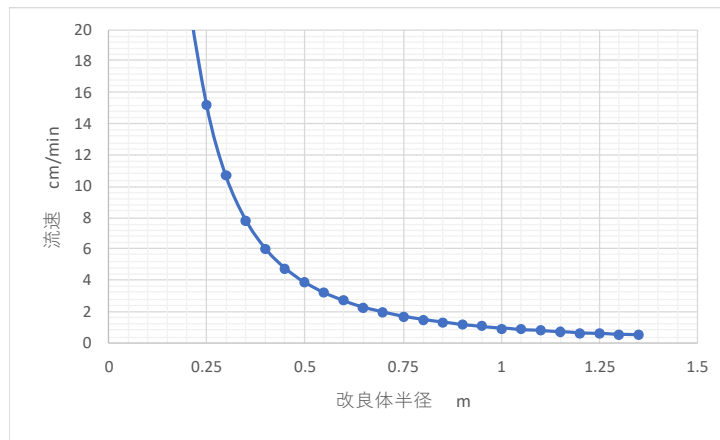


図 6.2 改良体半径（吐出口からの距離）と流速の関係

本試験では、可塑性グラウト材料を押し出す速度を変化させた 3Case で実施した。本試験における可塑性グラウト材料を押し出す速度は、先に示した改良体半径と流速の関係、および圧縮試験機の仕様（载荷速度）を踏まえ設定した。

- Case1 15.0cm/min (改良体半径 0.25m 程度を想定)
- Case2 1.8cm/min (改良体半径 0.75m 程度を想定)
- Case3 1.0cm/min (改良体半径 1.0m 程度を想定)

6.2.3. 試験結果

(1) 水中における試験結果

i) Case1

試験の結果、Case1 においては、可塑性グラウト材料が 40~50mm 程度押し出されると、押し出された可塑性グラウト材料がそのまま落下する様子が見られた。落下の際は、基本的にそのかたまりのまま落下する様子が見られた。1 回目の大きな落下以降については、概ね 40~50mm 程度押し出されると落下するのを繰り返すのを確認した。

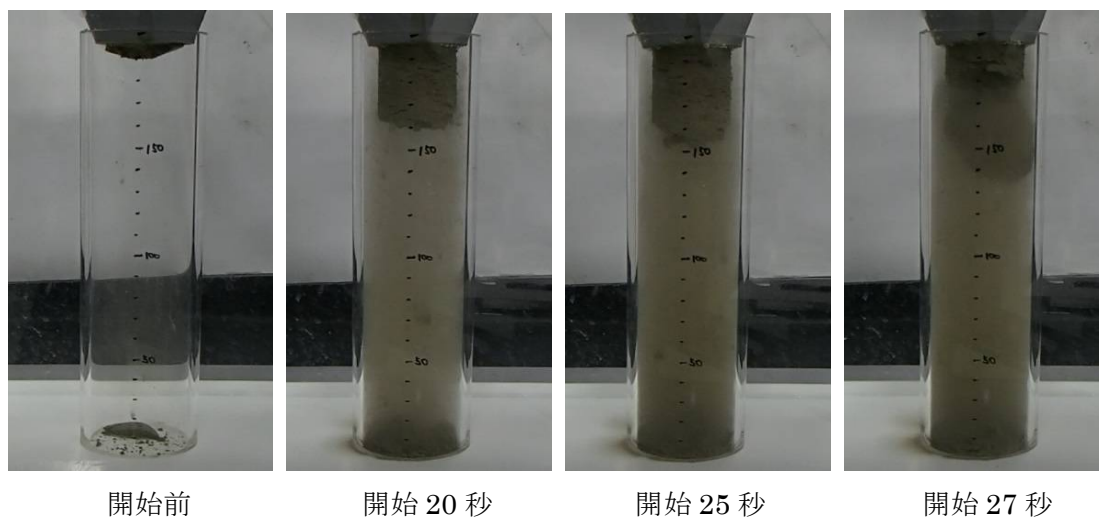
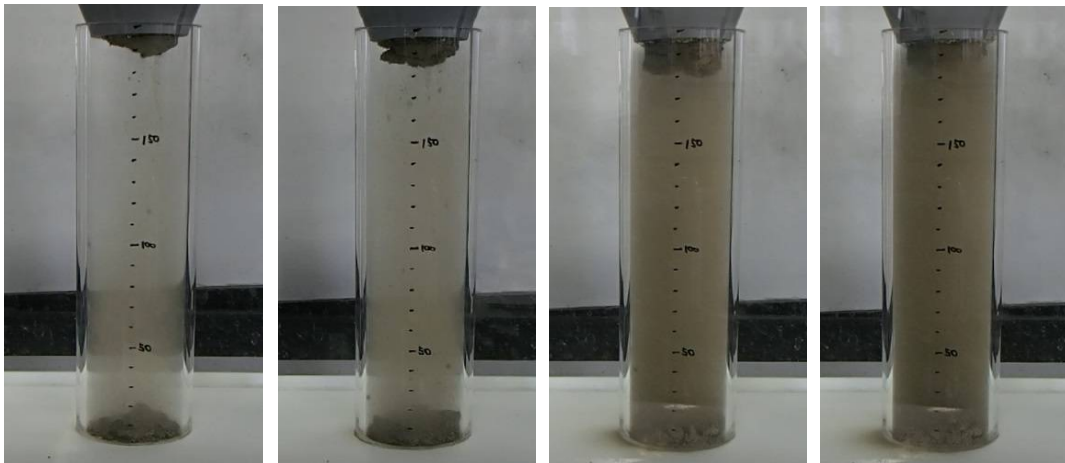


写真 6.2 Case1

ii) Case2

Case2 については、10~20mm 程度押し出されると、押し出された可塑性グラウト材料が 5~10mm 程度のかたまりとして、もしくは薄い層状で落下する様子が見られた。またその落下は連続的に続き、落下回数が増えるごとに、アクリルパイプ内の濁りがひどくなった。



開始直後

開始 30 秒後

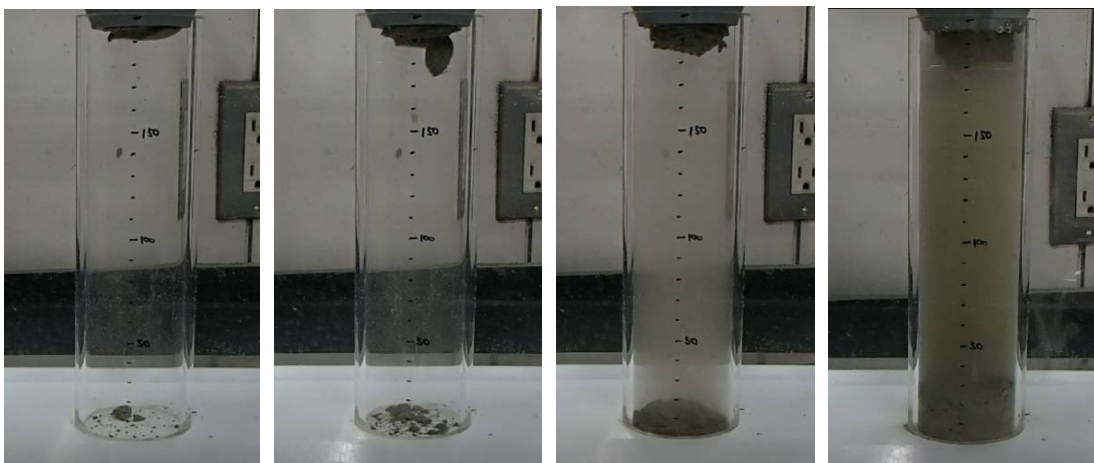
開始 90 秒後

開始 120 秒後

写真 6.3 Case2

iii) Case3

Case3 についても、Case2 同様、10~20mm 程度押し出されると、押し出された可塑性グラウト材料が 5~10mm 程度のかたまりとして、もしくは薄い層状で落下する様子が見られた。ただし、Case②-2 に比べると、押し出される速度が遅い分、落ちるかたまりの大きさは若干小さく、アクリルパイプ内の濁りも少なかった。



開始直後

開始 30 秒

開始 60 秒

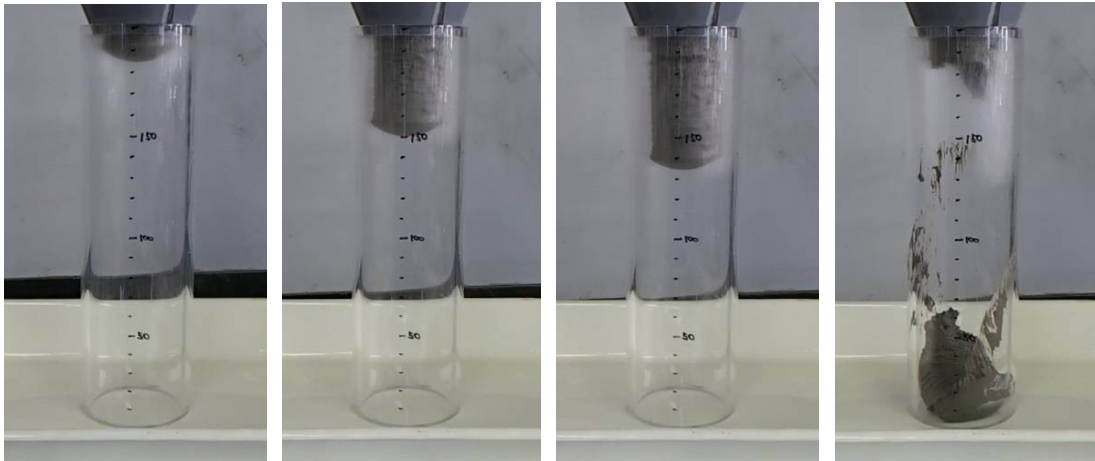
開始 300 秒

写真 6.4 Case3

(2) 気中における試験結果

水中ではなく気中で実施した結果（押し出し速度 1cm/min）を示す。

気中で、1cm/min の速度で押し出した結果、概ね 60~70mm 程度押し出された時点で、ちぎれて落下する様子が見られた。



開始前

開始 4 分後

開始 5 分 30 秒後

開始 6 分後

写真 6.5 気中 (押出速度 1cm/min)

6.2.4. 試験結果のまとめ

既存の可塑性グラウト材料について、巨礫の間隙から下方の押し出された状態を模擬した試験を行った。

水中において、押し出されてからグラウト材料がちぎれて落下するまでの長さは、押し出される速度によって異なり、押し出される速度が遅くなるにつれて、ちぎれる長さが短くなる（頻繁にちぎれて落下する）ことがわかった。

気中においては、押し出す速度を最も遅くした 1 ケースのみ試験を行ったが、水中においてももっとも押し出す速度を早くしたケースに比べても グラウト材料が押し出されてからちぎれて落下するまでの長さは長くなった。

よって、グラウト材料が下方に押し出されて落下するまでの長さは、気中に比べると水中においてかなり短くなることがわかった。

6.3. フレッシュ状態における引張強さの評価方法

先に示した既存の可塑性グラウト材料において実施した試験によって、可塑性グラウト材料が巨礫の間隙から下方に両側からの支えがない状態で押し出されると、押し出されてからちぎれて落下するまでの長さは、気中に比べて水中において、短くなることがわかった。基本的にこの可塑性グラウト材料がちぎれて落下する現象は、フレッシュ状態におけるグラウト材料の引張強さが、グラウト材料の自重による下方への応力を上回った場合に、生じると考えられる。

よって、本研究では、フレッシュ状態における引張強さを評価するための試験が必要となる。また、実際の巨礫地盤における充填では、水中における充填となる場合がほとんどであり、特に水中でのフレッシュ状態における引張強さについて評価できる試験とする必要がある。

モルタル、コンクリートといった材料のフレッシュ状態における引張強さを評価した研究について調査を行ったが、該当するような既往の研究はなかった。そこで、可塑性グラウト材料のフレッシュ状態における引張強さを評価するために、下記試験方法（以下、鉛直下方押し出し試験と記す）を考案した。

本試験は、市販のプラスチック製シリンジ（容量 100cc）の先端を加工したものを準備し（図 6.3 参照）、そのシリンジ内にグラウト材料を詰めた上で装置に設置し、ピストンを鉛直下方に一定の速度で押し出し、吐出された可塑性グラウト材料が自重によってちぎれるまでの押し出し長さを測定するものである（図 6.4 および写真 6.6 参照）。

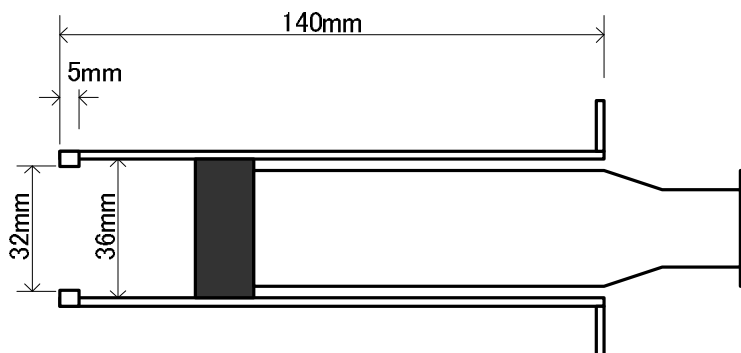


図 6.3 先端を加工したプラスチック製シリンジ



写真 6.6 試験装置

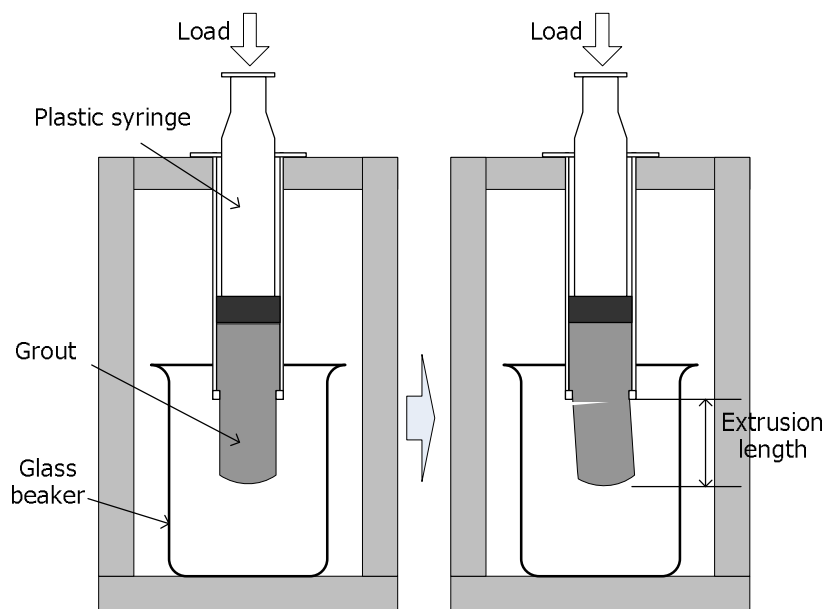


図 6.4 鉛直下方押し試験の方法

グラウト材料の押しは、1cm 間隔で目盛を付けた透明のビーカー（容量 500cc）の中で行った。その押しされる様子を正面からビデオで撮影し、そのビデオで撮影された画像から、グラウト材料が自重によってちぎれて切断される直前までのシリンジの先端から押し

出されたグラウト材料先端までの長さ(以下、押し出し長さと記す)を測定することとした。

なお、本試験は気中および水中で実施した。気中で実施する場合は、空の透明ビーカーに直接グラウト材料を押し出すこととし、水中の場合は、透明ビーカーの最上部まで水で満たした状態でグラウト材料を水中に押し出した。なお、水中の場合は、グラウト材料が押し出されることによってビーカーからあふれた水を受け止めるために、外側にさらに大きなビーカー(容量 1000cc)を設置し、試験を行っている。

本試験によって、グラウト材料の気中および水中における押し出し長さを測定し、その押し出し長さによってフレッシュ状態における引張強さを評価することとした。

6.4. 水中でのフレッシュ状態における引張強さの向上を目指した配合の開発

6.4.1. 試験配合および試験の流れ

先に示した試験結果のとおり、既存の可塑性グラウト材料を用いた予備的な試験においては、気中に比べて水中において、ちぎれて落下するまでの長さが短くなり、つまりフレッシュ状態における引張強さが大きく低下することが判明している。

気中に比べて水中でのフレッシュ状態における引張強さが大きく低下した原因について検討した結果、水中においてはグラウト材料に側方から生じる水圧によって、グラウト材料内に側方から水が浸入することで、引張強さが低下すると考えた。

そこで、配合の検討に当たっては、水中でのフレッシュ状態における引張強さを増加させることが重要と考え、シリカフェームおよびベントナイトを混合した配合について試験を行うこととした。シリカフェームを混合したのは、セメントに比べて粒子の細かなシリカフェームを混合することで、セメント粒子の間隙に入り込んだシリカフェームにより、グラウト材料内への水の浸入が抑制できると考えたためである。また、セメントの一部をシリカフェームに置換することで、密度が小さくなることによる効果も期待している。またベントナイトを混合したのは、ベントナイトが膨潤することにより、セメント粒子の間隙が埋まり、水の浸入が抑制されることを期待したためである。

使用材料の一覧を表 6.1 に示す。また試験配合の一覧を表 6.2 に示す。

表 6.1 使用材料一覧

材料名	種類	記号	密度 g/cm ³
結合材 (B)	普通ポルトランドセメント	C	3.16
	シリカフェーム	SF	2.20
可塑性剤 (PM)	可塑性剤A	PA	1.06
	ベントナイト	BN	2.60
	可塑性剤B	PB	1.49
増粘剤	水溶性セルロース系	VA	1.38
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	SP	1.07
水	水道水	W	1.00

試験配合については、既存の可塑性グラウト材料の配合である基本配合 (Prototype) をベースとすることとした。この基本配合は第 3 章で示した可塑性グラウト材料 (第 3 章、表 3.3 に示した高強度の「配合②」) である。ベントナイトは基本配合において可塑性剤 A (高分子系可塑性剤、PA) が担っていた機能 (フロー値の調整) を担うことができることから可塑性剤 A (PA) は添加しないこととした。このベントナイトの配合量については、事前の予備試験の結果を踏まえセメント量の 2~8% とした。シリカフェームについては、セメントの一部 (最大 15%) を置換することとした。また、水粉体比 (W/B) については、50

～65%とし、水粉体比を大きくした配合については、シリカフェームの混合量が多くなるよう設定することで、基本配合と同等程度以上の圧縮強度を確保できるようにした。

表 6.2 試験配合一覧

配合名	W/(C+SF) %	SF/(C+SF) %	BN C×%	PA C×%	PB C×%	VA W×%	SP C×%
Prototype	50	0.0	0.0	0.05	0.50	0.50	0.50
50-00-4	50	0.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
50-05-4	50	5.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
50-05-6	50	5.0	6.0	0.00	0.50	0.50	0.50
50-10-2	50	10.0	2.0	0.00	0.50	0.50	0.50
50-10-4	50	10.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
55-00-4	55	0.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
55-00-6	55	0.0	6.0	0.00	0.50	0.50	0.50
55-05-4	55	5.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
55-05-6	55	5.0	6.0	0.00	0.50	0.50	0.50
55-10-4	55	10.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
55-10-6	55	10.0	6.0	0.00	0.50	0.50	0.50
55-15-2	55	15.0	2.0	0.00	0.50	0.50	0.50
55-15-4	55	15.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
60-05-4	60	5.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
60-05-6	60	5.0	6.0	0.00	0.50	0.50	0.50
60-10-4	60	10.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
60-10-6	60	10.0	6.0	0.00	0.50	0.50	0.50
60-15-4	60	15.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
60-15-6	60	15.0	6.0	0.00	0.50	0.50	0.50
65-10-4	65	10.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
65-10-6	65	10.0	6.0	0.00	0.50	0.50	0.50
65-10-8	65	10.0	8.0	0.00	0.50	0.50	0.50
65-15-4	65	15.0	4.0	0.00	0.50	0.50	0.50
65-15-6	65	15.0	6.0	0.00	0.50	0.50	0.50
65-15-8	65	15.0	8.0	0.00	0.50	0.50	0.50

6.5. 材料の練混ぜ方法

材料の練混ぜは下記のとおりとした。なお、試験 1 回当たりの練混ぜ量は 1.5L とした。

(1) 粉体の混合

シリカフューム (SF) およびベントナイト (BN) (もしくはこれらの片方) を混合する配合については、あらかじめセメント (C) とこれらの材料をビニール袋に入れ、その袋を良く振って混合した。

(2) A 材の練混ぜ

総練混ぜ水量の 80%の水をホバート型モルタルミキサ (ボウル容量 5L) に投入したのち、高性能 AE 減水剤 (SP) およびセメント (C) (もしくは粉体の混合物) を投入し低速 (139rpm) で 3 分間攪拌した。

(3) B 材の練混ぜ

総練混ぜ水量の 20%の水を 500cc のビーカーに入れ、増粘剤 (VA) を投入し、調理用の小型ハンドミキサで 30 秒攪拌したのち、可塑剤 A (PA、Prototype のみ) および可塑剤 B (PB) を投入し、60 秒攪拌した。

(4) A 材と B 材の練混ぜ

A 材を練混ぜたホバート型モルタルミキサに B 材を投入し低速 (139rpm) で 1 分間攪拌した。

6.6. 試験項目

本研究においては、材料の練混ぜ後すみやかに下記試験を実施した。なお、下記試験のうち圧縮強度試験は一部の配合で実施し、その他の試験は全配合で実施した。

(1) 圧縮強度試験

試験は JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し測定した。ただし、供試体については $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を用い、材齢 1 日で脱型後、試験材齢まで 20°C で水中養生を行った。

(2) フロー試験

試験は JIS R 5201 「セメント物理試験方法」記載の「フロー試験」に準拠し実施した。ただし、フローコーンに替えて NEXCO 試験法 313 「エアモルタル及びエアミルクの試験方法」記載のシリンダー (内径 80mm、高さ 80mm) を使用し、15 回の打撃を加えた後のグラウト材料の広がり (15 打フロー値) に加え、15 回の打撃を加える前のグラウト材料の広がり (静置フロー値) についても測定を行った。

(3) 小型ベーンせん断試験

ベーンせん断試験は、軟弱な粘性土地盤における原位置試験方法として知られており、長方形の4枚羽を十字型に組み合わせたベーンブレードを地盤に挿入し、回転させた際の最大トルク値からベーンせん断強さを求める試験である（JGS 1411「原位置ベーン試験方法」）。本研究では、図 6.5 に示す小型のベーンブレード（幅 20mm、高さ 40mm）を使用し、グラウト材料のフレッシュ状態におけるベーンせん断試験を行い、ベーンせん断強さの測定を行った。

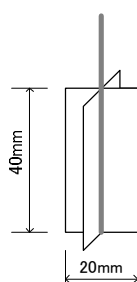


図 6.5 ベーンブレード



図 6.6 ベーンせん断試験

(4) 加圧ブリーディング試験

加圧ブリーディング試験は、グラウト材料を所定の圧力で、所定の時間だけ空気で加圧した際に、グラウト材料から排出されるブリーディング水を測定する試験である。グラウト材料内への水の浸入しやすさは、加圧ブリーディング試験によって評価できるものと考え、実施した。

本研究では、加圧するグラウト材料の初期容積を 200cc、圧力を 0.36MPa、加圧時間を 15 分間として試験を行い、グラウト材料の初期容積に対するブリーディング水の比率で評価することとした。

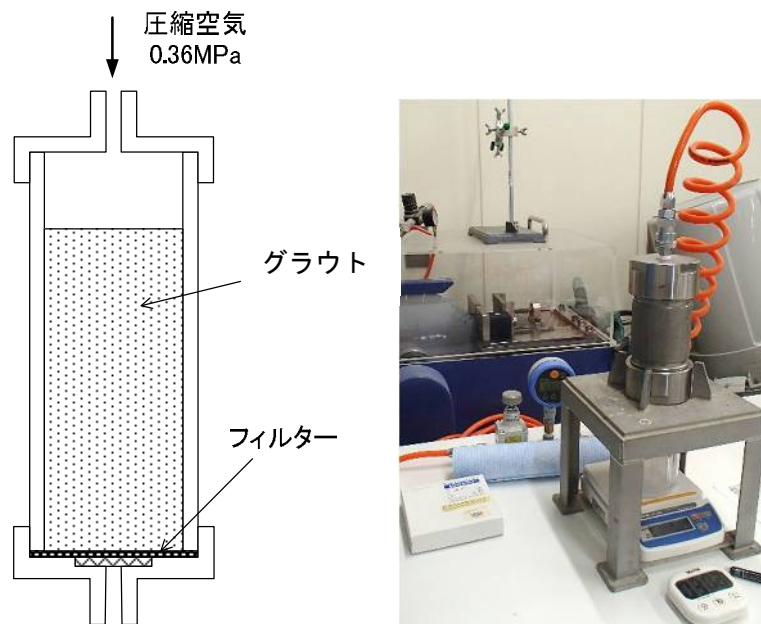


図 6.7 加圧ブリーディング試験

(5) 鉛直下方押し出し試験

先の「6. 3 フレッシュ状態における引張強さの評価方法」に示した方法により試験を行い気中および水中におけるフレッシュ状態における引張強さを測定した。

引張強さの算出は、試験により測定された押し出し長さにグラウト材料の密度および重力加速度を乗じ、水中においてはそこから浮力を減じたものをフレッシュ状態における引張強さとした。



写真 6.7 鉛直下方押し出し試験



【気中における試験状況】



【水中における試験状況】

写真 6.8 鉛直下方押し試験状況

6.7. 試験結果

試験結果の一覧を表 6.3 に示す。表中にはフロー試験の結果から求められた降伏応力についても記載している。なお、表中において灰色で網掛けされたデータは、鉛直下方押し試験において試験機の測定限界（押し長さ 150mm）となったデータである。以下、試験結果について考察する。

表 6.3 試験結果一覧

配合名	W/B %	SF/B %	BN C×%	密度 g/cm ³	静置 フロー値 mm	打撃 フロー値 mm	ベンセ ん断強さ kN/m ²	加圧プリー ディング率 %	押出長さ		引張強さ		圧縮強度	
									気中	水中	気中	水中	7日	28日
									mm	mm	kN/m ²	kN/m ²	N/mm ²	N/mm ²
Prototype	50	0	0	1.832	99	155	0.58	8.20	81	21	1.45	0.17	27.6	41.1
50-00-4	50	0	4	1.846	132	196	0.17	3.60	45	20	0.81	0.17	-	-
50-05-4	50	5	4	1.831	93	138	0.68	1.60	90	45	1.61	0.36	34.4	45.7
50-05-6	50	5	6	1.835	91	135	1.06	1.55	143	75	2.57	0.61	37.3	53.2
50-10-2	50	10	2	1.809	90	135	0.73	1.50	122	78	2.16	0.62	-	-
50-10-4	50	10	4	1.815	87	123	1.24	1.40	150	101	2.66	0.81	-	-
55-00-4	55	0	4	1.799	162	211	0.14	4.25	34	24	0.59	0.19	-	-
55-00-6	55	0	6	1.806	132	178	0.30	3.40	44	27	0.77	0.22	-	-
55-05-4	55	5	4	1.785	113	168	0.38	2.45	71	53	1.24	0.41	-	-
55-05-6	55	5	6	1.791	99	150	0.56	1.40	85	50	1.49	0.39	-	-
55-10-4	55	10	4	1.771	89	141	0.68	1.35	104	131	1.81	0.99	32.7	48.6
55-10-6	55	10	6	1.777	88	132	0.92	1.35	144	97	2.51	0.74	33.7	51.2
55-15-2	55	15	2	1.751	86	129	0.82	1.05	150	104	2.56	0.77	-	-
55-15-4	55	15	4	1.757	87	122	1.30	1.30	150	150	2.57	1.11	-	-
60-05-4	60	5	4	1.743	129	177	0.27	1.95	41	30	0.70	0.22	-	-
60-05-6	60	5	6	1.750	129	178	0.21	3.30	51	31	0.87	0.23	-	-
60-10-4	60	10	4	1.730	102	157	0.51	1.75	76	60	1.29	0.43	27.1	40.3
60-10-6	60	10	6	1.737	98	152	0.51	1.95	80	86	1.36	0.62	28.3	42.5
60-15-4	60	15	4	1.718	89	138	0.75	1.01	108	100	1.82	0.71	29.8	50.0
60-15-6	60	15	6	1.724	86	132	0.95	1.60	150	115	2.52	0.71	29.7	44.9
65-10-4	65	10	4	1.694	115	172	0.20	1.25	44	76	0.72	0.52	-	-
65-10-6	65	10	6	1.701	103	156	0.36	1.20	62	61	1.04	0.42	-	-
65-10-8	65	10	8	1.707	95	145	0.50	1.10	92	105	1.54	0.73	-	-
65-15-4	65	15	4	1.682	91	147	0.56	1.70	83	105	1.37	0.67	24.2	41.0
65-15-6	65	15	6	1.689	92	139	0.65	1.35	104	120	1.72	0.81	24.7	40.1
65-15-8	65	15	8	1.694	89	130	0.75	1.15	150	150	2.49	1.02	-	-

6.7.1. 基本配合における試験結果

先に示したとおり、本研究では最初に既存の高強度の可塑性グラウト材料の配合（基本配合、Prototype）について試験を行った。その結果、水中における押出長さが気中に比べて大きく低下することとなった。また、水中における浮力や材料の密度を考慮した引張強さで考えると、その差はさらに大きくなった。

6.7.2. 圧縮強度

本研究では、既存の高強度の可塑性グラウト材料の配合（基本配合、Prototype）と同程度の圧縮強度が得られることを目標としている。本試験の結果、圧縮強度試験を行った全ての配合で、材齢 28 日において基本配合と同等程度以上の圧縮強度が確保できた。

6.7.3. ベーンせん断強さとフロー値の関係

図 6.8 にベーンせん断強さとフロー値（静置および 15 打）の関係を示す。

試験の結果、静置フロー値および 15 打フロー値ともに、ベーンせん断強さとの相関がみられた。しかし、静置フロー値においては 90mm 前後、15 打フロー値においては 130mm 前後のデータにおいて、同程度のフロー値であるのに関わらず、ベーンせん断強さが大きく異なるデータが見られた。これは、フロー試験の特性上、特にフロー値の小さい範囲においては測定の感度が低いのにに対し、ベーンせん断試験では、高い感度でグラウト材料の性状を測定できたためと考えられる。

本試験の結果を踏まえ、以降、ベーンせん断強さによってグラウト材料のフレッシュ状態における引張強さについて評価を行うこととした。

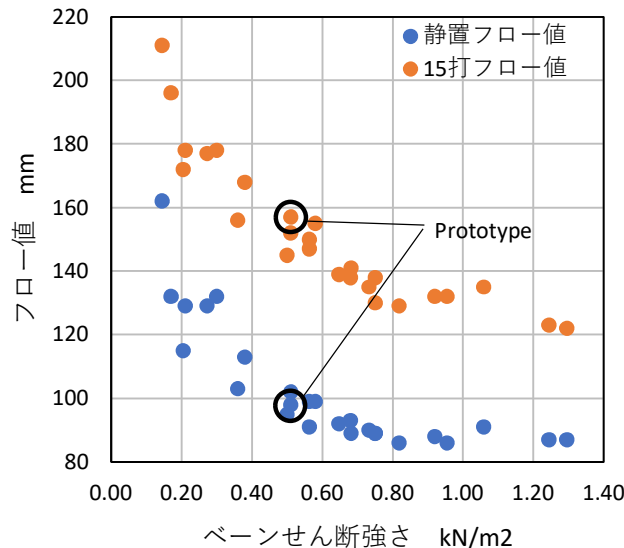


図 6.8 ベーンせん断強さとフロー値の関係

6.7.4. 引張強さ

図 6.9 および図 6.10 に気中および水中におけるベーンせん断強さと引張強さの関係を示す。図中において橙色で示したデータは、試験装置の測定限界（150mm）以上となったデータである。

試験の結果、ベーンせん断強さと気中でのフレッシュ状態における引張強さには非常に強い相関があることがわかった（試験機の測定限界を超過したデータを除いた相関係数は 0.951）。それに対し、水中においては気中に比べてフレッシュ状態における引張強さは大きく低下し、ばらつきも大きくなった。

これらの試験データの中で、特に基本配合は引張強さとして低い値を示し、シリカフェームおよびベントナイトの混和により、フレッシュ状態における引張強さが大きくなっていくことが示唆される結果となった。

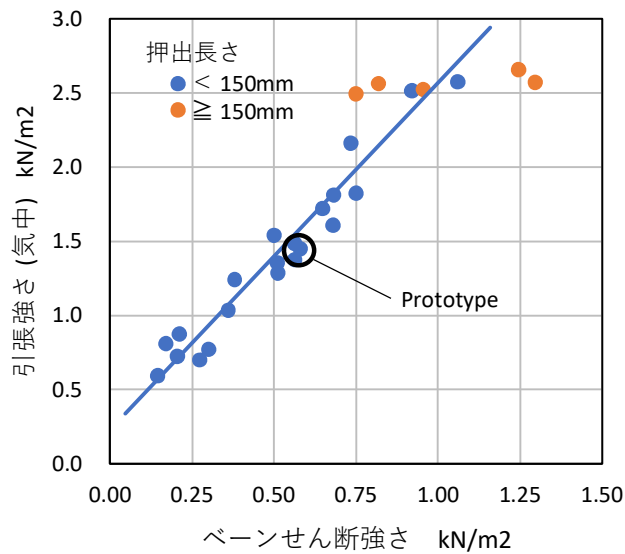


図 6.9 ベーンせん断強さと引張強さ（気中）の関係

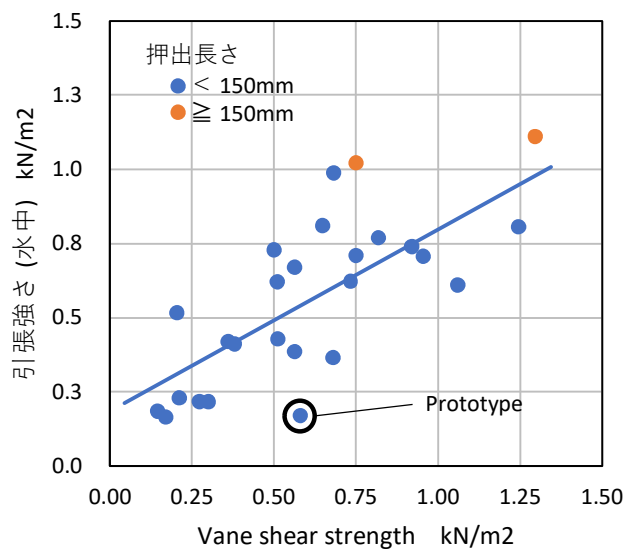


図 6.10 ベーンせん断強さと引張強さ（水中）の関係

6.7.5. 加圧ブリーディング率

図 6.11 および図 6.12 に、加圧ブリーディング率と気中および水中における引張強さの関係を示す。図中において橙色で示したデータは、試験装置の測定限界（150mm）以上となったデータである。

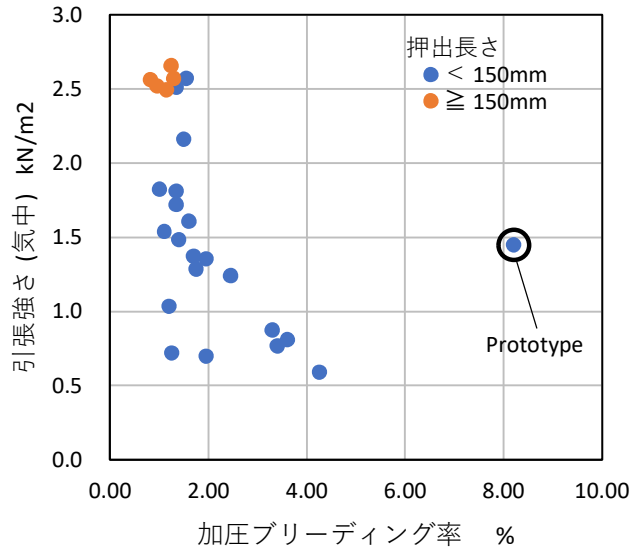


図 6.11 加圧ブリーディング率と引張強さ（気中）の関係

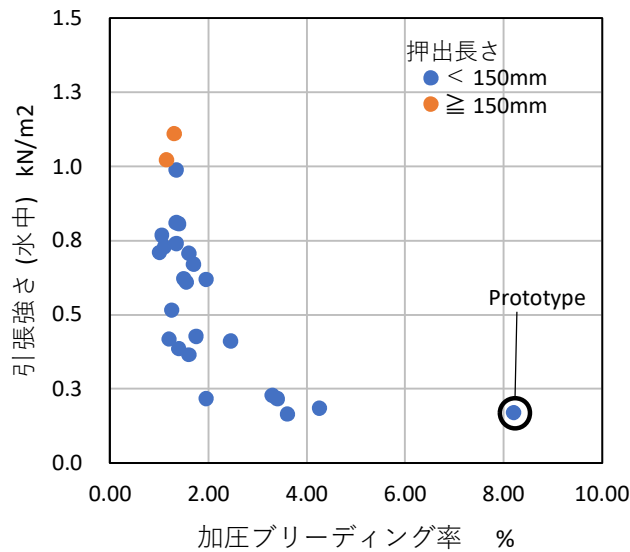


図 6.12 加圧ブリーディング率と引張強さ（水中）の関係

試験の結果、特に水中において、加圧ブリーディング率が小さくなるほど、引張強さが大きくなる傾向が見られた。加圧ブリーディング率は、グラウト材料を加圧することで排出されるブリーディング率を測定する試験である。本試験の結果、外部からの水圧による水の浸入に対しての抵抗性についても、加圧ブリーディング率によって評価できる可能性があることがわかった。ただし、加圧ブリーディング率が 1%前後のデータにおいては、引張強さに大きく差が見られることから、もう少し詳細な検討は必要と考える。

6.7.6. シリカフェームおよびベントナイトの混和による影響

シリカフェームおよびベントナイトの混和による影響を調べるために、水粉体比 W/B、粉体に対するシリカフェーム置換率 SF/B およびベントナイト添加量 BN を説明変数とし、引張強さを目的変数とした重回帰分析を行った。重回帰分析の結果を 表 6.4 および表 6.5 に示す。

表 6.4 重回帰分析結果（気中）

説明変数	係数	標準誤差	t値	P値
切片	6.726	0.626	10.1	9.90E-10
W/B	-0.121	0.013	-8.8	1.15E-08
SF/B	0.138	0.012	10.9	2.37E-10
BN	0.135	0.037	3.7	1.30E-03
R^2	0.858			

表 6.5 重回帰分析結果（水中）

説明変数	係数	標準誤差	t値	P値
切片	1.211	0.298	4.1	5.21E-04
W/B	-0.023	0.006	-3.8	1.09E-03
SF/B	0.055	0.006	9.7	2.30E-09
BN	0.043	0.016	2.6	1.54E-02
R^2	0.822			

本分析の精度としては、気中の場合で $R^2=0.858$ 、水中の場合で $R^2=0.822$ であり、特に気中の場合が高い精度であった。

気中の場合、水粉体比、シリカフェーム置換率およびベントナイト添加量のいずれにおいても、P 値は 0.05 を下回っていることから、いずれの説明変数も統計的に有意であると考えられる。さらに t 値の絶対値はいずれも 2 を超えていることから、これらは引張強さに影響していると考えられ、特にシリカフェーム置換率および水粉体比の影響が大きいと考えられる。

水中の場合についても、水粉体比、シリカフェーム置換率およびベントナイト添加量のいずれにおいても、P 値は 0.05 を下回っていることから、いずれの説明変数も統計的に有

意であると考えられる。さらに t 値の絶対値はいずれも 2 を超えていることから、これらは引張強さに影響していると考えられ、気中同様、特にシリカフェーム置換率および水粉体比の影響が大きいと考えられる。

本回帰分析の結果からも、可塑性グラウト材料の引張強さの向上に、シリカフェームとベントナイトの混和が有効であったことが確認できた。

6.8. 巨礫地盤の充填において最適な配合の選定

これまでの試験結果を踏まえ、巨礫地盤の充填において最適な配合を選定する。

図 6.13 に気中と水中における押出長さの関係について、W/B ごとに色分けした図を示す。また、図中には各 W/B の線形近似線も示す。シリカフェームやベントナイトの添加の影響もあり、全体として配合によるバラツキはあるものの、概ね W/B が大きくなると気中に対する水中の押出長さは大きくなる傾向が見られた。特に W/B=65% の配合では、ほぼ全ての配合において、気中における押出長さを水中における押出長さが上回る結果となった。

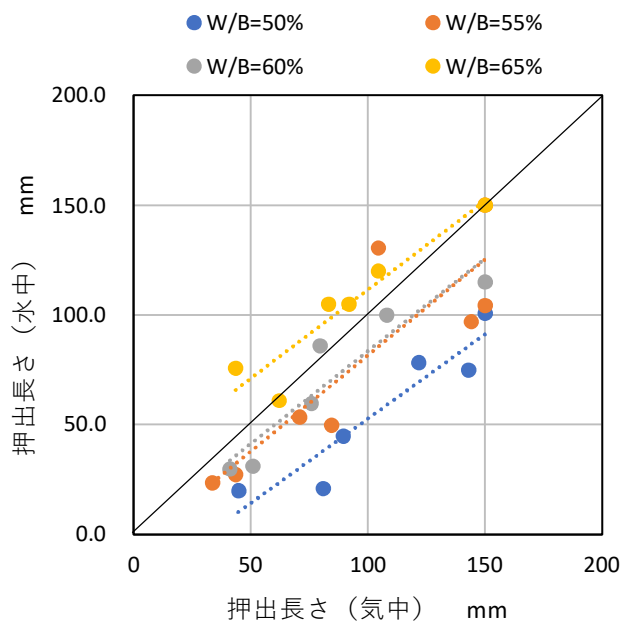


図 6.13 気中と水中における押出長さの関係 (W/B で整理)

図 6.14 に気中と水中における押出長さの関係について、SF/B ごとに色分けした図を示す。また、図中には各 SF/B の線形近似線も示す。この図についても他の要素 (W/B、ベントナイト添加量) の影響もあり、全体として配合によるバラツキがあるものの、概ね SF/B が大きくなるほど、水中における押出長さが大きくなる傾向がみられた。

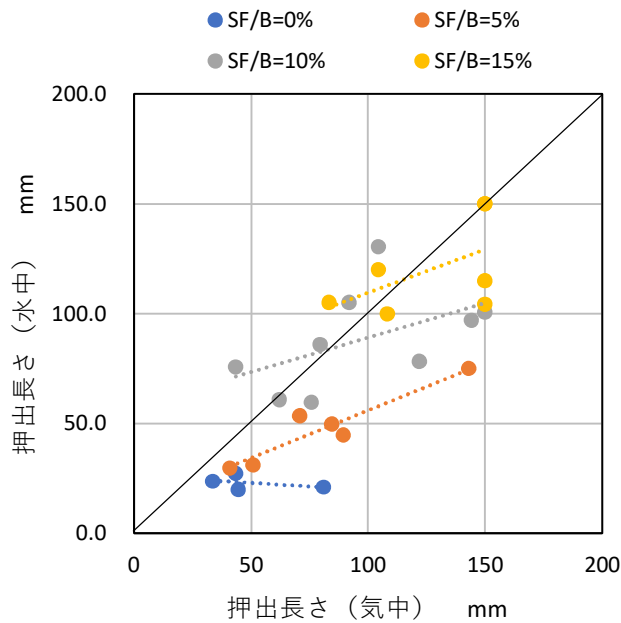


図 6.14 気中と水中における押出長さの関係 (SF/B で整理)

これらの結果より、W/B をできるだけ小さく、かつ SF/B をできるだけ大きくした配合が、巨礫地盤の充填に適していると考えられる。

よって、本研究において配合試験を行った範囲においては、表 6.6 に示す W/B=65%、SF/B=10%および 15%とした配合が適していると考えられる。なお、例えば W/B、SF/B をもっと大きくした配合であれば、さらなる引張強さの向上がはかれる可能性はあるが、シリカフェームの添加量を増やすと、コストが大きく増加することや、施工性に問題が出る可能性もあり、これ以上 W/B や SF/B をおおきくすることは、現実的ではないと考えられる。

よって、ここに示した配合から、巨礫地盤の性状に応じて、適宜配合を選定するのが望ましいと考える。

表 6.6 巨礫地盤の充填に適した配合例

配合名	W/B	SF/B	BN	密度	静置 フロー値	打撃 フロー値	ベーンセ ん断強さ	押出長さ		引張強さ	
								気中	水中	気中	水中
								mm	mm	kN/m ²	kN/m ²
65-10-4	65	10	4	1.694	115	172	0.20	44	76	0.72	0.52
65-10-6	65	10	6	1.701	103	156	0.36	62	61	1.04	0.42
65-10-8	65	10	8	1.707	95	145	0.50	92	105	1.54	0.73
65-15-4	65	15	4	1.682	91	147	0.56	83	105	1.37	0.67
65-15-6	65	15	6	1.689	92	139	0.65	104	120	1.72	0.81
65-15-8	65	15	8	1.694	89	130	0.75	150	150	2.49	1.02

6.9. まとめ

本章の成果を以下のとおりまとめる。

- 1) グラウト材料のフレッシュ状態における引張強さは、気中と水中で異なり、水中において大きく低下することがわかった。
- 2) 気中でのフレッシュ状態における引張強さは、本試験の範囲においては、配合や使用材料によらずベーンせん断強さと高い相関を示した。
- 3) 水中でのフレッシュ状態における引張強さは、気中に比べるとベーンせん断強さとの相関は小さく、可塑性グラウト材料の配合や使用材料に大きく影響を受けることがわかった。
- 4) フレッシュ状態における引張強さは、加圧ブリーディング率で評価できる可能性があることがわかった。
- 5) フレッシュ状態における引張強さの増加には、水粉体比をできるだけ大きくすると、一定量のシリカフェームとベントナイトの混和が有効であることがわかった。
- 6) 巨礫地盤の充填に適していると考えられる配合例を提案した。

第 6 章の参考文献

- 1) 水谷崇亮ほか：重力式係船岸の新しい増深工法の開発、港湾空港技術研究所資料、No.1277(2013)
- 2) 菊川浩治：モルタルおよびコンクリートの粘度式に関する研究、土木学会論文集、第 414 号、V-12、pp.109-118(1990)
- 3) 阿部義宏ほか：さまざまな構造物の維持補修に適用できるグラウト充填工法（パフェグラウト工法）、土質基礎に関する「新工法・新技術」技術報告会報告集、北海道土木技術会土質基礎研究委員会、pp.52-61(2009)

第7章 巨礫地盤に対する可塑性グラウト材料の充填モデルの提案

7.1. はじめに

堆積学の分野において 256mm を超える径の礫を巨礫と呼ぶ。地盤工学では、75mm 以下は「礫」、それを超えるものは「石」と呼ばれ、巨礫という用語は使用されないようである。本研究では、護岸の基礎として構築された捨石マウンド等における可塑性グラウト材料の充填をターゲットとしている。そのような捨石マウンドに使用される材料は、堆積学において巨礫と分類される材料 (200~300mm 以上) が主となっていることから、本研究では、「巨礫」という用語を使用している。

巨礫といっても、当然のようにバラツキがある。現場によっては、200~500mm 程度の場合もあれば、500~1000mm 程度が中心となる場合もある。このように現場によって巨礫の大きさが大きく異なる巨礫地盤に対して、例えば単一の可塑性グラウト材料の配合によって全ての現場に対応するのは難しく、巨礫の大きさに応じた最適な流動性、引張強さを求めて、それを満足する配合設計をするのが望ましいと考える。

捨石マウンドのような巨礫地盤は大きさ、形状の異なる巨礫が複雑に入り組んだ構造をしている。そこで、対象とする巨礫地盤をできるだけ単純化し、その単純化したモデル地盤を対して、最適な可塑性グラウト材料を選定する手法について検討を行った。

7.2. 巨礫地盤のモデル化

7.2.1. 間隙を円管で模擬したモデルの提案

実際の巨礫地盤は形状、大きさの異なる巨礫が複雑に入り組んだ構造をしており、その巨礫の間隙を流れる充填材料の挙動を評価するのは困難である。そこで、巨礫地盤をできるだけ単純化したモデルとして、第5章の「5.3 円管を鉛直下方に流れる可塑性グラウト材料の流動モデル」において示した、巨礫地盤の間隙を円管で模擬したモデルを提案する。

図 7.1 および図 7.2 に、2次元および3次元的な、モデル地盤のイメージ図を示す。以下、本モデルについて説明する。

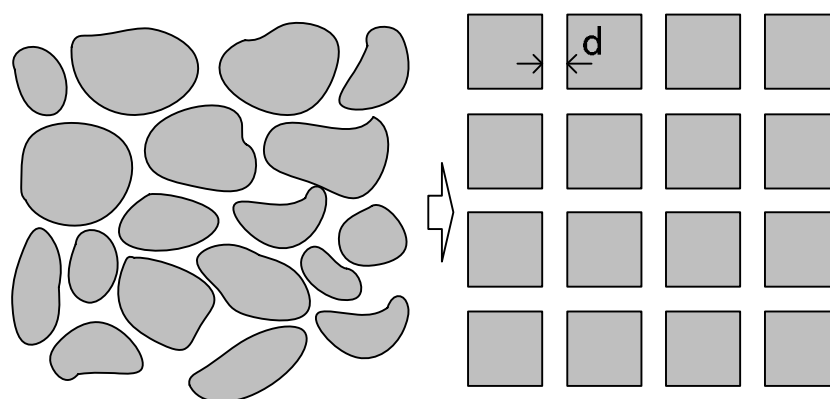
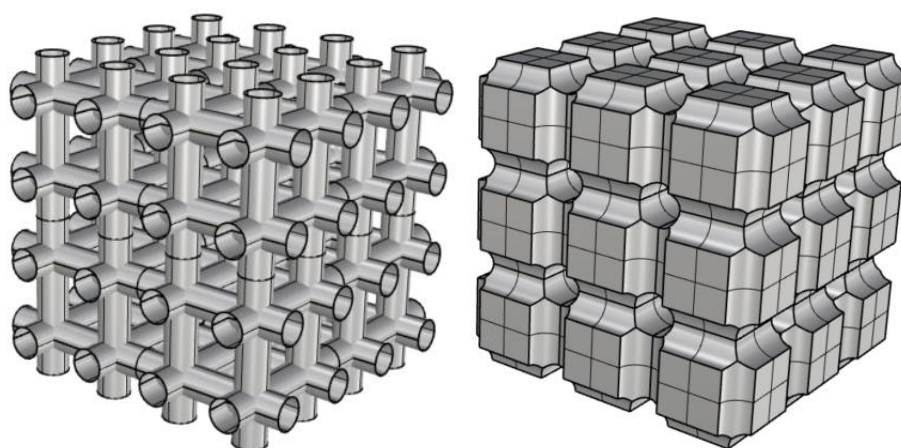


図 7.1 巨礫地盤のモデル化



【間隙部の円管モデル】

【巨礫部のイメージ】

図 7.2 巨礫地盤のモデル化（3D モデルイメージ）

7.2.2. 巨礫地盤のモデル化の流れ

対象とする巨礫地盤を円管によりモデル化するために、対象地盤の地盤性状を把握する

必要がある。具体的には、巨礫地盤の粒度分布と間隙率 n である。この巨礫地盤の粒度分布から巨礫地盤の代表粒径（例えば 50% 粒径 D_{50} ）を求める。

次に、これらの巨礫地盤のパラメータ (n 、 D_{50}) から間隙をモデル化する円管の直径 d を求める。以下、円管の直径 d を求める手順を具体的に示す。

巨礫の間隙を図 7.1 に示したように直径 d の円管のネットワークにモデル化した場合、巨礫 1 ケの形状は、巨礫を図 7.3 示すような、1 辺の長さが L の立方体から、全ての辺（12 辺）において、直径 d の円管による体積を減じた形状にモデル化できる。

また、1 辺の長さ L の立方体の体積に対する、この円管による欠損部の体積の比が、地盤全体の間隙率に相当する。

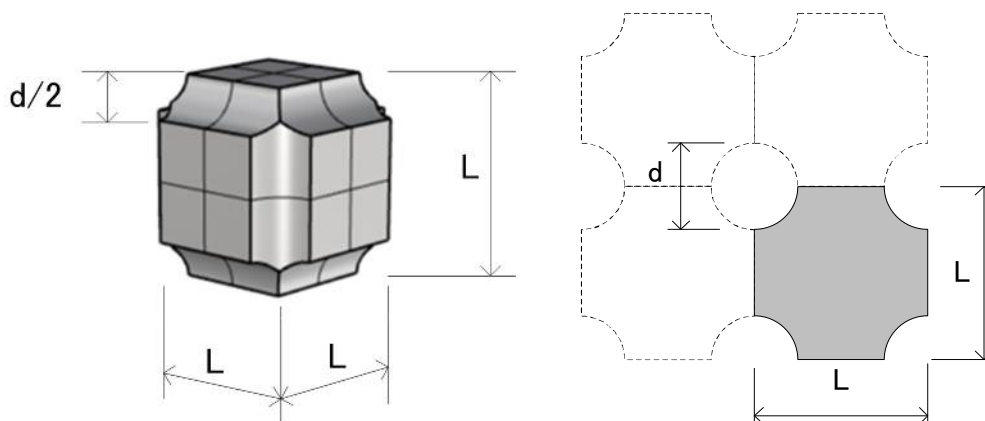


図 7.3 巨礫単体のモデル化

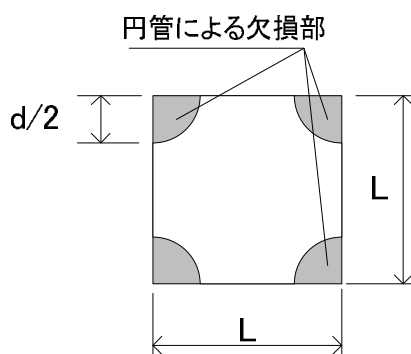


図 7.4 円管による欠損部（断面図）

図 7.3 の巨礫単体モデルにおいて、1 辺の長さを L 、円管の直径を d とした場合の欠損部 M の体積は下記のとおりとなる。

$$M = 3 \cdot L \frac{\pi d^2}{4} - 2 \cdot (2 - \sqrt{2}) d^3 \quad \text{式 [7.1]}$$

よって、モデル地盤の間隙率 n は下記のとおりとなる。

$$n = \frac{M}{L^3} \times 100 \quad \text{式 [7.2]}$$

式[7.1]、[7.2]を変形すると、下記式が得られる。

$$\frac{n}{100} = \frac{3\pi d^2}{4 L^2} - 2(2 - \sqrt{2}) \frac{d^3}{L^3} \quad \text{式 [7.3]}$$

これは d/L を変数とする 3 次方程式であり、間隙率 n の値が定まれば、 d/L は繰り返し計算により求めることができる。

また巨礫 1 ケ当たりの体積 V は下記のとおりとなる。

$$V = L^3 - M \quad \text{式[7.4]}$$

式 [7.2]、[7.4] から下記式が得られる。

$$\frac{V}{L^3} = 1 - \frac{n}{100} \quad \text{式 [7.5]}$$

この体積 V が、地盤の代表粒径を直径とする球体の体積と等価であると考えれば、代表粒径の値から求めた V と間隙率 n の値から、上記式より L の値を求めることができる。

L の値が求まれば、 d/L の値から、最終的に d の値を求めることができる。

上記式から得られた、モデル地盤の間隙率（30%～50%）ごとの、巨礫地盤の代表粒径とモデル地盤の円管径 d との関係を図 7.5 に示す。

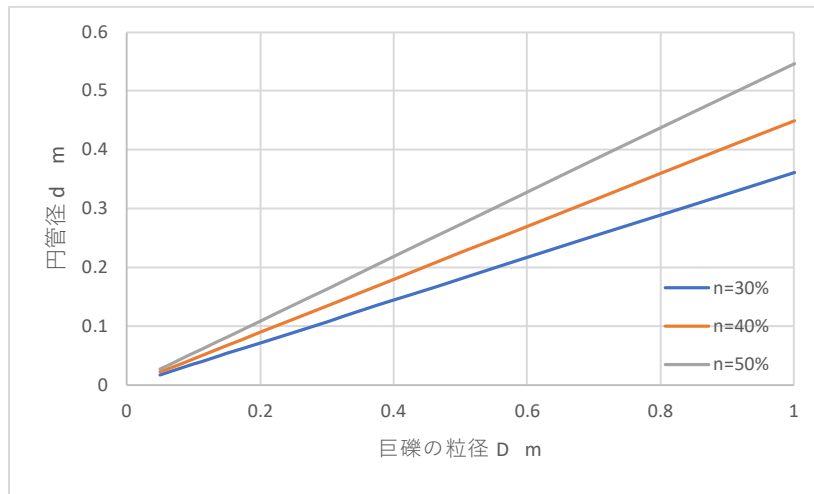


図 7.5 巨礫の粒径と円管径の関係

7.3. 配合選定に必要なパラメータ

第5章の「5.3. 円管を鉛直下方に流れる可塑性グラウト材料の流動モデル」において、円管内の流動に関して、可塑性グラウト材料をビンガム流体として考えた場合の降伏応力およびグラウト材料の密度に応じた、自重によって下方に流動することのない（円管内においてその場に留まることのできる）円管の直径 d が求められることを示した。そのつり合いの式を再掲する。

$$d \leq \frac{4\tau_y}{\rho_g g} \quad \text{式 [5.3]}$$

d : 円管の直径 (m)

τ_y : 降伏応力 (Pa)

ρ_g : グラウト材料の密度 (kg/m^3)

g : 重力加速度 (m/s^2)

水中においては、

$$d \leq \frac{4\tau_y}{(\rho_g - \rho_w)g} \quad \text{式 [5.4]}$$

ρ_w : 水の密度 (kg/m^3)

ここで、上記式を変形し、直径 d の円管内において、自重によって下方に流動することのないグラウト材料の降伏応力 τ_y は下記のようなになる。

$$\tau_y \geq d \frac{\rho_g g}{4} \quad \text{式 [7.6]}$$

水中においては、

$$\tau_y \geq d \frac{(\rho_g - \rho_w)g}{4} \quad \text{式 [7.7]}$$

よって、対象地盤の d および、可塑性グラウト材料の密度 ρ_g が決定すれば、その対象地盤を充填する可塑性グラウト材料に必要なとされる降伏応力 τ_y を求めることができる。参考までに、可塑性グラウト材料の密度を $\rho_g = 1.4, 1.6, 1.8 \text{g/cm}^3$ とした場合の、水中に

おける円管径とグラウト材料に必要とされる降伏応力の関係を図 7.6 に示す。さらに、この円管径に対応する巨礫の代表粒径とグラウト材料に必要とされる降伏応力の関係を図 7.7～図 7.9 に示す。

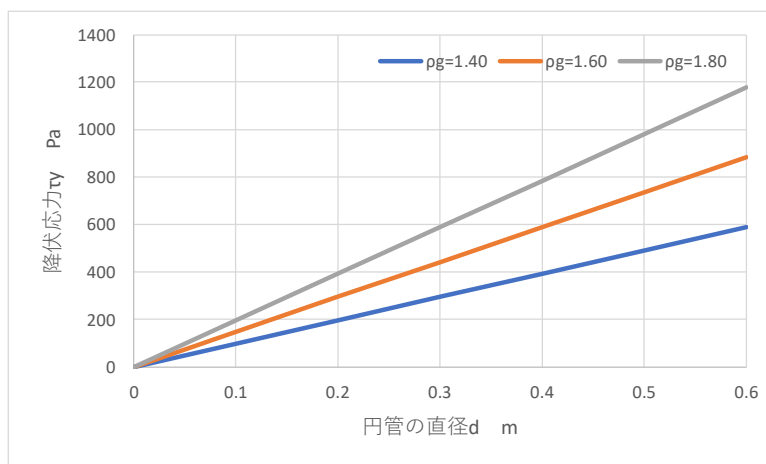


図 7.6 円管の直径 d と必要とされる降伏応力 τ_y の関係

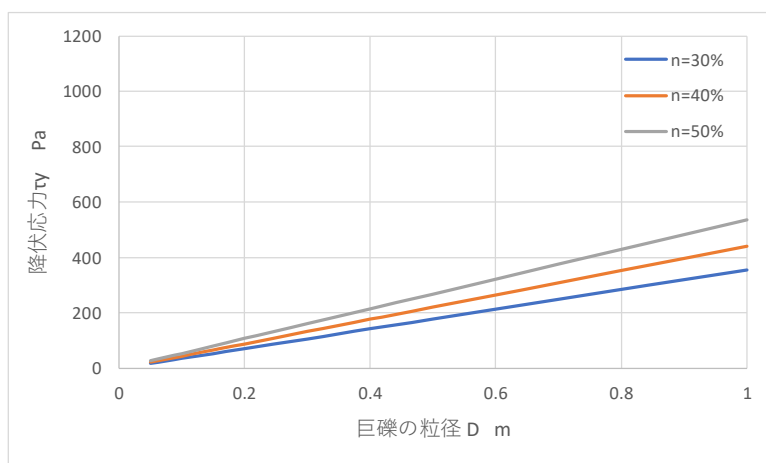


図 7.7 巨礫の代表粒径 D と必要とされる降伏応力 τ_y の関係
($\rho g=1.4g/cm^3$)

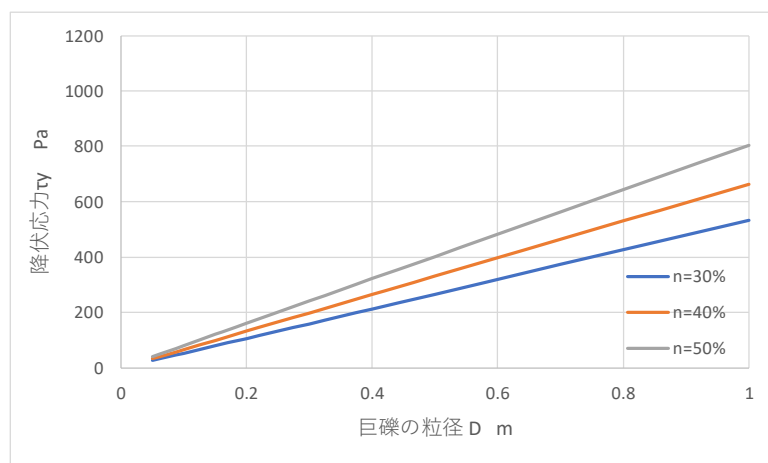


図 7.8 巨礫の代表粒径 D と必要とされる降伏応力 τ_y の関係 ($\rho_g=1.6\text{g/cm}^3$)

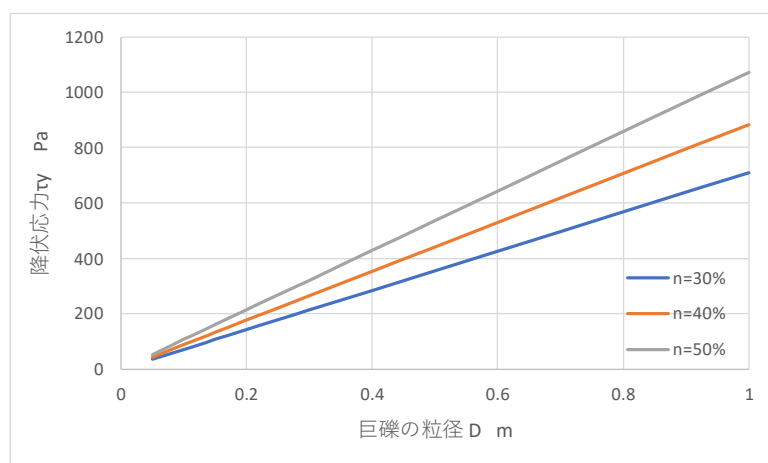


図 7.9 巨礫の代表粒径 D と必要とされる降伏応力 τ_y の関係 ($\rho_g=1.8\text{g/cm}^3$)

図 7.7～図 7.9 より、巨礫の代表粒径が大きくなるほど、また巨礫の間隙率が大きくなるほど、グラウト材料に必要とされる降伏応力が大きくなることがわかる。さらに、グラウト材料の密度が大きくなるほど、グラウト材料に必要とされる降伏応力が大きくなることもわかる。

7.4. 配合選定に必要とする材料パラメータの算出

対象地盤に対して最適な可塑性グラウト材料の配合を選定するためには、可塑性グラウト材料の降伏応力 τ_y および密度 ρ_g を知る必要がある。可塑性グラウト材料の密度 ρ_g については容易に測定することは可能であるが、降伏応力 τ_y を厳密に求めるためには、通常はグラウト材料のレオロジー特性を測定するための特殊な試験方法が必要となる。

簡易にグラウト材料の降伏応力 τ_y を測定する方法として、テーブルフロー試験等のフロー試験から測定する方法が知られている。可塑性グラウト材料は、品質試験として直径

80mm、高さ 80mm のフローコーンを用いたフロー試験を行うのが一般的であり、このフロー試験から得られるフロー値を元に、降伏応力を算出することとした。フロー試験におけるフロー値と降伏応力の関係を下式 [7.8] に示す。

$$\tau_y = \frac{\rho_g g \alpha R^2 H}{\sqrt{3} A^2} \quad \text{式 [7.8]}$$

- τ_y : 降伏応力 (Pa)
- ρ_g : グラウト材料の密度 (kg/m³)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- A : 静置フロー値の半径 (m)
- R : フローコーンの下面半径 (m)
- H : フローコーンの高さ (m)
- α : フローコーンの形状に関するパラメータ

$$\alpha = \frac{1 + a + a^2}{3} \quad \text{式 [7.9]}$$

a : フローコーンの下面半径に対する上面半径の比

ここで内径 80mm のフローコーンを使用した場合、下面半径と上面半径は等しいことから、 $a=1$ となり、よって $\alpha=1$ となる。

よって、降伏応力 τ_y は下式のとおりとなる。

$$\tau_y = \frac{9.80665 \times 1 \times 0.04^2 \times 0.08}{\sqrt{3} A^2} \rho_g = \frac{7.247 \times 10^{-4}}{A^2} \rho_g \quad \text{式 [7.10]}$$

可塑性グラウト材料の密度を $\rho_g=1.4$ 、 1.6 、 1.8g/cm^3 とした場合の、フロー値と降伏応力の関係を図 7.10 に示す。

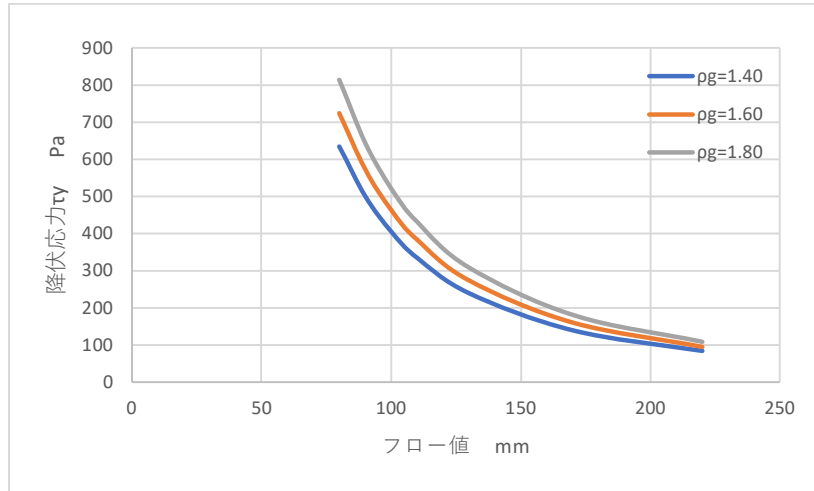


図 7.10 フロー値と降伏応力の関係

7.5. 提案した配合によって適用可能な巨礫地盤

第6章において、巨礫地盤の充填に適していると考えられる配合例を示した。その配合を改めて表7.1に示す。

表 7.1 巨礫地盤の充填に適した配合例

配合名	W/B %	SF/B %	BN C×%	密度 g/cm ³	静置 フロー値 mm	打撃 フロー値 mm	ベーンセ ン断強さ kN/m ²	押出長さ		引張強さ	
								気中	水中	気中	水中
								mm	mm	kN/m ²	kN/m ²
65-10-4	65	10	4	1.694	115	172	0.20	44	76	0.72	0.52
65-10-6	65	10	6	1.701	103	156	0.36	62	61	1.04	0.42
65-10-8	65	10	8	1.707	95	145	0.50	92	105	1.54	0.73
65-15-4	65	15	4	1.682	91	147	0.56	83	105	1.37	0.67
65-15-6	65	15	6	1.689	92	139	0.65	104	120	1.72	0.81
65-15-8	65	15	8	1.694	89	130	0.75	150	150	2.49	1.02

これらの配合について、各配合の静置フロー値と密度の値から、降伏応力 τ_y を算出し、さらに、その τ_y の値と密度の値から、先に示した巨礫地盤のモデルにおける円管径 d の値を算出した結果を表7.2に示す。この表より、これらの配合では、円管径で最も小さなもので218mm、最も大きなもので364mmとなっている。さらにここから、先に示した巨礫の粒径と円管径の関係(図7.5参照)から、間隙率30%、40%および50%と想定した場合の、各配合において適用可能な巨礫の最大径を表7.3に示す。

表 7.2 τ_y と d の算出

配合名	W/B %	SF/B %	BN C×%	密度 g/cm ³	静置 フロー値 mm	打撃 フロー値 mm	押出長さ		降伏応力 τ_y Pa	円管径 d mm
							気中	水中		
							mm	mm		
65-10-4	65	10	4	1.694	115	172	44	76	371	218
65-10-6	65	10	6	1.701	103	156	62	61	465	271
65-10-8	65	10	8	1.707	95	145	92	105	548	316
65-15-4	65	15	4	1.682	91	147	83	105	589	352
65-15-6	65	15	6	1.689	92	139	104	120	578	342
65-15-8	65	15	8	1.694	89	130	150	150	620	364

表 7.3 各配合における適用可能な巨礫の最大径

配合名	W/B	SF/B	BN	密度 g/cm ³	降伏応力 τ_y Pa	円管径 d mm	巨礫粒径 D		
	%	%	C×%				間隙率30% mm	間隙率40% mm	間隙率50% mm
65-10-4	65	10	4	1.694	371	218	603	485	399
65-10-6	65	10	6	1.701	465	271	748	601	495
65-10-8	65	10	8	1.707	548	316	875	703	579
65-15-4	65	15	4	1.682	589	352	974	783	644
65-15-6	65	15	6	1.689	578	342	947	761	626
65-15-8	65	15	8	1.694	620	364	1007	810	667

よって、仮に巨礫地盤において一般的な間隙率 40%程度の地盤においては、800mm 程度までの巨礫地盤の充填について、これらの配合で対応できると考える。

7.6. まとめ

本章の成果を以下のとおりまとめる。

- 1) 巨礫地盤について、巨礫の間隙を円管の模擬したモデルを提案した。
- 2) 巨礫地盤をモデル化するのに必要なパラメータとして、巨礫地盤の間隙率 n と50%粒径 D_{50} を提案した上で、巨礫地盤をモデル化する流れを示した。
- 3) モデル化した巨礫地盤に対して、最適な配合を選定するにあたり、可塑性グラウト材料の降伏応力 τ_y と材料密度 ρ_g が必要であることを示した。
- 4) 第6章において提案した配合について、適用可能な巨礫地盤の範囲を示した。

第 7 章の参考文献

- 1) 小村理恵ほか：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に対するレオロジー的研究、日本建築工学会構造系論文報告集、第 462 号、pp.1-10、1994

第8章 結論

各章ごとに本研究の成果についてまとめる。

第1章では、本研究の背景として、近年の可塑性グラウト材料を取り巻く現状を述べたうえで、多くの可塑性グラウト材料が抱える課題を指摘し、本研究の目的を示した。

第2章では、可塑性グラウト材料の概要を述べるとともに、可塑性グラウト材料に関する既往の研究、混和材を大量に混合したモルタル・コンクリート材料に関する既往の研究、およびグラウト材料（モルタル・コンクリート材料も含む）のレオロジー性状に関する既往の研究について述べた。

第3章では、既存の可塑性グラウト材料の課題（強度や流動性の調整といった配合調整が難しい）を示したうえで、他の性状を損なわずに流動性や強度の変更が容易な可塑性グラウト材料の検討を行っている。その結果、使用する各材料に明確な役割を持たせることで、他の性状を損ねることなく他の性状を変えることができることを示した。

これらの考えのもと、開発された可塑性グラウト材料の代表的な配合例と施工方法について示し、さらに開発された可塑性グラウト材料について、W/Cや添加剤の配合量を変えた試験を実施し、その試験結果を元に、任意の強度、流動性（フロー値）を設定した可塑性グラウト材料を、容易に配合設計するための手法を提案した。

第4章では、河川や湖沼等において可塑性グラウト材料を含むセメント系材料を充填した場合の課題（水和反応による硬化過程における周辺水のpHの上昇）について示した上で、この課題を解決するための手法について検討している。

検討の結果、セメントを極力少なくしてフライアッシュや高炉スラグ微粉末を大量に混合した配合とすることで、周辺水のpHの上昇を抑制できる可能性があることを示したうえで、配合試験を実施している。

配合試験の結果、セメントを極力少なくしフライアッシュや高炉スラグ微粉末を大量に混合した配合は、従来の可塑性グラウトにおいて固化材として一般的に使用される普通ポルトランドセメントに比べて、pHの上昇が抑制できること、さらに骨材（珪砂）を入れることで、pHの上昇をさらに大きく抑制できることを示している。配合試験においてフライアッシュ、高炉スラグ微粉末を大量の混合した配合においてダイラタンシーが疑われる性状が見られたが、適量のシリカフェームの添加が有効であることを示し、さらに硬化促進剤の添加や、可塑性を発現させるための添加剤としては、粘土鉱物系の混和剤の使用などにより、周辺水のpHの上昇を抑制できる

配合案を示した。

第5章では、巨礫地盤の充填固化における充填形態は、注入管の吐出口から同心円状（球状）にグラウト材料が充填されるのが望ましいことを示し、巨礫地盤の充填固化には水中不分離性を有し、かつビンガム流体である可塑性グラウト材料の使用が適していることを示している。さらに、巨礫地盤における可塑性グラウト材料の流動について、円管を鉛直下方に流れる可塑性グラウト材料の流動モデルを提案し、水中における巨礫地盤に対して、可塑性グラウト材料によって高品質な充填を行うためには、グラウト材料のフレッシュ状態における引張強さが重要であることを示した。

第6章では、第5章で示した、可塑性グラウト材料を高品質に充填するために求められる性状を踏まえ、フレッシュ状態における引張強さの向上を目指した配合開発を行っている。

配合の開発にあたり、フレッシュ状態における水中および気中における引張強さを評価するための試験方法を提案しており、この試験の結果、グラウト材料のフレッシュ状態における引張強さは、気中と水中で異なり、水中において大きく低下することが判明している。また、気中でのフレッシュ状態における引張強さは、本試験の範囲においては、配合や使用材料によらずベーンせん断強さと高い相関を示したのに対し、水中でのフレッシュ状態における引張強さは、気中に比べるとベーンせん断強さとの相関は小さく、可塑性グラウト材料の配合や使用材料に大きく影響を受けることも判明している。

さらに、フレッシュ状態における引張強さは、加圧ブリーディング率で評価できる可能性があることを示し、フレッシュ状態における引張強さの増加には、水粉体比をできるだけ大きくすることと、一定量のシリカフュームとベントナイトの混和が有効であることを示した上で、巨礫地盤の充填に適していると考えられる配合例を示した。

第7章では、第5章で示した、巨礫間隙に対して可塑性グラウト材料を充填するにあたって必要とされる性状を踏まえ、巨礫の間隙を円管のネットワークとしたモデルを提案している。

巨礫地盤をモデル化するのに必要なパラメータとして、巨礫地盤の間隙率 n と50%粒径 D_{50} を提案し、巨礫地盤をモデル化する流れを示している。さらに、モデル化した巨礫地盤に対して最適な配合を選定するにあたり、可塑性グラウト材料をビンガム流体と考えた場合の降伏応力 τ_y と材料密度 ρ_g が必要であることを示した上で、第6章において提案した配合について、適用可能な巨礫地盤の範囲を示した。

本研究の大きな目的として、可塑性グラウト材料の適用拡大にあり、これまで、適用拡大のために必要となる、さまざまな材料開発を中心とした研究を進めてきた。

近年は環境問題、特にセメント・コンクリート業界においてはセメント由来のCO₂の削減が喫緊の課題として注目されている。本研究においては、CO₂削減について直接的にはふれていないものの、特に第4章で述べた、pHの上昇を抑制した配合の開発においては、結果としてセメント量を大きく減らした配合（セメント量は粉体の5%のみ）となっており、この点からも環境に配慮した配合となっている。

今後の課題として、第4章において示したpHの上昇を抑制できる配合案や、第6章で示した巨礫地盤の充填に適していると考えられる配合例は、室内試験レベルで確認した配合であり、実際の現場での適用例はない。また、第7章において示した巨礫地盤のモデル化と巨礫地盤の代表粒径に応じた最適な配合選定の手法についても、実地盤等における適用性の確認までは至っていない。今後はこれらの配合や手法について、実際の現場での適用をはかり、その結果を踏まえ、必要に応じてさらなる改良に努めたいと考える。

近年、可塑性グラウト材料に関しても、特にCO₂削減という点で、環境に配慮した材料開発が求められるようになってきた。今後は、さらなる適用拡大を目指した配合開発とともに、この点についても積極的に研究開発を進めていきたいと考える。

謝辞

本学位論文は、私がこれまでに取り組んできた可塑性グラウト材料に関する研究開発の成果を取りまとめたものです。

本研究を取りまとめるにあたり、実験、論文作成に協力、助言を頂いた皆様に感謝いたします。

宇都宮大学地域デザイン科学部長 藤原浩巳教授には、研究全般に渡り、終始懇切なご指導、ご助言を頂きました。ここに深く感謝いたします。

本論文の審査に際して、宇都宮大学 池田裕一教授、藤倉修一教授、清木隆文准教授、丸岡正知准教授より、ご指導、ご助言を頂き、深く感謝いたします。

勤務先である、日特建設（株）代表取締役副社長 山田浩氏、常務執行役員技術開発本部長 菅浩一氏には、私の博士号取得に対して背中を押していただくとともに、懇切なご指導を頂き、深く感謝いたします。さらに、執行役員技術開発本部副本部長 宇次原雅之氏、技術開発本部技術センター長 三上登氏、技術開発本部技術フェロー 中島雅和氏には、直属の上司として、研究開発全般に渡りさまざまな助言、ご指導を頂き、深く感謝いたします。

日特建設（株）技術開発本部材料・環境技術開発部 Egy Crystal Soesilo 氏には、配合試験等の実験業務において多大な協力を頂き、深く感謝いたします。

日特建設（株）常勤監査役阿部義宏氏は、私が技術本部に転勤してきた当初、直属の上司として多大なご指導、ご支援をいただきました。以降、私が材料開発という研究テーマを中心に取り組み、本学位論文をまとめるに至るきっかけを作って頂きました。ここに深く感謝いたします。

本論文は社内外問わず、多くの方々のご指導、ご支援の結果、執筆することができました。ここで改めて深く感謝申し上げます。

最後に、私の本学位論文の取組みに対して、あたたかく見守っていただき応援いただいた妻と息子に心から感謝し、謝辞といたします。

2024年3月