

平成30年度

修士論文

微粒子粉体を用いたジオポリマーの
ひび割れ補修材としての活用に関する基礎的研究

指導教員 畑中 重光 教授

三重大学大学院工学研究科

建築学専攻

伊藤 彰利

『微粒子粉体を用いたジオポリマーのひび割れ補修材としての活用に関する基礎的研究』

—目次—

第1章 序論

- 1.1 本研究の背景
- 1.2 本研究の目的
- 1.3 本論文の構成

第2章 既往の研究

- 2.1 概説
- 2.2 ジオポリマー
 - 2.2.1 定義
 - 2.2.2 固化機構
 - 2.2.3 調（配）合設計
 - 2.2.4 圧縮強度
 - 2.2.5 凝結時間
 - 2.2.6 耐久性
- 2.3 微粒子粉体
 - 2.3.1 本研究における微粒子粉体の定義
 - 2.3.2 シリカフェーム
 - 2.3.3 高炉スラグ微粉末
- 2.4 ひび割れ補修
 - 2.4.1 ひび割れ補修について
 - 2.4.2 有機系材料
 - 2.4.3 無機系材料
 - 2.4.4 ひび割れ注入実験
- 2.5 まとめ

第3章 ジオポリマーを補修材として活用するための初期実験 (ジオポリマーとコンクリートとの付着特性)

- 3.1 概要
- 3.2 実験概要
 - 3.2.1 実験の要因と水準
 - 3.2.2 使用材料および調合
 - 3.2.3 供試体作製方法
 - 3.2.4 試験方法
- 3.3 実験結果および考察
 - 3.3.1 材料特性
 - 3.3.2 傾斜せん断試験結果
- 3.4 まとめ

第4章 超微粒子粉体のシリカフェームを添加したジオポリマーの基礎特性 (圧縮強度およびフロー値)

- 4.1 概要
- 4.2 実験Ⅰ (粉体に対するシリカフェーム置換率の影響)
 - 4.2.1 実験の要因と水準
 - 4.2.2 使用材料および調合
 - 4.2.3 試験方法
 - 4.2.4 試験結果
- 4.3 実験Ⅱ (シリカフェームの種類の影響)
 - 4.3.1 実験の要因と水準
 - 4.3.2 使用材料および調合
 - 4.3.3 試験方法
 - 4.3.4 試験結果
- 4.4 まとめ

第5章 微粒子粉体の高炉スラグ微粉末を添加したジオポリマーの基礎特性 (圧縮強度およびフロー値)

5.1 概要

5.2 実験概要

5.2.1 実験の要因と水準

5.2.2 使用材料および調合

5.2.3 実験方法

5.3 実験結果および考察

5.3.1 フロー試験

5.3.2 凝結時間試験

5.3.3 圧縮強度試験

5.4 まとめ

第6章 微粒子粉体(高炉スラグ微粉末・シリカフェーム)を添加したジオポリマーの ひび割れ注入実験

6.1 概要

6.2 実験の要因と水準

6.3 使用材料および調合

6.4 実験方法

6.5 実験結果

6.6 まとめ

第7章 総括

7.1 本研究の総括

7.2 今後の課題と展望

【付録】～コンクリートへの注入実験～

1. 実験の要因と水準

2. 使用材料および調合

3. 実験方法

4. 実験結果

5. まとめ

【参考文献】

【謝辞】

第1章

序論

1.1 本研究の背景

セメントクリンカを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ溶液を用いて硬化させたジオポリマー¹⁾は、産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末の有効活用、CO₂の排出量を低減出来ることから、低炭素・資源型社会実現のためのセメント代替材料として、土木分野および建築分野における構造物への利用が期待されている。しかし、その用途や活用方法は模索段階である。

現在、ひび割れ補修材はエポキシ樹脂などの有機系補修材料とポリマーセメント系などの無機系補修材料の2種類が用いられている。有機系補修材料は、付着やひび割れ追従性能などが良いことから、多く活用されているが、紫外線による劣化や耐火性に劣る点、施工時の温度管理や湿潤面での接着不良²⁾³⁾、またコンクリートとの熱膨張係数、引張強度が異なるなどの問題がある。一方、無機系補修材料は、コンクリートと同等の材料特性を有し、紫外線などの耐久性に優れているが、付着やひび割れ注入性能は有機系補修材料に劣り、さらに乾燥面でドライアウトを起こす欠点がある⁴⁾。どちらも粘度が小さいとダレ現象が起こる⁵⁾。

無機系材料であるジオポリマーの特徴としては、①耐久性に優れる、②コンクリートと同程度の材料特性が得られる、③コンクリートおよび鉄筋との付着が良い⁶⁾、そして④コンクリートより耐硫酸性が高い⁷⁾⁸⁾、⑤凝結時間が短い⁹⁾という利点と、①材料によって生成される物質が異なる、②高アルカリ材料の使用、③粘性が高いなどの欠点が挙げられる。

そこで本研究では、凝結時間が短く、耐硫酸性、および耐久性に優れるという点に着目し、ジオポリマーのひび割れ注入材としての活用を検討する。

1.2 本研究の目的

ジオポリマーをひび割れ注入材として活用するために、粒径の細かさが注入深さに関係することから¹⁰⁾、微粒子粉体に着目し、活性フィラーに超微粒子であるシリカフェーム、比表面積の大きな高炉スラグ微粉末 JIS 6000 級および 8000 級を用いる。

しかし、シリカフェームは一般的に少量（およそ粉体に占める割合が 10%程度）の混和材として使用され^{8)11)~19)}、主要な粉体として使用されている研究はない。また高炉スラグ微粉末も 4000 級が主に使用され、比表面積の大きな 6000, 8000 級をジオポリマーの活性フィラーとして用いている研究は少ない²⁰⁾。

そこで本研究では、シリカフェーム、または比表面積の高炉スラグ微粉末（4000, 6000, 8000 級）を活性フィラーとして使用した場合のジオポリマーの基礎特性を調べた。その後、ひび割れ注入性能を調べるため、塩ビ板による簡易的なひび割れ注入実験を行い、ジオポリマーのひび割れ注入性能および実験方法の検討を行った。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下にまとめる。

第1章では、本研究の背景および目的を示す。

第2章では、ジオポリマー、本実験で使用する微粒子粉体シリカフェーム、高炉スラグ微粉末、およびひび割れ補修材についての定義、基本事項、および関連する既往の文献を整理する。

第3章では、ジオポリマーをコンクリート構造物への補修材として活用するために、初期実験として、一般的なジオポリマーである高炉スラグ微粉末添加型とコンクリートとの付着特性を明らかにする。

第4章では、超微粒子シリカフェームを活性フィラーとして用いたジオポリマーの練混ぜの可否、フロー値、圧縮強度などの基礎特性を調べ、ジオポリマーの活性フィラーとしてシリカフェームが適用できるかの検討を行う。

第5章では、異なる比表面積の高炉スラグ微粉末（4000，6000，8000 ブレーン）を用いたジオポリマーのフロー値，凝結時間，圧縮強度などの基礎特性を調べる。

第6章では、シリカフェーム，および高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーの注入性能を確認し，ひび割れ注入実験の実験方法の検討を行う。

第7章では，本研究により得られた知見を総括し，今後の課題を述べる。

第2章

既往の研究

2.1 概説

本章では、微粒子粉体を活性フィラーとしジオポリマーのひび割れ補修材としての適用に関する研究を行う前段階として、これまでに行われているジオポリマーの基本事項、微粒子分チアの概要、微粒子粉体を用いたジオポリマーの研究、およびひび割れ補修に関連する基本事項・研究を調査し、既往の文献を整理する。

2.2 ジオポリマー

2.2.1 定義

ジオポリマーはフランスの Joseph Davidovits により提唱された用語であり、アルカリシリカ溶液と活性フィラーとの反応によって形成される非晶質の縮重合体（ポリマー）の総称である¹⁾。

1970年代当初のジオポリマーは、メタカオリン（カオリン鉱物を非晶質状態となるよう加熱処理したもの）にアルカリ刺激作用を与え、天然ゼオライトに近いアルミノケイ酸塩の縮重合体を生成したものであった。

その後、石炭火力発電所から排出されるフライアッシュが産業副産物の有効活用、二酸化炭素排出量削減の観点から多く使用されるようになった。現在のジオポリマー研究では多様な粉体と溶液が試されており、使用材料によってマトリックスを構成する反応生成物も大きく異なる。特に、近年多様に使用されているフライアッシュの問題点である初期強度を改善するために、高炉スラグが併用されようようになったが、高炉スラグを使用した場合、高炉スラグに含まれる酸化カルシウム成分の影響により、反応が複雑になりゼオライトのような3次元構造を形成しづらくなり、ジオポリマーと異なる構造となる。

これらの背景から、コンクリート工学会では「セメントクリンカを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ金属のケイ酸塩、炭酸塩、水酸化物の水溶液の少なくとも1種類（アルカリ溶液）を用いて硬化させたもの」と定義している。さらに「セメントを少量用い混和材としてフライアッシュや高炉スラグを多量に使用した系、あるいは主としてCa系溶液をアルカリ刺激剤として用いて硬化させたような系はジオポリマーに含まない」としている²⁾。

2.2.2 固化機構

図-2.2.2 に、ジオポリマーの固化概念図を示す。ジオポリマーの硬化体は、活性フィラーを無機質の不安定ゲルで固めた構造になり、この硬化はケイ酸モノマーの縮重合反応によるポリマー化である。水ガラス中のケイ酸は、モノマー（単量体）に近い状態で存在する。フィラーから溶出した金属イオンは水ガラス成分を含む水と接すると、金属イオンが架橋金属として作用し、水ガラス中のケイ酸が水の蒸発を伴いながらイオンを取り込んで高分子化（ケイ酸錯体を架橋）すると考えられている³⁾。

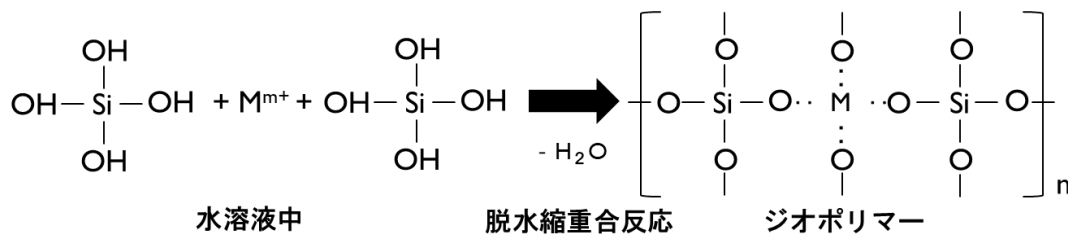


図-2.2.2 ジオポリマーの固化概念図

2.2.3 調（配）合設計

現在、ジオポリマーの調（配）合設計は、使用材料によって性質が異なるため、粉体やアルカリ溶液、骨材等を組み合わせた様々な検討が行われている。本項ではジオポリマーの調合に関わる検討について、それらの一部を紹介する。

(1) 一宮らの研究⁴⁾ 【ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究】

一宮らは、アルカリシリカ溶液として水ガラスと水酸化ナトリウム、活性フィラーとしてフライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーモルタルを製造し、ジオポリマーコンクリートの配合設計理論構築を目的として、強度試験を行った。表-2.2.3.1 にジオポリマーモルタルの配合を、表-2.2.3.2 にセメントモルタルの配合を、図-2.2.3.1 に養生条件を示す。

その結果、図-2.2.3.2~2.2.3.4 に示すように、活性フィラー中に高炉スラグ微粉末で置換することで、圧縮強度が向上し、置換率 30% で高強度が得られること、ジオポリマーモルタルは蒸気養生後の材齢 1 日で既に 28 日強度の 75% 程度の強度を発現すること、その後常温で材齢 7 日までは強度は直線的に増進するが、それ以降の変化はなくなる。蒸気養生が 24 時間までは、時間とともに圧縮強度は直線的に増加することなどを報告している。

表-2.2.3.1 ジオポリマーモルタルの配合 (kg/m³)

BS 置換率 (%)	GP 溶液	FA	BS	細骨材
0	244.2	533.6	0.0	1535.4
10		480.3	66.0	
20		426.9	132.0	
30		373.6	198.0	

※ 標準配合 (BS 置換率 10%) の W/C は 44.7%

表-2.2.3.2 セメントモルタルの配合 (kg/m³)

水	セメント	細骨材
255.9	511.8	1535.4

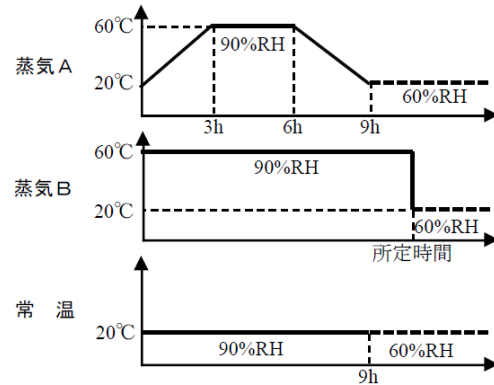


図-2.2.3.1 養生条件

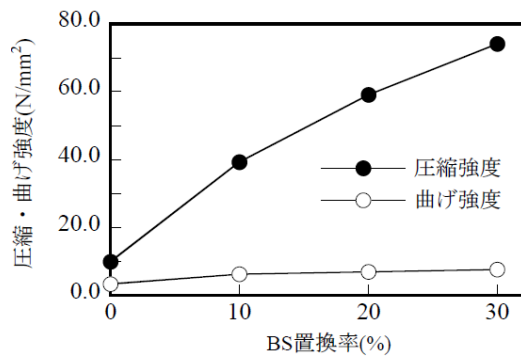


図-2.2.3.2 BS置換率と強度の関係

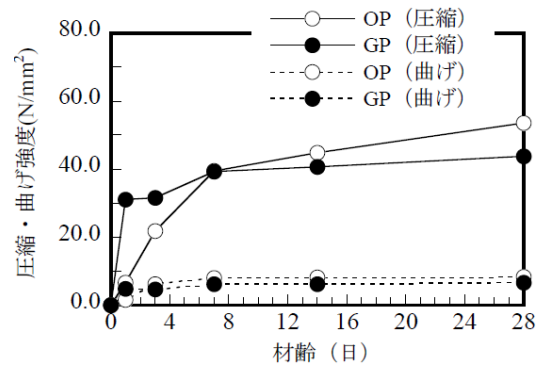


図-2.2.3.3 材齢と強度の関係

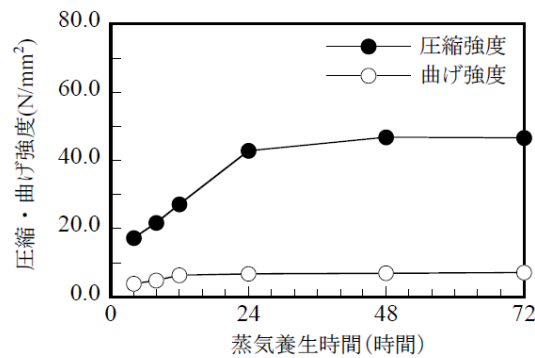


図-2.2.3.4 蒸気養生時間と強度の関係

(2) 一宮らの研究⁵⁾ 【フライアッシュベースのジオポリマーの配合ならびに高温抵抗性】

一宮らは、フライアッシュベースで、強度発現のために高炉スラグ微粉末を添加したジオポリマーの流動性や固化後の諸物性を向上させるために、アルカリ溶液の種類ならびに組み合わせ、混和剤としてシリカフュームを用いる方法の有効性を検討した。さらに、高炉スラグ微粉末添加率がジオポリマーの高温抵抗性に及ぼす影響を調べるための高温加熱実験（500℃、800℃、1150℃）も行った。表-2.2.3.3に使用材料を、表-2.2.3.4にジオポリマーモルタルの配合を、表-2.2.3.5にセメントモルタルの配合を、表-2.2.3.6にシリカフュームを混和したジオポリマーモルタルの配合を示す。また、図-2.2.3.5にジオポリマー溶液の配合を、図-2.2.3.6に蒸気養生条件を、図-2.2.3.7に高温抵抗性実験の加熱条件を示す。

その結果、表-2.2.3.7、図-2.2.3.8~2.3.10に示すように、活性フィラーの一部をシリカフュームで置換することで流動性が改善されること、苛性ソーダ（水酸化ナトリウム）は強度向上に効果があること、高温条件でのジオポリマーの強度は、500℃で常温強度の1.1~3.0倍に向上し、800℃以上では常温強度以下となることなどを報告している。

表-2.2.3.3 使用材料

分類	項目	記号	材料
GP モルタル	活性 フィラー	FA	フライアッシュ1種 密度 2.36g/cm ³ 比表面積 5327cm ² /g
		BS	高炉スラグ微粉末 密度 2.92 g/cm ³ 比表面積 4009cm ² /g
		SF	シリカフューム 密度 2.30 g/cm ³ 比表面積(BET)150,000cm ² /g
	GP 溶液 (GPW)	水ガラス	ケイ酸ナトリウム 密度 1.56g/cm ³
		ケイ酸カリ1	ケイ酸カリウム1号 密度 1.57g/cm ³ SiO ₂ 27.5~29, K ₂ O 21~23
		ケイ酸カリ2	ケイ酸カリウム2号 密度 1.27g/cm ³ SiO ₂ 19.5~21.5, K ₂ O 8.5~9.5
		苛性 ソーダ	水酸化ナトリウム 密度 1.51g/cm ³
		W	水道水
	細骨材	S	標準砂, 密度 2.64 g/cm ³
	OPC モルタル	セメント	OPC
水		W	水道水
細骨材		S	標準砂, 密度 2.64 g/cm ³

表-2.2.3.4 ジオポリマーモルタルの配合 (kg/m³)

記号	BS置換率 (%)	GPW	FA	BS	S
BS0	0	244	534	0	1535
BS10	10	244	480	66	1535
BS20	20	244	427	132	1535
BS30	30	244	374	198	1535

表-2.2.3.5 セメントモルタルの配合 (kg/m³)

記号	W	OPC	S
OPC	256	512	1535

表-2.2.3.6 シリカフュームを混合したジオポリマーモルタルの配合 (kg/m³)

SF置換率 (%)	GPW1	FA	BS	SF	S
0	244	534	66	0	1535
10	244	427	66	47	1535
20	244	374	66	95	1535

GPW1	水ガラス	苛性ソーダ	水
GPW2	水ガラス		水
GPW3	ケイ酸カリ		水
GPW4	水ガラス	ケイ酸カリ	苛性ソーダ
GPW5	水ガラス	ケイ酸カリ	苛性ソーダ

図-2.2.3.5 ジオポリマー溶液

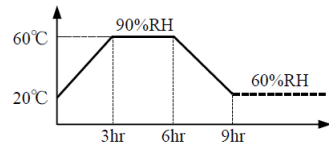


図-2.2.3.6 蒸気養生条件

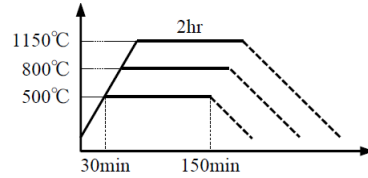


図-2.2.3.7 高温抵抗性実験の加熱条件

表-2.2.3.7 シリカフェーム置換率ごとのジオポリマーの物性

SF 置換率 (%)	フロー値	粘稠度	圧縮強度(N/mm ²)	
			3日	28日
0	202	高	25.2	35.0
10	198	低	25.1	31.7
20	171	低	22.0	33.6

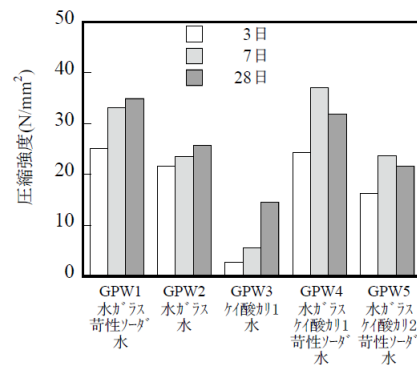


図-2.2.3.8 ジオポリマー溶液ごとの圧縮強度の比較

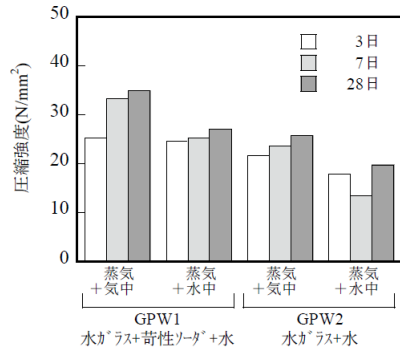


図-2.2.3.9 苛性ソーダ使用ならびに水中浸漬の有無による圧縮強度の比較

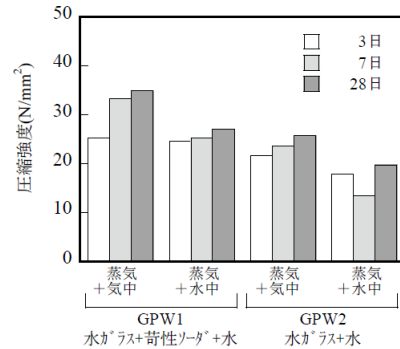


図-2.2.3.10 高温下における高炉スラグ微粉末添加率ごとの圧縮強度の比較

(3) 上原らの研究⁶⁾ 【ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質】

上原らは、アルカリ/H₂O比, Si/アルカリ比, および高炉スラグ置換率の異なるフライアッシュを主原料としたジオポリマー硬化体を, Si成分として水ガラスを用いる「一般法」および, シリカフェーム微粉を練混ぜ時に溶かす「シリカフェーム添加法」で作製し, 諸性質とその配合, 作製法との関係を検討した。表-2.2.3.8にジオポリマーコンクリートの配合を, 表-2.2.3.9にジオポリマーモルタルの配合を示す。コンクリートの一般法においてはKOH溶液を使用し, モルタルにおいてはNaOH溶液を使用し, 純粋あるいは水ガラス3号と混合してアルカリ溶液を作製した。

その結果, 図-2.2.3.11~2.2.3.14に示すように, 作製法により生成物に大きな違いはないが, シリカフェーム添加法では低アルカリかつ高炉スラグ置換率の小さい領域で一般法と比較して強度が小さくなること, アルカリ/水比および高炉スラグ置換率の大きい成分領域で適用が可能であること, また配合において高炉スラグの置換率が大きく, アルカリ濃度が高いとき, 細孔が緻密化し強度や塩化物イオン浸透抑制効果が大きくなることなどを報告している。

表-2.2.3.8 ジオポリマーコンクリートの配合

試番	配合条件				単位量(kg/m ³)						
	AL/W	Si/AL	水量 kg/m ³	BS 置換率	FA	BS	S	G	ASS	A1	A2
1	0.10	0.30	139	20%	335	101	757	892	193	8.71	0.52
2	0.15	0.30	133	0%	418	0	757	892	209	8.37	0.75
3	0.15	0.30	133	20%	335	101	757	892	209	8.71	0.50
4	0.15	0.30	133	30%	293	151	757	892	209	8.88	0.43
5	0.20	0.30	127	20%	335	101	757	892	224	8.71	0.35

AL/W:アルカリ/H₂Oのモル比, Si/AL:Si/アルカリのモル比, FA:フライアッシュ(JIS I号), BS:高炉スラグ微粉末(4000 プレーン), S:細骨材, G:粗骨材, ASS:「48%KOH 溶液+JIS III号水ガラス+純水」を配合条件で混合。A1:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系), A2:助剤

表-2.2.3.9 ジオポリマーモルタルの配合

試番	配合条件				単位量(kg/m ³)					
	AL/W	Si/AL	水量 kg/m ³	BS置換率	FA	BS	S	AS	SF	A1
6	0.174	0.257	189	13%	570	103	1311	263	29.6	13.1
7	0.174	0.302	189	13%	569	103	1307	262	34.6	13.0
8	0.174	0.355	188	13%	567	102	1303	261	40.5	13.0
9	0.174	0.257	189	22%	512	175	1311	263	29.6	13.1
10	0.174	0.302	188	22%	510	174	1307	262	34.6	13.0
11	0.174	0.355	188	22%	508	174	1303	261	40.5	13.0

AL/W:アルカリ/H₂Oのモル比, Si/AL:Si/アルカリのモル比, FA:フライアッシュ(JIS I号), BS:高炉スラグ微粉末(4000 プレーン), S:細骨材, AS:「市販NaOH粉末+純水」を配合条件で混合。A1:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系)

アルカリ/H₂O比=0.10:●○, =0.15:▲△, =0.20:◆◇
Si/アルカリ=0.35(固定)

(a)塗りつぶし:SF添加法, (b)白抜き:一般法

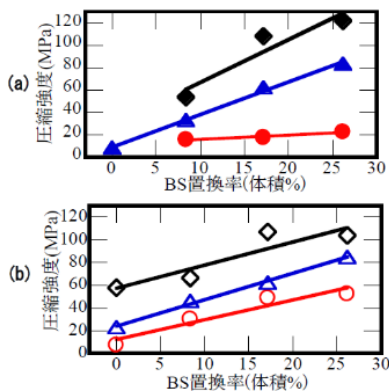
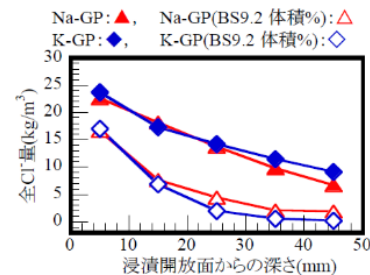


図-2.2.3.11 ジオポリマーモルタルの作製法と圧縮強度



アルカリ/H₂O比=0.25, Si/アルカリ比=0.33, 単位水量 170kg/m³, BS置換率 9.2 体積%

図-2.2.3.12 ジオポリマーモルタルの塩化物イオン浸透特性

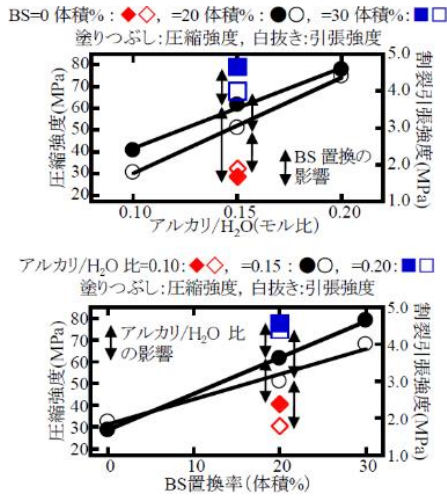


図-2.2.3.13 ジオポリマーコンクリートの配合と強度

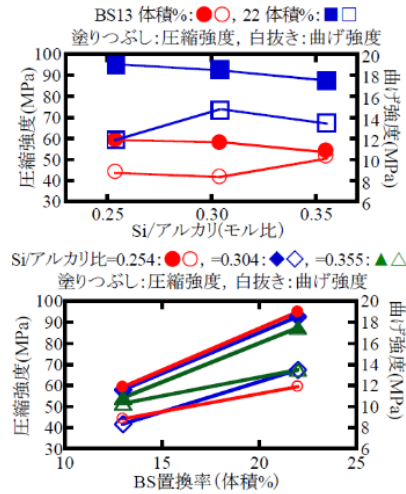


図-2.2.3.14 ジオポリマーモルタルの配合と強度

2.2.4 圧縮強度

(1) 市川らの研究⁷⁾ 【ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現性に関する基礎的研究】

市川らは、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたジオポリマーの圧縮強度発現性に関する基礎的な研究を行った。高炉スラグ微粉末の石膏添加の有無，水ガラスの種類（1～3号），水酸化ナトリウム水溶液の添加などの圧縮強度に与える影響を調べた。

表-2.2.4.1に使用材料を，表-2.2.4.2に調合表を示す。

その結果，図-2.2.4.1に圧縮強度試験結果に示すように，圧縮強度は水ガラス2号が最も高く，石膏添加が無く，水酸化ナトリウム水溶液の添加により大きくなることを報告している。

表-2.2.4.1 使用材料

種類	材料名	略号	密度 (g/cm ³)	平均粒度 (μm)
粉体	高炉スラグ微粉末 (石膏添加有)	BS1	2.91	13.8
	高炉スラグ微粉末 (石膏添加無)	BS2		12.4
	フライアッシュ (JIS II種)	FA	2.20	12.3
溶液	水ガラス1号希釈 (Na ₂ O/SiO ₂ モル比: 2)	WG1	1.29	-
	水ガラス2号原液 (Na ₂ O/SiO ₂ モル比: 2.5)	WG2	1.45	
	水ガラス3号原液 (Na ₂ O/SiO ₂ モル比: 3)	WG3	1.40	
	水酸化ナトリウム水溶液 (10mol/L)	NH	1.35	

表-2.2.4.2 調合表

供試体の記号	溶液/粉体比	単位量 (g/L)								
		WG1	WG2	WG3	NH	BS1	BS2	FA		
WG1-BS1-FA0	0.6	742	0	0	0	1236	0	0		
WG1-BS2-FA0						0	1236			
WG2-BS1-FA0		792	1320			0				
WG2-BS2-FA0			0			1320				
WG2-BS1-FA50		738	615			0	615			
WG2-BS2-FA50			0			615				
WG2-FA100		691	0			0	1152			
WG2+NH-BS1-FA0		0	521			261	1303	0	0	
WG2+NH-BS2-FA0							0	1303		
WG2+NH-BS1-FA50							486	607	0	607
WG2+NH-BS2-FA50								0	607	
WG2+NH-FA100							455	228	0	1138
WG3-BS1-FA0							0	777	0	1295
WG3-BS2-FA0		0	1295							

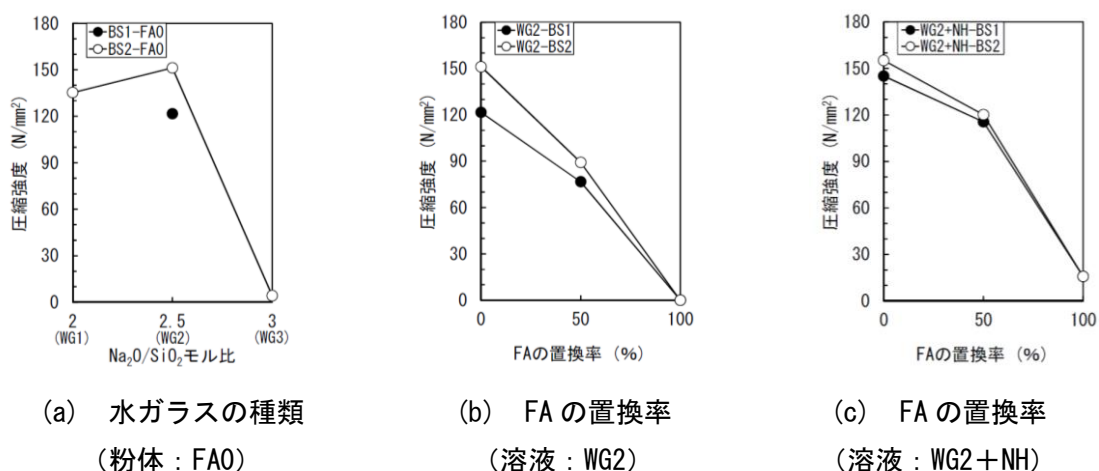


図-2.2.4.1 圧縮強度

(2) 市川らの研究⁸⁾ 【高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーペーストの圧縮強度発現性に関する基礎的研究】

市川らは、高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーの高炉スラグ微粉末置換率 (0, 50, 100%), 溶液/粉体比 (0.4~0.6), 養生温度 (20, 50, 80°C), およびフライアッシュの粉砕の影響を検討している。

表-2.2.4.3 に使用材料を, 表-2.2.4.4 に調合表を, 表-2.2.4.5 に高温養生 (50, 80°C) の養生条件を, 表-2.2.4.6 に FA の粒度分布を示す。

その結果, 図-2.2.4.2 の圧縮強度と各種条件の影響に示すように, 粉体にフライアッシュを単独で使用する場合には高温養生を行うことで圧縮強度が増加するのに対して, 高炉スラグ微粉末を使用する場合には, 常温養生が最も圧縮強度が高く, 高温養生を行うことで圧縮強度が減少する傾向がみられること, この実験ではフライアッシュの微粉砕による活性度の改善効果がみられなかったこと, 粉体に高炉スラグ微粉末を単独で使用する場合に, 最も高強度が得られることを報告している。

表-2.2.4.3 使用材料

種類	材料名	略号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	平均粒径 (μm)	強熱減量 (%)
粉体	高炉スラグ微粉末4000 (石こう添加無)	BS	2.91	4250	12.4	0
	フライアッシュ JIS II種	FA	2.29	3830	20.3	2.5
	フライアッシュ JIS II種 微粉砕5000	FA1			10.3	
	フライアッシュ JIS II種 微粉砕7000	FA2			7.7	
	水ガラス2号原液 (Na ₂ O/SiO ₂ モル比: 2.5)	WG2			1.45	
水酸化ナトリウム水溶液 (10mol/L)	NH	1.35	-	-	-	

表-2.2.4.4 調査表

供試体の記号	W/P	V _{FA} (%)	粉砕時間 (時間)	養生温度 (°C)	単位量 (g/L)					
					BS	FA	FA1	FA2	WG2	NH
0.4-FA0-20	0.4	0	-	20	1614	0	0	0	646	0
0.4-FA50-0-20		50	0		807	635	0	0	646	0
0.4-FA100-0-20		100	0		0	1270	0	0	430	200
0.5-FA0-20	0.5	0	-	50	1452	0	0	0	726	0
0.5-FA0-50			50		1452	0	0	0	726	0
0.5-FA0-80			80		1452	0	0	0	726	0
0.5-FA50-0-20		50	0	20	726	572	0	0	726	0
0.5-FA50-1-20			1		726	0	572	0	726	0
0.5-FA50-2-20			3.5		726	0	0	572	726	0
0.5-FA50-0-50			0	50	726	572	0	0	726	0
0.5-FA50-0-80			0	80	726	572	0	0	726	0
0.5-FA100-0-20			100	0	20	0	1143	0	0	484
0.5-FA100-1-20		1		0		0	1143	0	484	225
0.5-FA100-2-20		3.5		0		0	0	1143	484	225
0.5-FA100-0-50		0		50	0	1143	0	0	484	225
0.5-FA100-0-80	0	80		0	1143	0	0	484	225	
0.6-FA0-20	0.6	0		-	20	1320	0	0	0	792
0.6-FA50-0-20		50	660	519		0	0	792	0	
0.6-FA100-0-20		100	0	1039		0	0	528	246	

[注] 供試体の記号: 左からW/P-V_{FA}-FAの種類-養生温度 (V_{FA}=0%の場合、左からW/P-V_{FA}-養生温度) を示す。

表-2.2.3.4.5 高温養生の養生条件

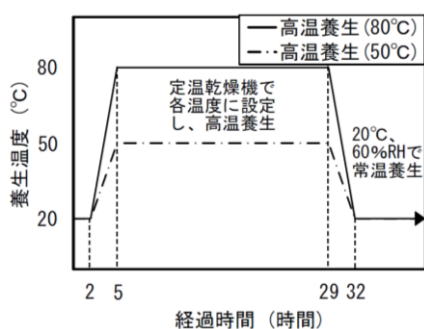
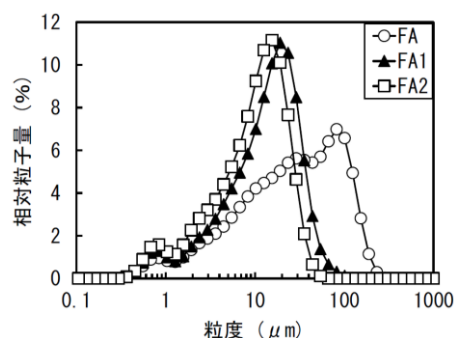
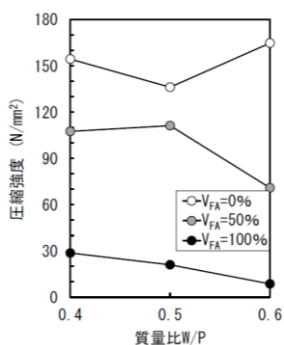


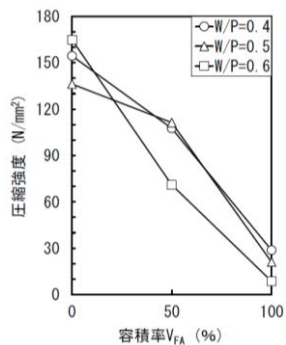
表-2.2.4.6 粒度分布





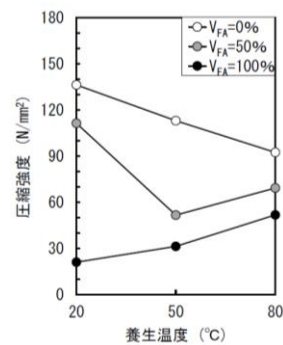
(a) W/P の関係に及ぼす V_{FA} の影響

(養生温度: 20°C, FA 粉碎なし)



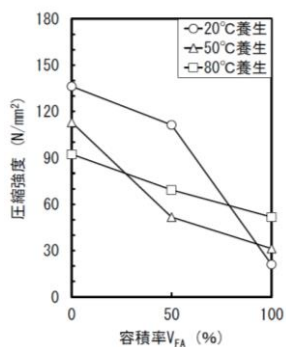
(b) V_{FA} の関係に及ぼす W/P の影響

(養生温度: 20°C, FA 粉碎なし)



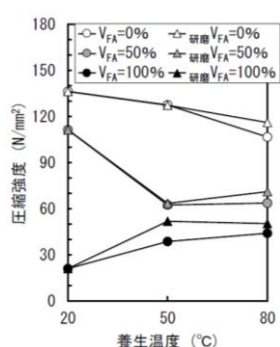
(c) 養生温度の関係に及ぼす V_{FA} の影響

(W/P=0.5, FA 粉碎なし)



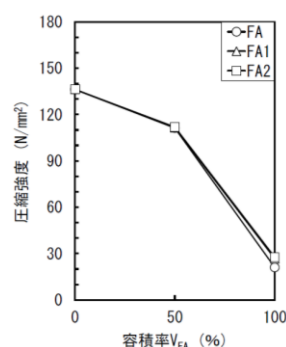
(d) V_{FA} の関係に及ぼす 養生温度の影響

(W/P=0.5, FA 粉碎なし)



(e) 養生温度の関係に及ぼす V_{FA} の影響

(再実験結果)



(f) V_{FA} の関係に及ぼす FA の微粉碎の影響

(W/P=0.5, 養生温度: 20°C)

図-2.2.4.2 圧縮強度に与える各種条件の影響

2.2.5 凝結時間

(1) 岡田らの研究⁹⁾ 【ジオポリマーに適用する凝結遅延剤に関する研究】

岡田らは、ジオポリマーの施工性を確保しつつ強度発現性を阻害しない有機系凝結遅延剤について検討を行った。

表-2.2.5.1に使用材料を、表-2.2.5.2にGPの配合表を示す。凝結遅延剤は、GPが水ガラスおよび水酸化ナトリウムに由来する無機イオンが多量に存在するため、高分子有機化合物の効果は発現しづらいと考え、低分子有機化合物であるL-酒石酸ナトリウムおよびグルコン酸ナトリウムを用いた。GPペーストとモルタルで検討を行なった。

その結果、図-2.2.5.1～図-2.2.5.3に示すようにL-酒石酸ナトリウムがジオポリマーの凝結時間を遅延させること、またジオポリマーに使用する活性フィラーの種類、水酸化ナトリウム水溶液の濃度を変化させても十分な凝結遅延効果を有することを確認した。一方、強度発現性については、L-酒石酸ナトリウムを添加すると、20℃のみの常温養生条件では、無添加のものより圧縮強度は若干低下する傾向を示すが、80℃の高温養生履歴を有する場合には無添加のものと同等の圧縮強度が得られることを報告している。

表-2.2.5.1 使用材料

成分	記号	種類	物性
活性フィラー	AF	FA フライアッシュ	密度 2.26g/cm ³ , 比表面積 3550cm ² /g
		BFS 高炉スラグ微粉末	密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 4160cm ² /g
		WS 都市ごみ焼却灰溶融スラグ微粉末	密度 2.46g/cm ³ 比表面積 3810cm ² /g
GP溶液	GPW	WG 水ガラス1号	密度 1.53g/cm ³
		NaOH 水酸化ナトリウム	密度 2.13g/cm ³
		W 水	
細骨材	S	豊浦珪砂	密度 2.64g/cm ³
凝結遅延剤	LST	L-酒石酸ナトリウム	医薬品添加物規格 密度 1.78g/cm ³
	GNA	グルコン酸ナトリウム	試薬1級 密度 1.80g/cm ³

表-2.2.5.2 GPの配合表

(a) GPペーストの配合

No.	GPW/AF (wt%)	WG/NaOH (wt)	BFS (vol%)	単位体積質量(kg/m ³)		
				GPW(*)	FA	BFS
1	44.8	1.88	100	627(1)	0	1399
2	35.4	2.50	70	553(2)	390	1173
3	37.1	2.50	50	553(2)	651	838
4	39.2	2.50	30	553(2)	922	488
5	39.2	2.00	30	549(3)	915	484
6	40.3	1.21	30	565(4)	914	488

[注]*GP溶液組成の番号

(b) GPモルタルの配合

No.	GPW/AF (wt%)	WG/NaOH (wt)	BFS (vol%)	S/AF (wt)	単位体積質量(kg/m ³)			
					GPW(*)	FA	BFS	S
7	63.3	1.88	100	2.15	363(1)	0	605	1300
8	51.9	2.50	70	2.14	328(2)	158	474	1351
9	52.2	2.50	50	2.15	325(2)	272	351	1336
10	52.3	2.50	30	2.15	321(2)	395	218	1320
11	52.1	2.00	30	2.15	322(3)	398	220	1328
12	51.4	1.21	30	2.15	319(4)	400	221	1335

[注]*GP溶液組成の番号

(c) GPモルタルの配合

No.	GPW/AF (wt%)	WG/NaOH (wt)	S/AF (wt)	単位体積質量(kg/m ³)		
				GPW(*)	WS	S
13	50.2	2.50	2.15	310(2)	620	1335

[注]*GP溶液組成の番号

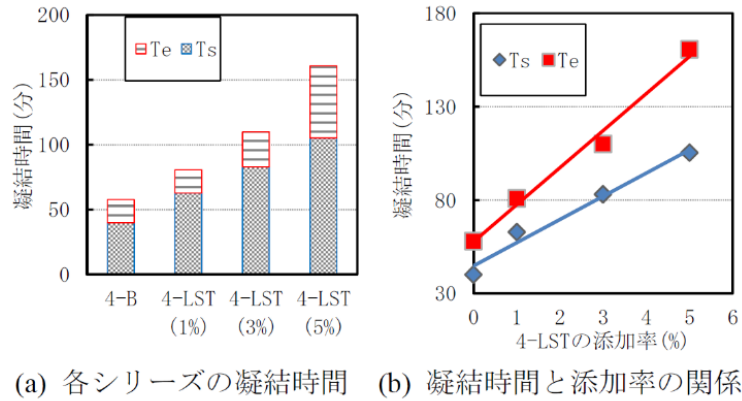


図-2.2.5.1 GPペーストの凝結時間に及ぼす遅延剤の添加率の影響

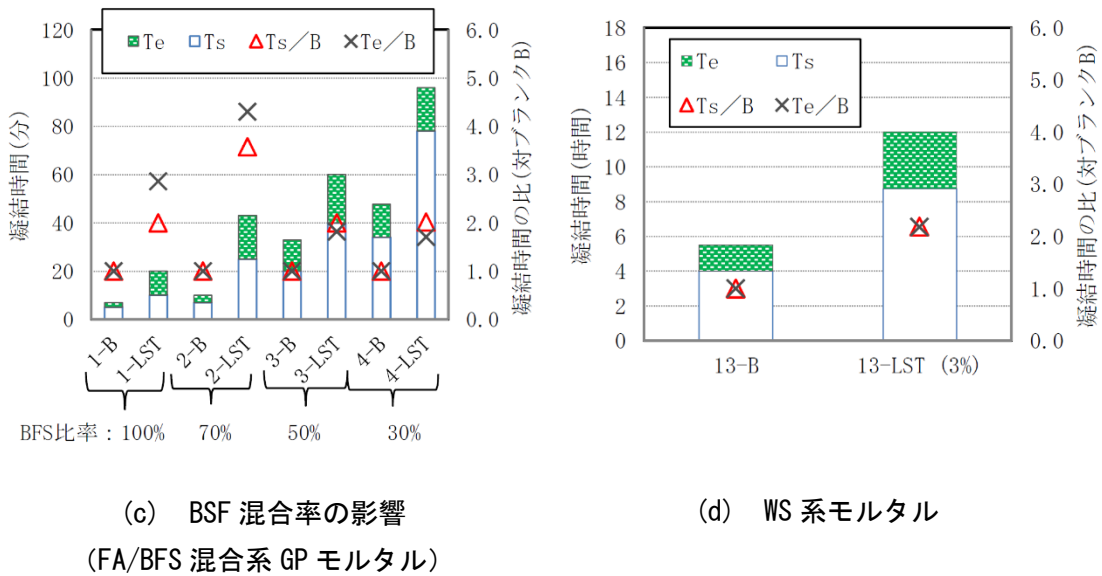
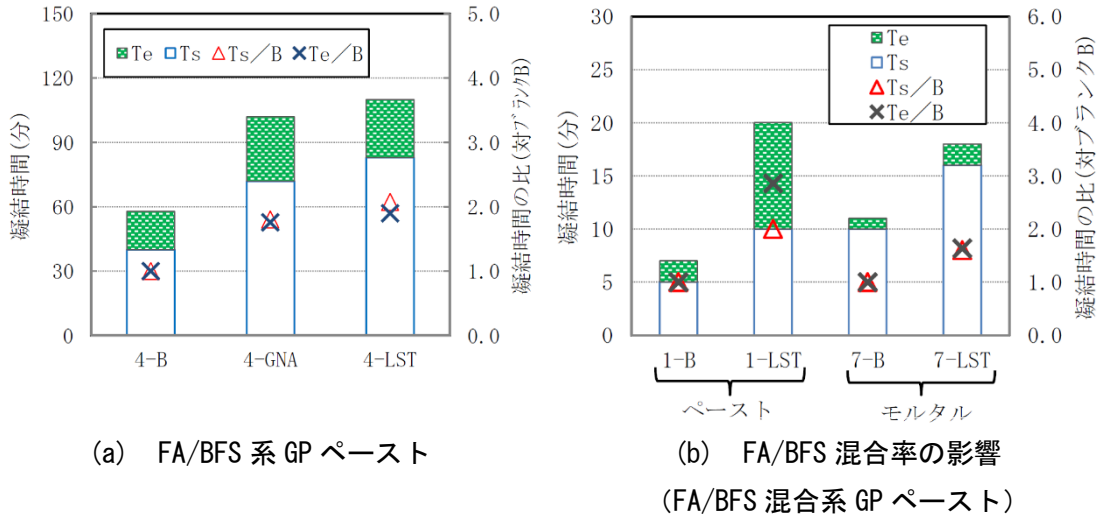


図-2.2.5.2 凝結時間に及ぼす各種条件の影響

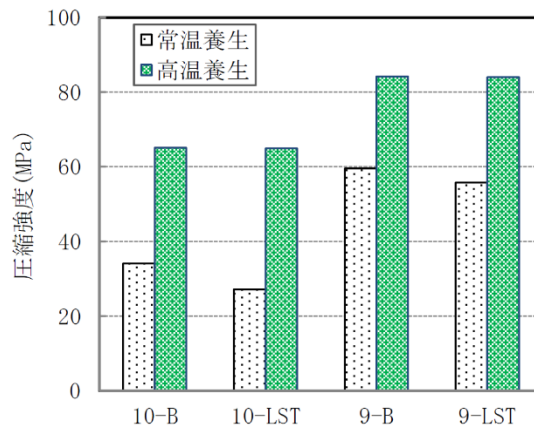


図-2.2.5.3 FA/BFS 混合系 GP モルタルの圧縮強度に及ぼす養生方法の影響

(2) 市川らの研究⁸⁾ 【ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現性に関する基礎的研究】

市川らは粉体として高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたジオポリマーの凝結特性に関する基礎的な研究を行った。フライアッシュの置換率、高炉スラグ微粉末の石膏添加の有無、水ガラスの種類（1～3号）、水酸化ナトリウム水溶液の添加などの凝結特性に与える影響を調べた。

表-2.2.5.3 に使用材料を、表-2.2.5.4 に調合表を示す。

その結果、表-2.2.5.5 および図-2.2.5.4～図-2.2.5.5 に示すように、水ガラスの種類については $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ モル比が大きくなるほど、高炉スラグ微粉末粉末に石膏が添加されると、そしてフライアッシュの高炉スラグ微粉末に対する置換率が大きくなるほど凝結時間は長くなる。水酸化ナトリウム水溶液を添加すると凝結時間は短くなる。そして、圧縮強度と凝結時間の間には、ほぼ反比例の関係があることを報告している。

表-2.2.5.3 使用材料

種類	材料名	略号	密度 (g/cm ³)	平均粒度 (μm)
粉体	高炉スラグ微粉末 (石膏添加有)	BS1	2.91	13.8
	高炉スラグ微粉末 (石膏添加無)	BS2		12.4
	フライアッシュ (JIS II 種)	FA	2.20	12.3
溶液	水ガラス1号希釈 (Na ₂ O/SiO ₂ モル比: 2)	WG1	1.29	-
	水ガラス2号原液 (Na ₂ O/SiO ₂ モル比: 2.5)	WG2	1.45	
	水ガラス3号原液 (Na ₂ O/SiO ₂ モル比: 3)	WG3	1.40	
	水酸化ナトリウム水溶液 (10mol/L)	NH	1.35	

表-2.2.5.4 調合表

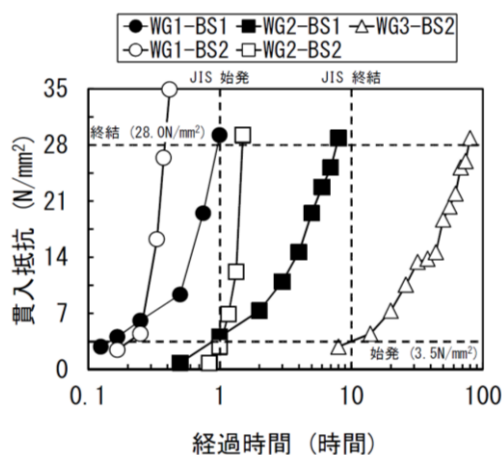
供試体の記号	溶液/粉体比	単位量 (g/L)															
		WG1	WG2	WG3	NH	BS1	BS2	FA									
WG1-BS1-FA0	0.6	742	0	0	0	1236	0	0									
WG1-BS2-FA0						0	1236										
WG2-BS1-FA0						792	0		0	0	1320	0					
WG2-BS2-FA0											0	1320					
WG2-BS1-FA50											738	0	0	0	615	0	615
WG2-BS2-FA50															0	615	
WG2-FA100		691	0	0	1152												
WG2+NH-BS1-FA0		521	0	0	261			1303							0	0	
WG2+NH-BS2-FA0						0	1303										
WG2+NH-BS1-FA50						486	0	0	243	607					0	607	
WG2+NH-BS2-FA50										0	607						
WG2+NH-FA100										455	228	0	1138				
WG3-BS1-FA0	0									777	0	0	1295	0	0		
WG3-BS2-FA0		0	1295														

表-2.2.5.5 プロクター貫入抵抗試験の結果

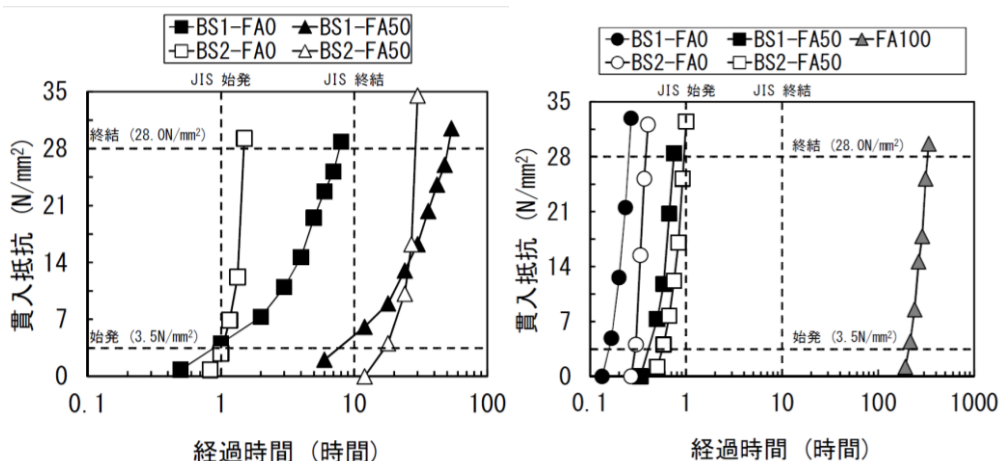
供試体の記号	プロクター貫入抵抗試験	
	始発時間	終結時間
WG1-BS1-FA0	9分	58分
WG1-BS2-FA0	13分	23分
WG2-BS1-FA0	55分	7時間50分
WG2-BS2-FA0	1時間2分	1時間30分
WG2-BS1-FA50	8時間10分	50時間40分
WG2-BS2-FA50	17時間10分	29時間
WG2-FA100	—*1	
WG2+NH-BS1-FA0	9分	15分
WG2+NH-BS2-FA0	18分	23分
WG2+NH-BS1-FA50	25分	45分
WG2+NH-BS2-FA50	34分	57分
WG2+NH-FA100	209時間(8日17時間)	327時間(13日15時間)
WG3-BS1-FA0	—*2	
WG3-BS2-FA0	10時間30分	78時間20分

【注】*1：凝結が見られなかったものを示す。

*2：流動性が低く、練混ぜが行えなかったものを示す。



(a) 水ガラスの種類による影響 (粉体 : FA0 シリーズ)



(b) FAの置換率による影響
(溶液 : WG2 シリーズ)

(c) FAの置換率による影響
(溶液 : WG2+NH シリーズ)

図-2.2.5.4 貫入抵抗値の時刻歴

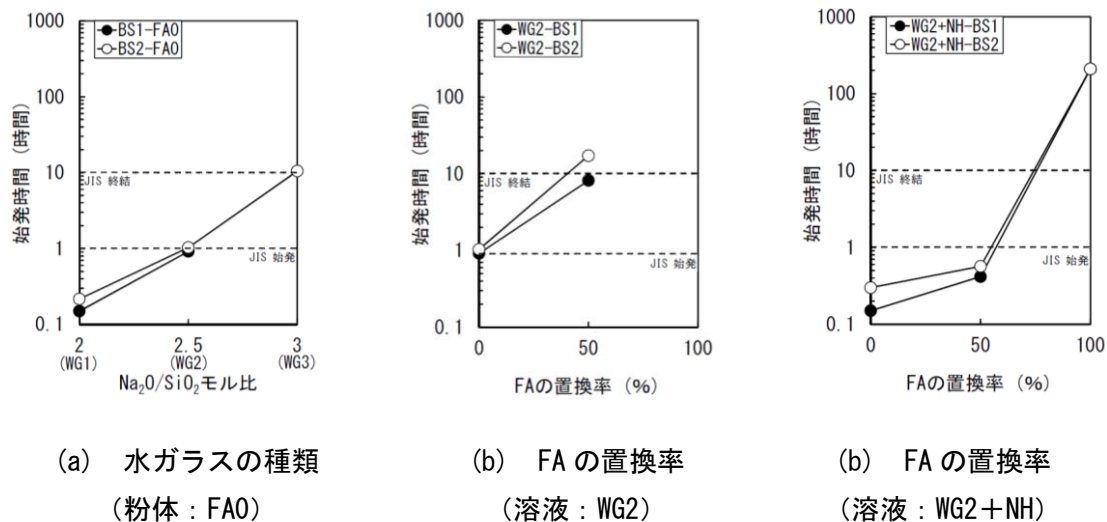


図-2.2.5.5 凝結の始発時間

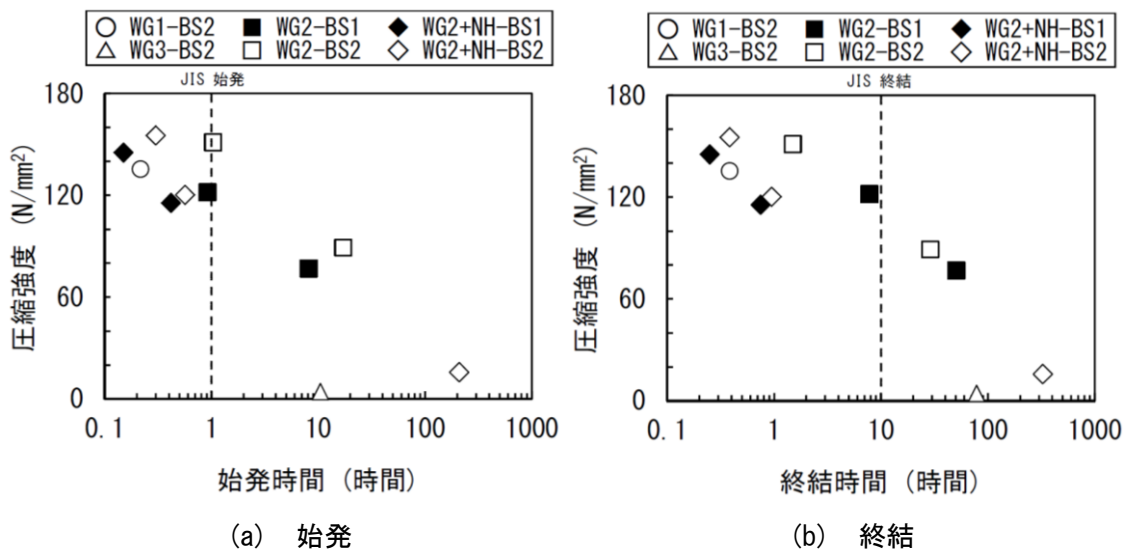


図-2.2.5.6 圧縮強度と凝結時間の関係

(3) 岡田らの研究¹⁰⁾ 【凝結遅延剤を添加したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察】

岡田らは、有機系凝結遅延剤の FA-BFS 系ジオポリマーコンクリート (GP-C) への適用性および遅延機構について検討を行なった。

表-2.2.5.6 に使用材料を、表-2.2.5.7 に調合表を示す。

その結果、図-2.2.5.7～図 2.2.5.11 に示すように、L-酒石酸ナトリウムを主成分とした遅延剤 (LST) は FA-BFS 系 GP-C の凝結時間を遅延させることを確認した。また、LST の添加によって、常温養生された FA-BFS 系 GP-C の力学性能は未添加に比べ、小さくなったが、高温養生の場合には低下しないことを報告した。

表-2.2.5.6 使用材料

成分	記号	種類	物性
活性ファイラー	AF	FA	フライアッシュ 密度 2.24g/cm ³ , 比表面積 3550cm ² /g
		BFS	高炉スラグ微粉末 密度 2.88g/cm ³ , 比表面積 4290cm ² /g
アルカリ溶液	GPW	JIS 1 号水ガラスと苛性ソーダの水溶液	密度 1.315g/cm ³
細骨材	S	三重県産川砂	表乾密度 2.60g/cm ³ 吸水率 1.46%
粗骨材	G	三重県産石灰碎石	表乾密度 2.70g/cm ³ 吸水率 0.40%
遅延剤	LST	主成分：L-酒石酸ナトリウム	食品添加物規格 密度 1.78g/cm ³

表-2.2.5.7 調合表

No	GPW/AF (wt%)	BFS/ AF (wt%)	LST/AF (%)	単位質量(kg/m ³)					
				GPW	FA	BFS	S	G	LST
1	50.0	30	5.0	210	294	126	715	1000	21
2				200	280	120	756	1000	20
3				185	259	111	818	1000	19
4	40.0	30	5.0	200	350	150	648	1000	25
5	50.0			0.0	200	280	120	756	1000

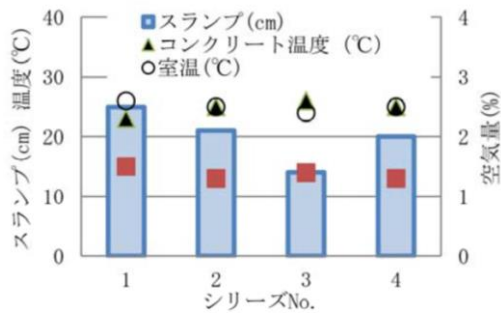


図-2.2.5.7 GP-Cのフレッシュ性状

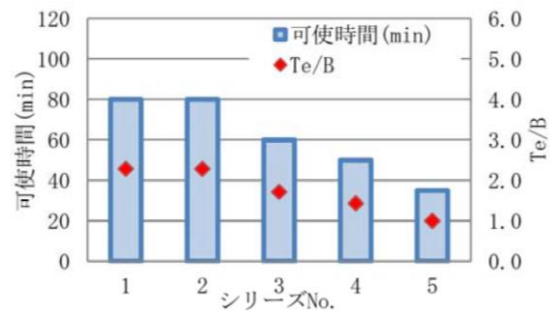


図-2.2.5.8 GP-Cの可使用時間

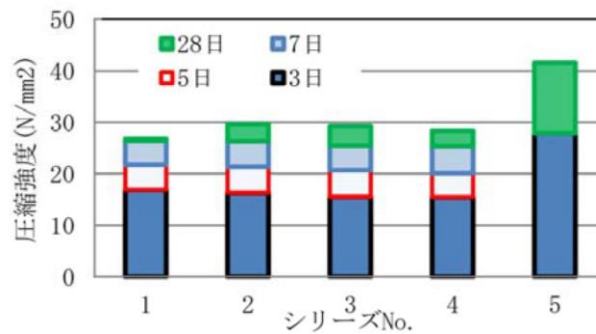


図-2.2.5.9 常温養生されたGP-Cの圧縮強度

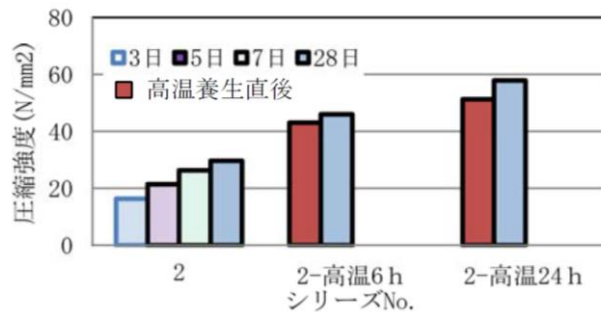


図-2.2.5.10 GP-Cの圧縮強度に及ぼす養生温度の影響

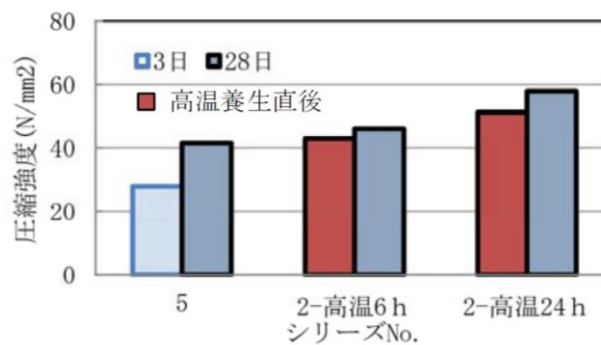


図-2.2.5.11 高温養生履歴があるGP-Cの圧縮強度に及ぼす遅延剤の添加の影響

2.2.6 耐久性

(1)原田らの研究¹¹⁾ 【ジオポリマーモルタルの耐久性に関する基礎的研究】

原田らは、ジオポリマーモルタルの耐久性試験を実施し、ジオポリマーの耐久性に関する基礎的な検討を行った。

表-2.2.6.1に使用材料を、表-2.2.6.2に活性フィラーの化学成分を、表-2.2.6.3にGPモルタルの配合表を、表-2.2.6.4にOPモルタルの配合表を示す。

また、表-2.2.6.5に試験項目および方法を示す。今回は、乾燥収縮ひずみ試験、中性化試験、アルカリ骨材反応試験、および硫酸浸漬試験についてまとめる。

その結果、図-2.2.6.1~2.2.6.6に示すように、フライアッシュを材料とするGPモルタルの乾燥収縮量は十分実現可能なレベルにあり、特にフライアッシュI種を材料とするGPモルタルの乾燥収縮ひずみは、OPモルタルに比べて約1/3と極めて小さい。また、GPモルタルはアルカリ骨材反応を発生せず、高い耐アルカリ骨材反応特性がある。さらに、GPモルタルはOPモルタルに比べ高い耐硫酸抵抗性を有しており、5%濃度の硫酸溶液に8週間浸漬した場合、OPモルタルの質量が60%近く減少したのに対して、OPモルタルは数%しか減少しなかった。

表-2.2.6.1 使用材料

分類	項目	材料
GP モルタル	GP 溶液	水ガラス+苛性ソーダ (密度:1.27g/cm ³)
	活性 フィラー	(a)フライアッシュ1種(密度:2.36g/cm ³ , 比表面積:5,327cm ² /g) (b)フライアッシュ2種(密度:2.30g/cm ³ , 比表面積:3,534cm ² /g) (c)高炉スラグ微粉末(密度:2.92g/cm ³ , 比表面積:4,009cm ² /g)
	細骨材	標準砂(密度:2.64g/cm ³)
OP モルタル	セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm ³)
	水	水道水(密度:1.00g/cm ³)
	細骨材	標準砂(密度:2.64g/cm ³)

表-2.2.6.2 活性フィラーの化学成分

種類	化学成分(%)			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
フライアッシュ1種	52.29	32.34	7.37	2.53
フライアッシュ2種	53.18	27.45	5.26	6.59
高炉スラグ微粉末	31.11	16.84	0.31	41.44

表-2.2.6.3 GPモルタルの配合表(kg/m³)

記号	種類	GP 溶液	フライアッシュ	高炉 スラグ	細骨材
GP1	フライアッシュ 1種	244.2	480.3	66.0	1,535.4
GP2	フライアッシュ 2種	244.2	468.1	66.0	1,535.4

表-2.2.6.4 OPモルタルの配合表(kg/m³)

記号	水	セメント	細骨材
OP	255.9	511.8	1535.4

表-2.2.6.5 試験項目および方法

No.	試験項目	試験方法	試験開始材齢		試験環境	
			GP モルタル	OP モルタル	温度	湿度
1	フロー試験	JIS R 5201 に準拠	-	-	20℃	-
2	単位容積質量試験	乾燥収縮試験用供試体の質量を測定	-	-	-	-
3	強さ試験	JIS R 5201 に準拠	-	-	-	-
4	乾燥収縮試験	JIS A 1129-1 付属書 A (参考) に準拠	1日	7日	20℃	60%RH
5	中性化試験	CO ₂ 濃度：5%，フェノールフタレインで測定	1日	14日	20℃	60%RH
6	アルカリ骨材反応試験	JIS A 1129-3 に準拠して長さを測定	1日	1日	60℃	90%RH
7	硫酸浸漬試験	硫酸濃度：5%，質量と外径を測定	1日	7日	20℃	-

図-2.2.6.1 収縮ひずみと材齢の関係

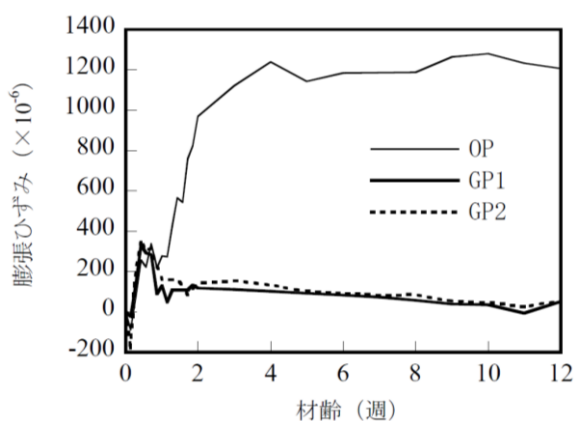
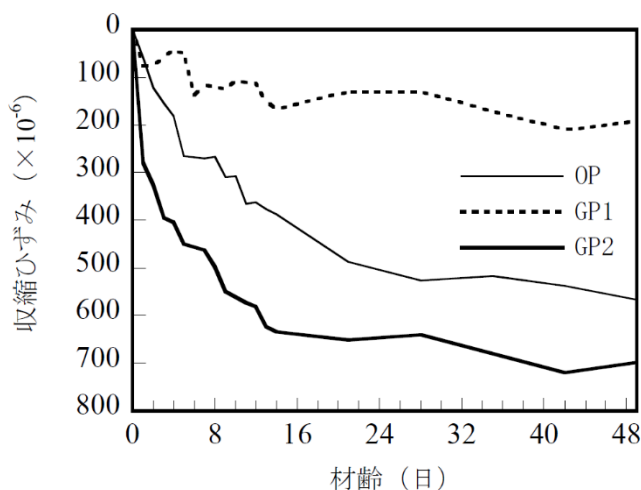


図-2.2.6.2 反応性骨材を使用した供試体のひずみと材齢の関係

図-2.2.6.3 表面ひび割れの発生状況の比較 (上から OP, GP1, GP2)

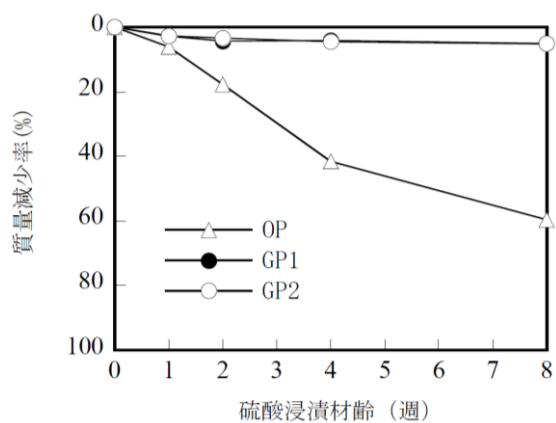


図-2.2.6.4 硫酸浸漬試験の結果
(質量減少率)

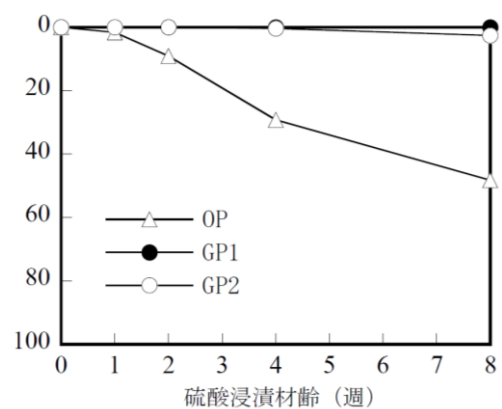


図-2.2.6.5 硫酸浸漬試験の結果
(断面欠損率)

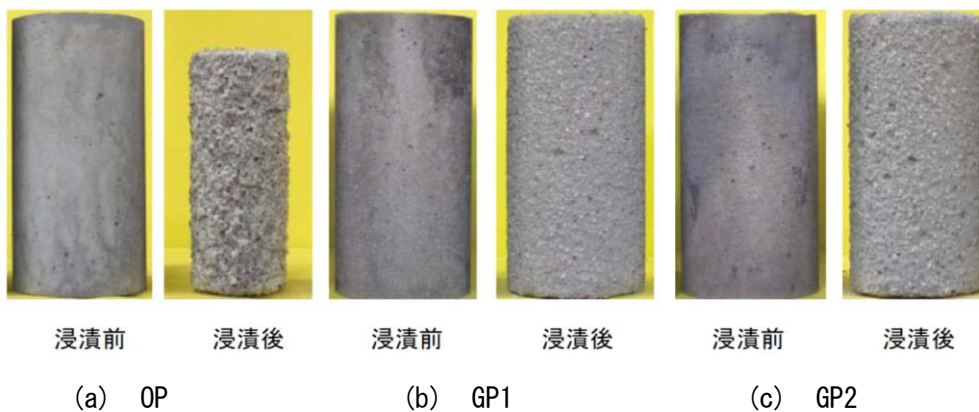


図-2.2.6.6 硫酸浸漬前後の外観の比較 (浸漬材齢 8 週)

(2) 合田らの研究¹²⁾ 【フライアッシュⅡ種を用いたジオポリマーの材料特性】

合田らは、フライアッシュ系ジオポリマーを対象として、汎用性の高いフライアッシュⅡ種を使用した場合における材料特性について、圧縮強度および曲げ強度試験を実施し、化学的浸食に対する抵抗性について浸漬試験を実施した。今回は、浸漬試験を取り上げ、ジオポリマーの耐硫酸抵抗性についてまとめる。

表-2.2.6.6 に使用材料を、表-2.2.6.7 にフィラーの主な化学成分を、表-2.2.6.8 に短繊維無混和の場合の配合を示す。

図-2.2.6.7 に浸漬開始時に対する質量の相変化を示す。この結果、酸性環境と硫酸塩に対するジオポリマーの抵抗性の相違を示し、シリカフェームを混和することでジオポリマーの耐硫酸抵抗性が向上する傾向が見られることを確認した。

表-2.2.6.6 使用材料

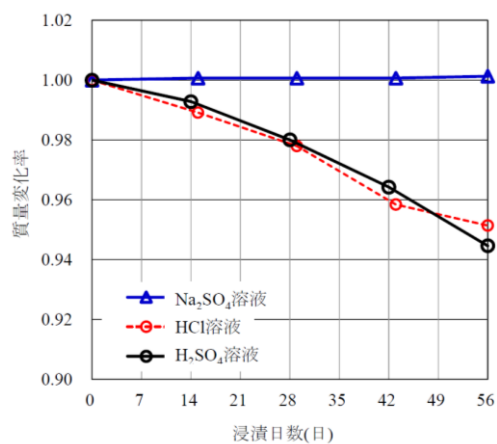
記号	品名	密度	比表面積
		g/cm ³	cm ² /g
GP 溶液	ジオポリマー溶液	1.27	-
FA-A	フライアッシュⅡ種(A産)	2.28	3680
FA-B	フライアッシュⅡ種(B産)	2.37	4090
FA-C	フライアッシュⅡ種(C産)	2.32	3620
BFS	高炉スラグ微粉末	2.92	4230
SF	シリカフェーム	2.22	-
S	山砂砕砂	2.59	-
VF	ビニロン短繊維	2.30	-

表-2.2.6.7 フィラーの主な化学成分 (%)

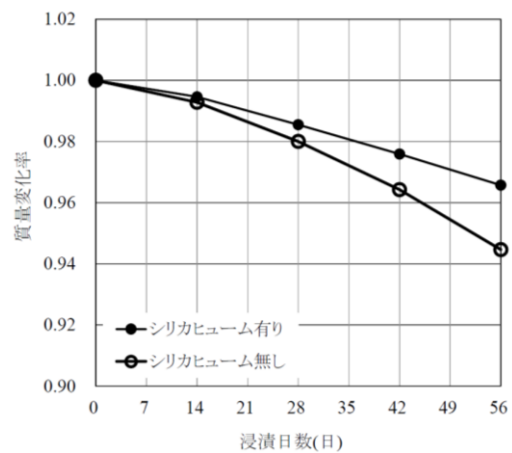
記号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Ig.loss
FA-A	58.9	24.9	2.5	2.1
FA-B	60.3	24.8	4.4	0.9
FA-C	58.2	31.0	2.4	2.0
BFS	33.2	13.6	44.9	0.2
SF	97.4	0.4	0.3	0.4

表-2.2.6.8 配合 (短繊維無混和の場合)

記号 Type	W/P	GP 溶液	BFS	FA-A	FA-B	FA-C	SF	S
	%	kg/m ³						
A	56	294	53	475	0	0	0	1353
B	56	294	53	0	475	0	0	1374
C	56	294	53	0	0	475	0	1362
C-SF	56	294	53	0	0	452	23	1362



(a) 浸漬溶液の比較



(b) シリカヒューム有無の比較

図-2.2.6.7 浸漬開始時に対する質量の経時変化

2.3 微粒子粉体

2.3.1 本研究における微粒子粉体の定義

本研究で用いる微粒子粉体は、平均粒径が $10\mu\text{m}$ であるセメントより細かい粉体のことと定義する。

表-2.3.1.1 に本研究で用いる微粒子粉体および関連する粉体の品質規定として、(a) にフライアッシュ¹³⁾を、(b) に高炉スラグ微粉末を、(c) にシリカフェームを、そして(d) に比較として普通ポルトランドセメント¹⁴⁾を示す。また、表-2.3.1.2 に本研究で用いる微粒子粉体および関連する粉体の比表面積、密度、平均粒径を示す。なお、表中の平均粒径は JIS 規定の密度および比表面積を参考に、すべて球体として概算した値である。

高炉スラグ微粉末（以下、BS）の 4000 が同程度の平均粒径であり、BS6000、および 8000 はより細かく微粒子粉体である。また、フライアッシュは JIS A 6201 「コンクリート用フライアッシュ」では JIS I 種が 5000 以上とより細かい粉体である。また、シリカフェームはおよそ 20000 ブレーンであり最も平均粒径が小さい粉体である。

表-2.3.1.1 粉体の品質規定

(a) フライアッシュの規定¹³⁾

項目	種類	フライアッシュⅠ種	フライアッシュⅡ種	フライアッシュⅢ種	フライアッシュⅣ種
二酸化けい素	%	45.0以上			
湿分	%	1.0以下			
強熱減量 ⁽¹⁾	%	3.0以下	5.0以下	8.0以下	5.0以下
密度	g/cm^3	1.95以上			
粉末度 ⁽²⁾	45 μm ふるい残分 (網ふるい方法) ⁽³⁾ %	10以下	40以下	40以下	70以下
	比表面積 (ブレン方法) cm^2/g	5000以上	2500以上	2500以上	1500以上
フロー値比	%	105以上	95以上	85以上	75以上
活性度指数 %	材齢28日	90以上	80以上	80以上	60以上
	材齢91日	100以上	90以上	90以上	70以上

注 (1) 強熱減量に代えて、未燃炭素含有率の測定をJISM8819又はJISR1603に規定する方法で行い、その結果に対し強熱減量の規定値を適用してもよい。

(2) 粉末度は、網ふるい方法又はブレン方法による。

(3) 粉末度を網ふるい方法による場合は、ブレン方法による比表面積の試験結果を参考値として併記する。

(b) 高炉スラグ微粉末の規定

	高炉スラグ微粉末 3000	高炉スラグ 微粉末 4000	高炉スラグ微粉末 6000	高炉スラグ微粉末 8000
密度 (g/cm ³)	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上	2.80 以上
比表面積 (cm ² /g)	2750 以上 ~3500 未満	3500 以上 ~5000 未満	5000 以上 ~7000 未満	7000 以上 ~10000 未満
活性度指数 (材齢 7 日)	-	55 [%] 以上	75 [%] 以上	95 [%] 以上
活性度指数 (材齢 28 日)	60 [%] 以上	75 [%] 以上	95 [%] 以上	105 [%] 以上
活性度指数 (材齢 91 日)	80 [%] 以上	95 [%] 以上	-	-
フロー値比	95 [%] 以上	95 [%] 以上	90 [%] 以上	85 [%] 以上
酸化マグネシウム	10.0 [%] 以下	10.0 [%] 以下	10.0 [%] 以下	10.0 [%] 以下
三酸化硫黄	4.0 [%] 以下	4.0 [%] 以下	4.0 [%] 以下	4.0 [%] 以下
強熱減量	3.0 [%] 以下	3.0 [%] 以下	3.0 [%] 以下	3.0 [%] 以下
塩化物イオン	0.02 [%] 以下	0.02 [%] 以下	0.02 [%] 以下	0.02 [%] 以下

(c) シリカフェームの JIS 規定

	シリカフェーム
密度 (g/cm ³)	-
比表面積 (m ² /g)	15 以上
活性度指数 (材齢 7 日)	95 [%] 以上
活性度指数 (材齢 28 日)	105 [%] 以上
活性度指数 (材齢 91 日)	-
フロー値比	85 [%] 以上
酸化マグネシウム	5.0 [%] 以下
三酸化硫黄	3.0 [%] 以下
強熱減量	4.0 [%] 以下
塩化物イオン	0.30 [%] 以下

(d) ポルトランドセメントの規定

項目 種類	区分	強熱減量	酸化マグネシウム	三酸化硫黄	塩化物イオン	全アルカリ	けい酸 三カルシウム	けい酸 ニカルシウム	アルミン酸 三カルシウム	鉄アルミン酸 四カルシウム
		ig.loss %	MgO %	SO ₃ %	Cl ⁻ %	Na ₂ Oeq %	C ₃ S %	C ₂ S %	C ₃ A %	C ₄ AF %
普通ポルトランド セメント	JIS規格値	≦5.0	≦5.0	≦3.5	≦0.035	≦0.75	-	-	-	-
	当社品質例	2.26	1.41	2.10	0.015	0.50	56	18	9	9

項目 種類	区分	密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g	凝結			安定性	圧縮強さ N/mm ²			水和熱 J/g	
				水量 %	始発 h-min	終結 h-min		3d	7d	28d	7d	28d
普通ポルトランド セメント	JIS規格値	-	≧2500	-	≧60min	≦10h	良	≧12.5	≧22.5	≧42.5	-	-
	当社品質例	3.16	3340	27.4	2-15	3-20	良	30.3	45.1	61.6	332	384

※JIS規格値はJIS R 5210:2009による

※太平洋セメントの品質例を参考

表-2.3.1.2 粉体の比表面積，密度，平均粒径

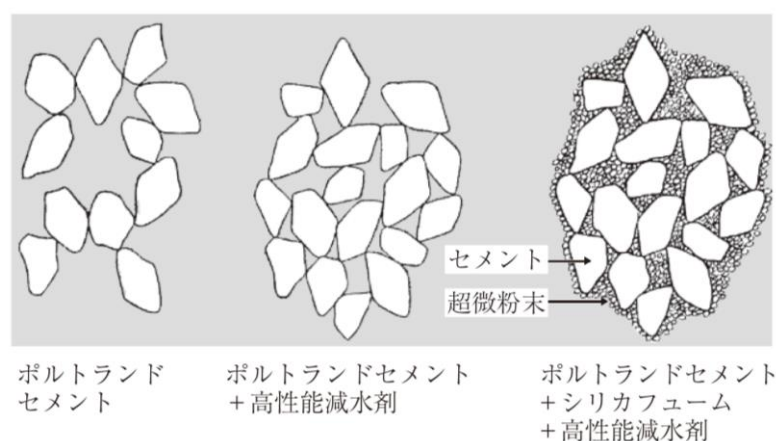
番号	JIS R 5210	JIS A 6210			JIS A 6206			JIS A 6207
	普通 ポルトランド セメント	フライアッシュ			高炉スラグ微粉末			シリカ フェーム
I種		II・III種	IV種	4000	6000	8000		
比表面積 (cm^2/g)	2500 以上	5000 以上	2500 以上	1500 以上	3500 以上 ～ 5000 未満	5000 以上 ～ 7000 未満	7000 以上 ～ 10000 未満	150000 以上
密度 (g/cm^3)	3.16	1.95	1.95	1.95	2.8	2.8	2.8	2.2
粒径 (μm)	7.6	6.2	12.3	20.5	5.4	3.6	2.7	0.2

2.3.2 シリカフェーム

(1) シリカフェームとは^{15)~17)}

シリカフェームは、金属シリコンおよびフェロシリコンをアーク式電気炉で製造する際に発生する排ガス中のダストを集塵したものであり、非晶質の SiO_2 を主成分とし、世界各国でコンクリート用混和剤として利用されている。金属シリコン、フェロシリコンの精錬には膨大な電力が必要であり、日本の電力料金は高いため、現在は製造していない。

シリカフェームはポゾラン反応性を有しており、マイクロファイラー効果による流動性の改善や、超高強度コンクリートに多く用いられる。シリカフェームをコンクリートに混和すると粘性が増加するため、高性能 AE 減水剤等の使用が不可欠である。しかし、シリカフェームの種類と置換率を適正に選定すれば、マイクロファイラー効果によってスランプが増大すると共に塑性粘度が低下する。結果として、ポンプ圧送性や充填性等の施工性が向上する。図-2.3.2 にボールベアリングの作用による高密度充填性のイメージ図を示す。

図-2.3.2 固化前のコンクリート中のペースト構造¹⁸⁾

(2) ジオポリマーにおけるシリカフェームの活用

GPにSFを用いた既往の研究^{19)~28)}では、SFを添加したGPの製造は、水ガラスの代わりにSFを加える「ケイ素粉体添加その場溶解法」が多く用いられている。SF添加には、BSを多用して、通常は凝結が早くなる条件においても、可使時間の延長効果により練混ぜが可能となることや²⁰⁾²¹⁾、硫酸塩に対する抵抗性が高く、硫酸イオンの浸入遅延作用が期待できる¹⁹⁾といった特徴がある。しかし、この用途ではSF置換率は約2~10%のものであり、主要な粉体として用いている研究はほとんど見られない。

2.3.3 高炉スラグ微粉末

高炉スラグ微粉末は、高炉（溶鋳炉）にて銑鉄を製造する際に副産する高炉スラグを水冷し微粉砕したものである。高炉スラグ微粉末の反応は潜在水硬性であり、自己触発的に水和反応を開始せず、アルカリや硫酸塩などの刺激作用で硬化すると言われている。

近年のジオポリマー研究では、フライアッシュのみを粉体とするジオポリマーは凝結時間が遅く初期強度発現性に劣り、実用的な強度発現性とするには加温養生が必要とされている。したがって、常温で用いる場合は圧縮強度が高く、凝結時間が短くなる高炉スラグ微粉末との併用した検討例が多い。

しかし、ジオポリマーに用いる高炉スラグ微粉末のほとんどは4000ブレーンのものばかりで、6000および8000ブレーンを用いた例は少ない。そこで本節では、6000および8000ブレーンを粉体に活用したジオポリマーの研究をまとめる。

北田らの研究²⁹⁾ 【コンクリートのジオポリマー系ひび割れ補修材に関する研究】

北田らは、粉体にフライアッシュ JIS 1種、および高炉スラグ微粉末 6000, 8000級を用い、ジオポリマー系ひび割れ補修材の開発を目指して、遅延剤を添加した FA-BFS 系 GP スラリーの性能を考察した。また、水ガラスの代わりにケイ酸質系塗布剤を用いた新規のアルカリ溶液を使って BFS 系 GP スラリーを試作し、各種性能を調べた。

表-2.3.3.1 に GPS に使用した材料を、表-2.3.3.2 に活性フィラーの化学成分を、表-2.3.3.3 に調合表を示す。

図-2.3.3.1～図-2.3.3.8, 写真-2.3.3 に示すように、粘度が 3000mPa・s 以下、可使時間が 60 分以上、圧縮強度が 36MPa 以上、硬化収縮が 1%以下、接着強さが 4.0MPa 以上の性能を持つジオポリマーの製作を可能にした。

表-2.3.3.1 GPS に使用した材料

材料	主要性質
アルカリ溶液(AS)	水ガラス水溶液(WG), 比重: 1.27g/cm ³ , Na ₂ O・2SiO ₂ の濃度: 24%
	苛性ソーダ水溶液(NH), 質量濃度: 32%, モル濃度: 10M, 比重: 1.33 g/cm ³
	ケイ酸質系塗布剤水溶液(S), 比重: 1.05g/cm ³ , pH: 11.3
活性フィラー(AF)	フライアッシュ JIS I種(FA), 密度: 2.36g/cm ³ , 比表面積: 5327cm ² /g
	高炉スラグ微粉末(BFS) JIS 8000級, 密度: 2.9g/cm ³ , 比表面積: 8500cm ² /g
	BFS JIS6000級, 密度: 2.9g/cm ³ , 比表面積: 6000cm ² /g
混和剤	遅延剤(主成分: L-酒石酸ナトリウム)
	収縮低減剤(エーテル系有機化合物)

表-2.3.3.2 活性フィラーの化学成分

種類	化学成分(%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
FA JIS I種	59.14	23.91	7.37	3.84	23.91	1.06	1.27	1.07	1.68	0.45
BFS JIS8000級	34.5	15.3	0.3	42.5	15.3	5.8	0.6	0.2	0.3	0.6
BFS JIS 6000級	34.3	14.4	0.3	43.5	14.4	5.9	0.6	0.3	0.2	0.6

表-2.3.3.3 調合表

(a) GPS (Cタイプ)						(b) GPS (Wタイプ)						(c) GPS (Sタイプ)										
記号	活性フィラー (AF)構成(質量比)		アルカリ溶液の構成(容積比)		液固比 (%)	記号	活性フィラー (AF)の構成 (質量比)			アルカリ溶液の構成 (容積比)		混和剤 (AF ×%)		液固比 (%)	記号	活性フィラー (AF)の構成 (質量比)		アルカリ溶液の構成(容積比)		混和剤 (AF ×%)		液固比 (%)
	BFS8	FA	NH	WG			BFS8	BFS6	FA	NH	WG	R	SR			BFS8	BFS6	NH	S	R	SR	
C1	1.0		1.0	-	0.75	W1	0.4	-	0.6	1	2			0.75	S1	1	-	1	2	-	-	0.70
C2	0.4	0.6	1.0	-	0.75	W1R	0.4	-	0.6	1	2	5		0.75	S1SR	1	-	1	2	5	3	0.70
C3	1.0			1.0	0.75	W1RSR	0.4	-	0.6	1	2	5	3	0.75	S2	-	1	1	2	5	-	0.70
C4	0.4	0.6		1.0	0.75	W2	-	0.4	0.6	1	2			0.75	S2SR	-	1	1	2	-	3	0.70
C5	1.0		1.0	2.0	0.75	W2R	-	0.4	0.6	1	2	5		0.75								
						W2RSR	-	0.4	0.6	1	2	5	3	0.75								

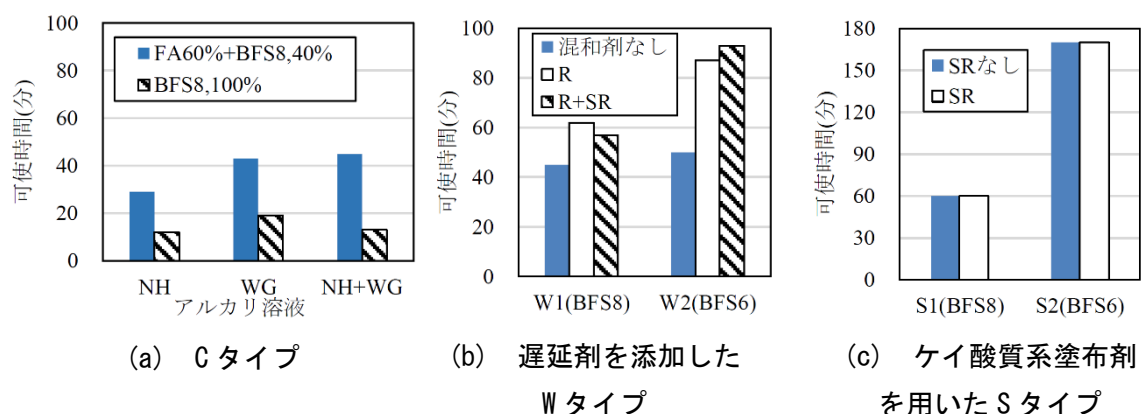


図-2.3.3.1 GP スラリーの可使用時間

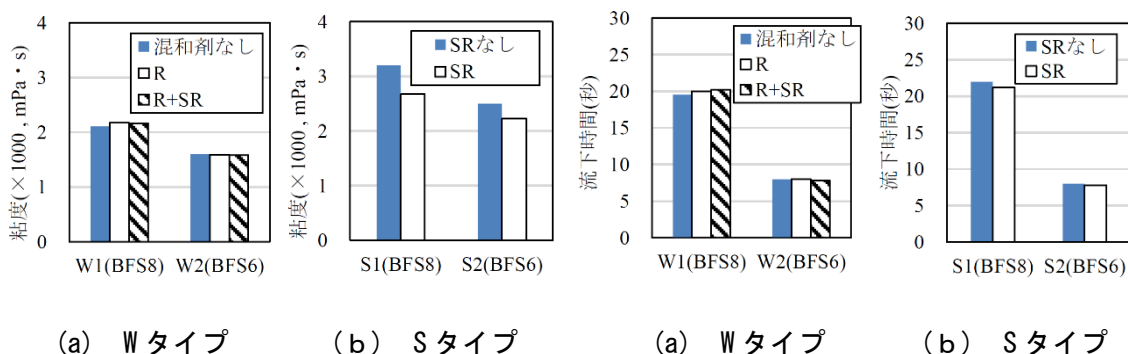


図-2.3.3.2 GPS の粘度に及ぼす混和剤と BFS 種類の影響

図-2.3.3.3 GPS の流下時間に及ぼす混和剤と BFS 種類の影響

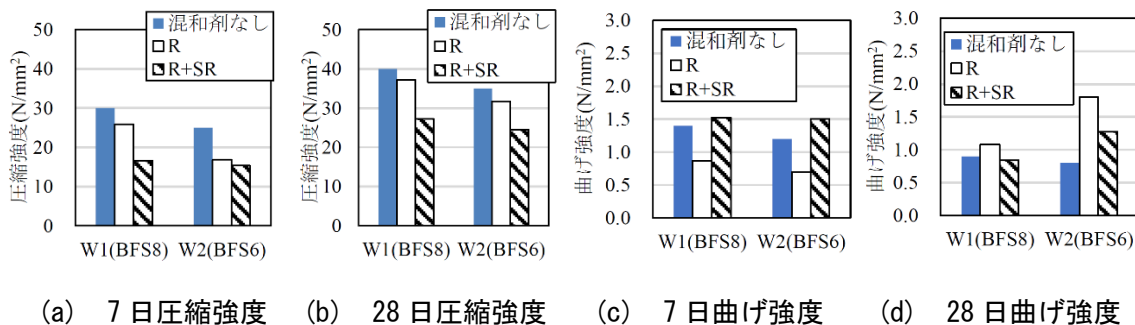


図-2.3.3.4 WタイプのGPS硬化後の強さ

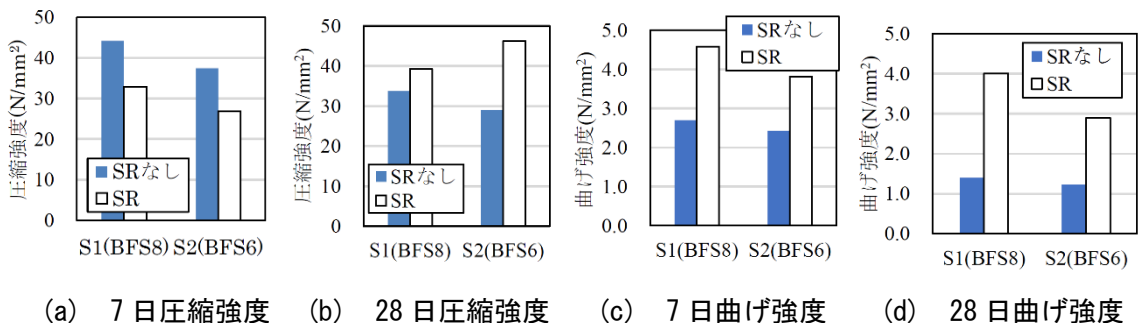


図-2.3.3.5 SタイプのGPS硬化後の強さ

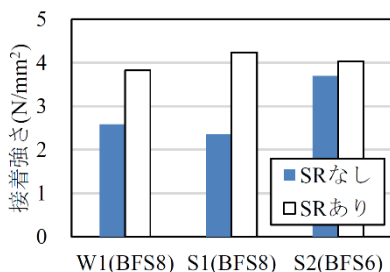


図-2.3.3.6 GPSの接着強さ

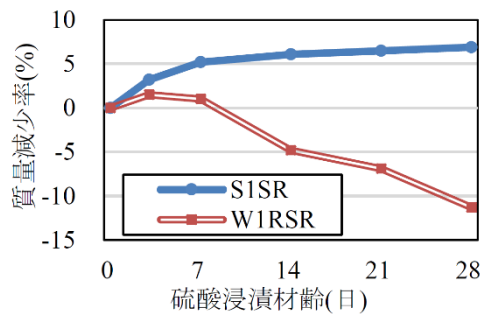


図-2.3.3.7 GPSの硫酸浸漬後の質量変化

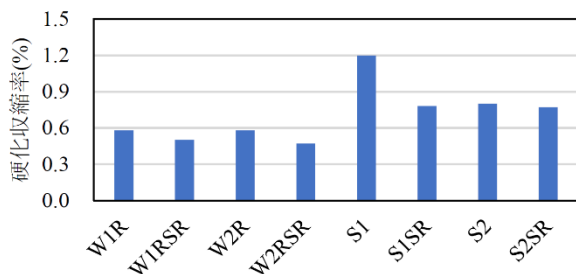


図-2.3.3.8 GPSの硬化収縮率

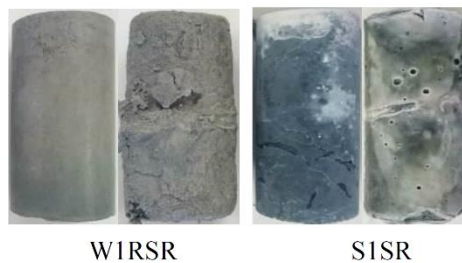


写真-2.3.3 GPS硬化体の硫酸浸漬後の劣化状況

(浸漬前：左，28日間浸漬後：右)

2.4 ひび割れ補修材

2.4.1 ひび割れ補修について

ひび割れ補修は、防水性および耐久性を向上させる目的で行われる。その種類には、ひび割れ被覆工法、注入工法、充填工法、その他工法などがある。これらの工法は、ひび割れ発生原因、発生状況、ひび割れ幅の大小、ひび割れの変動の大小、鉄筋の腐食の有無などによって、単独あるいは組み合わせで使い分ける必要がある。

本研究では、ひび割れ注入工法に着目する。ひび割れ注入は、防水性および耐久性を向上させる目的のほか使用材料によっては、躯体の一体化を図ることも可能で、適用可能なひび割れ幅は0.2~1.0mmである。従来はグリースポンプによって行われていたが、現在ではゴムの復元力やスプリング等を使用した専用の治具が開発され、注入圧力0.4MPa以下の低圧力で、かつ低速で注入する工法が主体となっている³⁰⁾。

ひび割れ注入工法の特徴について以下にまとめる。

- ①注入材料の量の管理が出来る。
- ②注入精度が作業員の熟練度に左右されない
- ③ひび割れ深部のひび割れ幅が0.05mmと狭い場合でも、確実に注入することができる。

2.4.2 有機系補修材料

有機系材料は、高分子材料であり合成樹脂、合成繊維、合成ゴムなどを言う。補修材には、合成樹脂が用いられる。合成樹脂は、熱可塑性樹脂と熱硬化性の2種類に分けられる。熱可塑性樹脂は三次元構造を持たず、加熱する柔らかくなり、冷やすと固まる性質がある。熱硬化性樹脂は、2成分以上の薬液を混ぜ合わせると化学反応して三次元構造に固まり、熱可塑性樹脂とは異なり加熱（140～150℃程度）しても溶けず、安定した性能を有する³¹⁾。

以下に有機系補修材料の特徴をまとめる。

- ・品質が JIS 「建築補修用注入エポキシ樹脂」に規定されている
- ・コンクリートや鋼材などに対する接着強度が高い
- ・無機系とほぼ同じ圧縮強度、曲げ強度で、引張強度コンクリートの10～20倍を有し、韌性に優れている。
- ・施工性が良い
- ・耐酸性に優れる
- ・可燃物である
- ・紫外線によって劣化する
- ・熱膨張係数が大きい
- ・電気抵抗性が大きく導電性がない
- ・弾性係数が小さい
- ・低温下では粘度が高くなり注入しにくくなり、硬化時間が遅くなる

2.4.3 無機系補修材

無機系補修材はポリマーの入っていないセメント系材料とポリマーセメント系材料に分けられる。接着力による躯体の一体性の回復が必要な場合には、主にポリマーセメント系が使用される。また微細なひび割れ（ひび割れ幅 0.2mm 程度）に注入するために。セメント粒子の直径が 10μm 以下の超微粒セメントが用いられる。

以下に無機系補修材料の特徴をまとめる³⁰⁾³¹⁾。

- ・有機系補修材料に比べて安価である。
- ・熱膨張率がコンクリートに近い
- ・湿潤箇所に適用できる（乾燥箇所にはドライアウトする可能性がある）
- ・ドライアウトを防ぐには水を注入して水通しを行い、ひび割れ内部を十分に湿らせる必要がある（内部の状態を判断するのが難しいため、必ず水通しを行う）
- ・鉄筋に対する防錆効果がある
- ・低温化では硬化が遅くなり、接着強度の発現が遅くなる

2.4.4 ひび割れ注入実験

(1) 萩村らの研究³²⁾ 【無機系ひび割れ注入材の基本物性とひび割れ注入効果の検証】

萩村らは無機系補修材を安価で簡易的に注入し、初期の段階に発生したひび割れを補修することを想定し、ひび割れ注入材の物性を注入試験で確認し、注入後の注入効果を検証するために耐久性試験を行い、簡易的な補修が耐久性に与える影響についての検討を行った。

注入材料は、無機系の超微粒子スラグセメントを用いた。このセメントに水と増粘剤を混ぜ合わせたひび割れ注入材をコーキングガンにて注入を行った。また作製した試験体を塩分濃度3.0%の塩水に1週間浸漬させる耐久性試験（塩水浸漬試験）を行った。

図-2.4.4.1～図-2.4.4.3に試験体の概要図を示す。

図-2.4.4.4に注入試験の、図-2.4.4.5および図-2.4.4.6に耐久性試験の結果を示す。これらから、コーキングガン注入で0.1～1.0mm ひび割れに対して10mm程度の注入が可能であった。また0.1～0.3mmのひび割れに対して、遮塩効果の確認ができ、0.5～1.0mmのひび割れに対しては塩水の浸入があったが、補修効果が認められた。

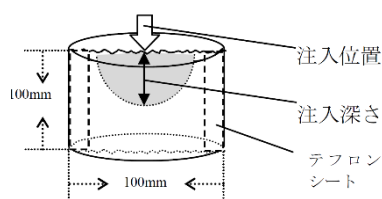


図-2.4.4.1 注入試験および測定位置

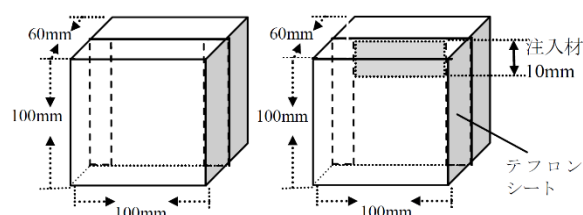


図-2.4.4.2 耐久性試験の試験体ひび割れ

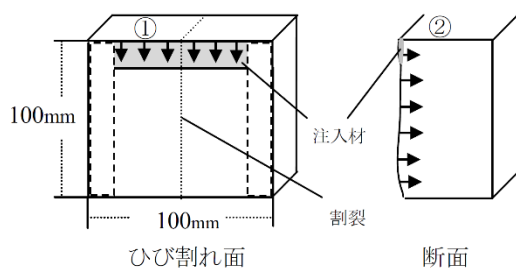


図-2.4.4.3 塩分浸透深さ計測位置

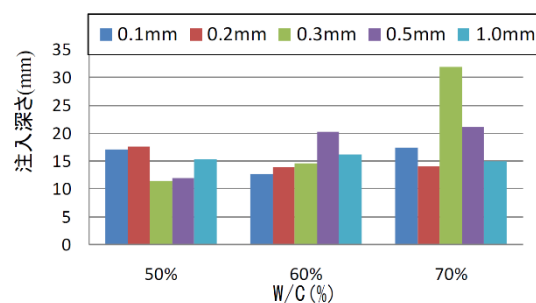


図-2.4.4.4 注入試験

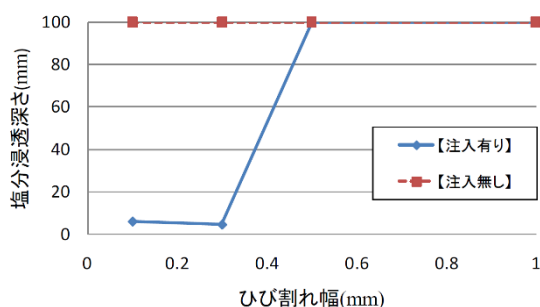


図-2.4.4.5 ①ひび割れ面
塩分浸透深さ

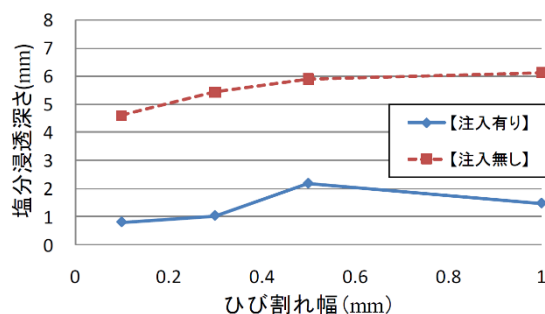


図-2.4.4.6 ②ひび割れ②断面
塩分浸透深さ

(2) 佐藤らの研究³³⁾ 【簡易的なひび割れ注入工法に用いる各種注入材料の補修効果の検討】

佐藤らは、無機系補修材の注入性能を調べるため、アクリル板に簡易的に注入を行い、注入材の注入深さに及ぼす影響について検討した。注入材はポルトランドセメント [N]，高炉セメント B 種 [BB]，超微粒子セメント [HS] の3種類を用い、中性化抵抗性改善のためのポリマーを加えたことによる注入性に与える影響を確認した。ポリマーは一般的に使用されているポリアクリル酸エステル [PAE]，酢酸ビニルエチル [EVA]，スチレンブタジエンゴム [SBR] の3種類のポリマーが注入材の流動性および充填性に与える影響について検討した。

表-2.4.4.1 に使用材料を，図-2.4.4.7 にアクリル板注入試験概要を示す。

表-2.4.4.2 にアクリル板注入試験結果を，図-2.4.4.9 に各種注入材における注入深さを示す。

注入材の深さには，セメントの粒径が細かいこと，もしくは粒径分布範囲が小さいことが関係していると考えられる。また，表層のみを充填したい場合など，増粘剤により幅広い性状のコントロールが可能であるという考察がなされている。

表-2.4.4.1 使用材料

セメント	N	BB	HS
密度 (g/cm ³)	3.16	3.01	2.92
比表面積 (cm ² /g)	3300	3760	8000
ポリマー	PAE	EVA	SBR
密度 (g/cm ³)	1.02	1.04	1.01
粘度 (mPa·s)	200	1000	50
ph	8.5	6	7
固形分	45%	45%	28%

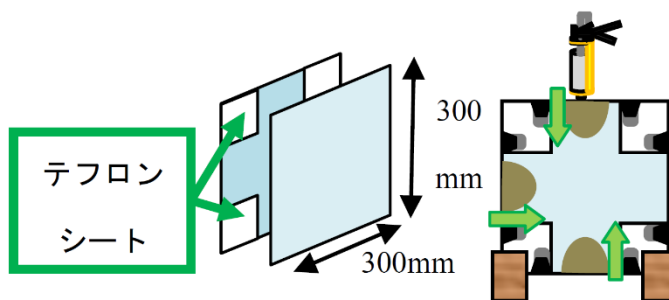


図-2.4.4.7 アクリル板注入試験概要

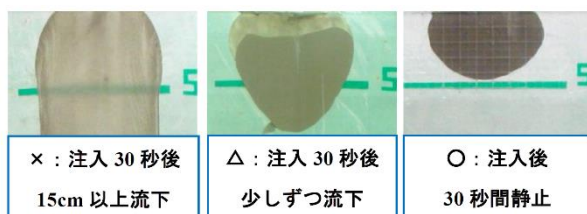
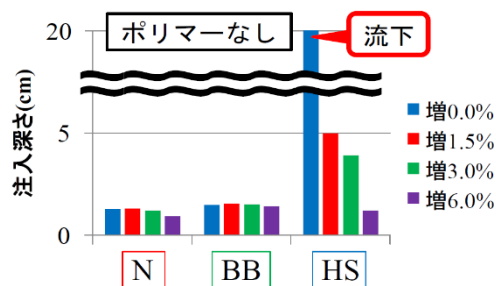


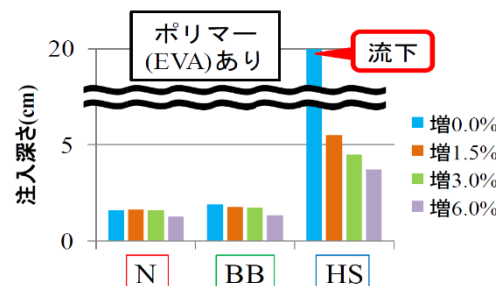
図-2.4.4.8 注入材の状態の判別

表-2.4.4.2 アクリル板注入試験結果

セメント	N				BB				HS			
	0.0%	1.5%	3.0%	6.0%	0.0%	1.5%	3.0%	6.0%	0.0%	1.5%	3.0%	6.0%
増粘剤なし	△	△	○	○	△	○	○	○	×	○	○	○
ポリマーあり	PAE	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△
	EVA	×	×	△	○	×	×	△	○	×	△	○
	SBR	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△
ひび割れ幅	0.2mm				0.6mm				1.0mm			



(a) ポリマーなし



(b) ポリマーあり

図-2.4.4.9 各種注入材における注入深さ

2.5 まとめ

本章では、微粒子粉体を用い、ジオポリマーのひび割れ補修材としての適用に関する研究を行う前段階として、ジオポリマーの基本事項、微粒子粉体の概要、微粒子粉体を用いたジオポリマーの研究、微粒子粉体を用いたジオポリマーの研究、およびひび割れ補修に関する基本事項・既往の研究を整理した。

ジオポリマーは、製造工程においてセメントを使用せず、産業副産物を主原料とすることから環境に優しい材としてセメント代替材料として期待されており、近年研究が活発化しており、ジオポリマーの強度発現、凝結時間、各種抵抗性などの多くの研究がなされている。現在、使用材料（特にフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を出発粉体とする）による傾向が見えてきており、ジオポリマーの実用化に向けた研究が行われ始めてきた。

さらに、ジオポリマーのひび割れ補修材として用いるため、微粒子粉体であるシリカフェームと高炉スラグ微粉末 6000, 8000 ブレーンに着目し、特徴とジオポリマーの研究についてまとめた。

シリカフェームは混和剤としての（添加率 5~10%）少量のみの使用で活性フィラーとして用いた研究はなかった。また、高炉スラグ微粉末 6000, 8000 ブレーンを活性フィラーとして用いた研究も少ない現状であった。

またジオポリマーのひび割れ補修材への活用に向けて、現在使われている補修材を種類別に分け、特徴をまとめた。現在、有機系と無機系に大別され、それぞれが長所と短所があり、ひび割れの発生原因や発生時状況などによって、使い分けられている。

そこで、粘性が高く垂れが生じにくく、凝結時間が短く、耐久性に優れるジオポリマーをひび割れ補修材として活用するために、ひび割れ注入性状に優れたジオポリマーの研究の初期段階として、微粒子粉体を活性フィラーとして用い、ジオポリマーの実用化に向けた研究の一助となるべく、データを蓄積することを目的とし、検討を行っていく。

第3章

ジオポリマーを補修材として活用するための初期実験

(ジオポリマーとコンクリートとの付着特性)

3.1 概要

ジオポリマーを補修材として活用するにあたり，ジオポリマーの付着特性に関する研究は少なく，特に日本国内ではその多くはジオポリマーと鉄筋との付着特性に関するもので，ジオポリマーとコンクリートとの付着特性に関する研究はほぼない。

そこで本章では，ジオポリマーモルタルとコンクリートの付着特性を明らかにするため，一般的なジオポリマーである高炉スラグ微粉末添加型において，傾斜せん断試験を行った。

また，補修材の施工にあたり，補修材の種類に応じて打設面の乾湿の条件が決まる。そこで本実験では，母材コンクリートの乾湿がジオポリマーを施工したときの付着性状についても同時に検討する。

3.2 実験概要

3.2.1 実験の要因と水準

表-3.2.1 に実験の要因と水準を、図-3.2.1 に供試体の形状と寸法を示す。母材となるコンクリートは圧縮強度 30N/mm^2 になるよう調合し、補修材としてジオポリマーモルタル（以下、GP と記す）と市販の補修用無収縮モルタル（以下、RM と記す）を用いた。それぞれ母材コンクリートと同強度となるように調合し、ジオポリマーについては 2 倍の圧縮強度となる 60N/mm^2 の水準も設けた。補修材を打ち込む前の界面の状態を乾燥状態（※詳細は 3.2.3 供試体作製方法に記す）と湿潤状態の 2 水準設けた。また、打ち継ぎ角度は 30° 、 45° 、 60° の 3 水準とした。（図-3.2.1 参照）

表-3.2.1 実験の要因と水準

		圧縮強度 (N/mm^2)	界面の乾湿	打ち継ぎ角度 ($^\circ$)
母材	コンクリート	30	—	—
補修材	ジオポリマーモルタル (GP)	30	湿潤, 乾燥	30, 45, 60
		60	湿潤	
	補修用無収縮モルタル (RM)	30	湿潤, 乾燥	

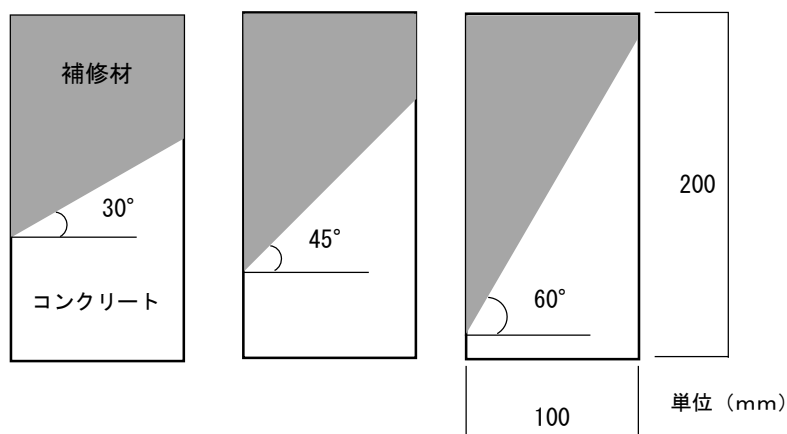


図-3.2.1 供試体の形状と寸法

3.2.2 使用材料および調合

表-3.2.2.1にGPに用いた材料を示す。GPの材料および調合は、日本コンクリート工学会「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会」の共通試験¹⁾を参考にした。表-3.2.2.2にコンクリート、表-3.2.2.3にGPモルタル、そして表-3.2.2.4にRMモルタルの調合を示す。

表-3.2.2.1 GP使用材料

種類	名称	記号	密度 (g/cm ³)
粉体	フライアッシュⅡ種	FA	2.26
	高炉スラグ微粉末	BS	2.91
溶液	水ガラス2号	WG	1.45
	水酸化ナトリウム水溶液	NH	1.35
細骨材	6号珪砂	S	2.68

表-3.2.2.2 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

Fc (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュ性状		
			W	C	S	G	SP	SL (cm)	Air (%)	Tc (°C)
24	53.8	45.6	178	331	799	966	3.3	16.5	5.5	22

Fc: 設計基準強度, W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材比, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材,
SP: 高性能 AE 減水剤, SL: スランプ, Air: 空気量, Tc: 温度

表-3.2.2.3 GPモルタルの調合

F (N/mm ²)	W/P (%)	bs/p (%)	fa/p (%)	単位量 (kg/m ³)				フロー値	
				活性フィラー (P)		溶液 (W)			砂 (S)
				FA	BS	WG1	NaOH		
30	60	10	90	449	64	216	92	1436	239
60	60	30	70	360	155	217	92	1442	246

F: 設計基準強度, W/P: 溶液粉体比 (質量比), bs/p: 高炉スラグ置換率 (容積比),

fa/p: フライアッシュ置換率 (容積比), FA: フライアッシュ, BS: 高炉スラグ, S: 細骨材

表-3.2.2.4 補修用無収縮モルタルの調合

F (N/mm ²)	W/B	S/B	単位量 (kg/m ³)			フロー値
			W	B	S	
30	0.4	2.5	213	532	1329	127

F: 設計基準強度, W/P: 溶液粉体比 (質量比), bs/p: 高炉スラグ置換率 (容積比),

fa/p: フライアッシュ置換率 (容積比), FA: フライアッシュ, BS: 高炉スラグ, S: 細骨材

3.2.3 供試体作製方法

既往の研究²³⁾を参考に、補修材料の違いと打継ぎ部の表面処理の程度がせん断強度に与える影響を評価するため、材料特性、傾斜角度、表面処理程度が異なる打継ぎ部を有する角柱供試体を作製した。

写真-3.2.3に供試体の作製状況を示す。供試体の寸法は、幅100mm、長さ100mm、高さ200mmで、鋼製型枠に角度を30、45、60°となるように、発泡スチロール製材料で半分に分け、まず片側にコンクリートを打ち込んだ(写真-3.2.3(a))。乾燥状態は条件を悪くするため発泡スチロール製材料をビニルテープで覆い、平滑面とする処置を施した。

次にコンクリートの材齢7日目の時点で脱型し、発泡スチロール製材料を除去した後(同時にビニルテープも除去した)、型枠に再び供試体を設置し(写真-3.2.3(b))、残りの半分に補修材(GP, RM)を打ち込んだ(写真3.2.3(c))。

打込み後の養生は、コンクリート、補修材共に定期的に水湿しをしながら、ビニルシートで密閉し、封緘養生とした。

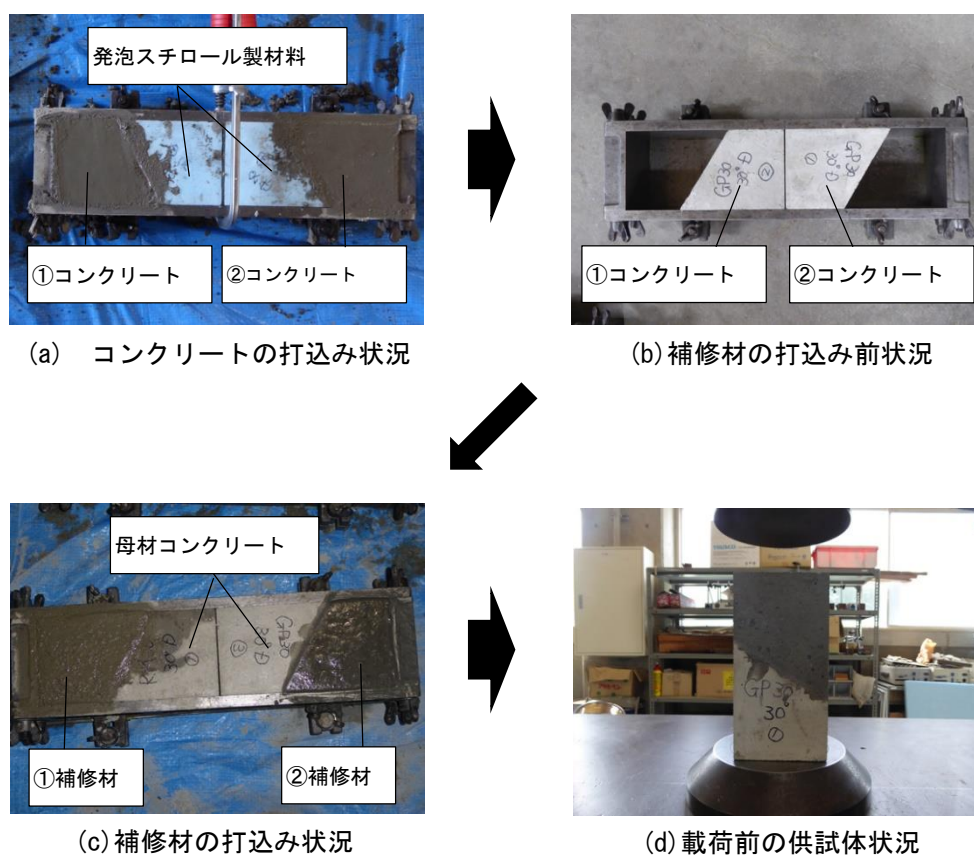


写真-3.2.3 供試体の作製状況

3.2.4 試験方法

(1) 圧縮強度試験

使用したコンクリート、補修用のモルタル (GP, RM) の材料特性 (圧縮強度, 引張強度, ヤング係数) を把握するため, 円柱供試体を作製し, 傾斜せん断試験と同じ材齢で圧縮試験および割裂引張試験を行った。圧縮供試体は端面を研磨し, 載荷には万能試験機を用いた。

(2) 傾斜せん断試験

既往の研究²⁾³⁾を参考に, 傾斜せん断試験を行った。3.2.3 供試体作製法で作製した供試体の補修材の材齢が28日目 (コンクリートの材齢35日) に傾斜せん断試験を行った (写真-3.2.3 (D))。傾斜せん断面のある供試体に, 圧縮強度試験と同じ要領で万能試験機を用い載荷した。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 材料特性

表-3.3.1 に各使用材料の特性, 図-3.3.1 に圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係を示す。GP30 はコンクリートと同程度の強度で, ヤング係数が小さい。GP60 はコンクリートより強度が大きい, ヤング係数は同程度となっている。RM は同程度の強度でヤング係数が大きいことが分かる。

表-3.3.1 各使用材料の特性

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
コンクリート	30.4	2.9	22.1
GP30	33.4	2.9	15.2
GP60	56.8	4.1	18.9
RM	32	3.7	28

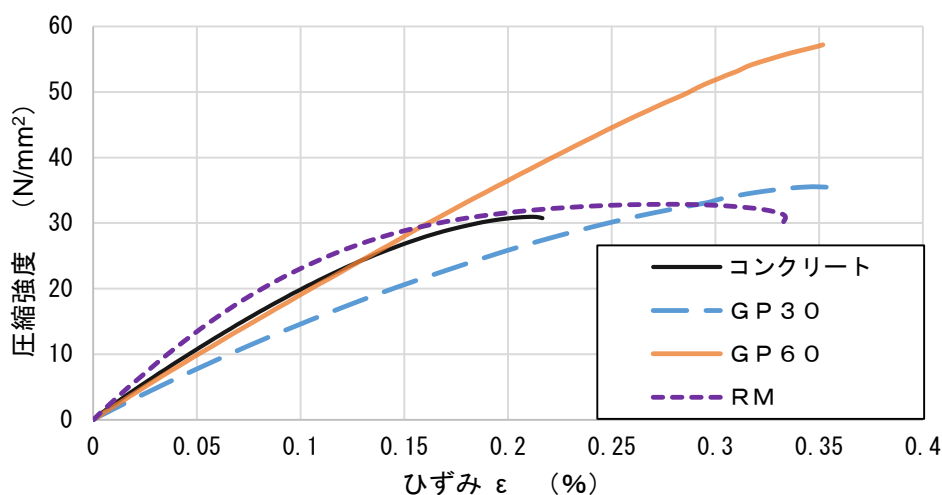


図-3.3.1 各材料の応力-ひずみ関係

3.3.2 傾斜せん断試験結果

図-3.3.2.1に傾斜せん断試験の結果を示す。図中に、各供試体の平均強度を示し、母材コンクリート（健全）は、 31.4N/mm^2 であった。補修した供試体はそれぞれ左から傾斜角 30° 、 45° 、 60° の順で、Wは界面が湿潤状態、Dは界面が乾燥状態を示す。

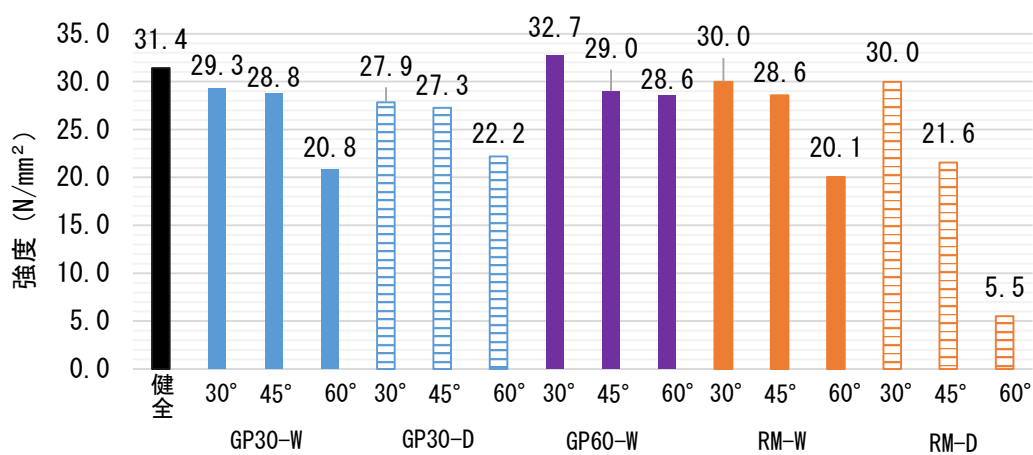


図-3.3.2.1 傾斜せん断試験結果

(1) 材料の違い (界面：湿潤状態)

図-3.3.2.2 に界面の状態が湿潤状態の時の材料の違いによる傾斜せん断試験結果を示す。全ての傾斜角において、GP30 と RM は同等の強度となった。GP30 と GP60 を比較すると傾斜角 45°以外で、GP60 が GP30 より強度が上回った。

表-3.3.2.1 に破壊性状を示す。GP60 はすべての傾斜角で母材と補修材が一体化した破壊を示した。GP30 は傾斜角 30°、45°では母材と補修材が一体化した破壊をし、傾斜角 60°のみ付着破壊した。RM は傾斜角 45°で付着破壊した供試体があり、傾斜角 60°ではすべて付着破壊した。

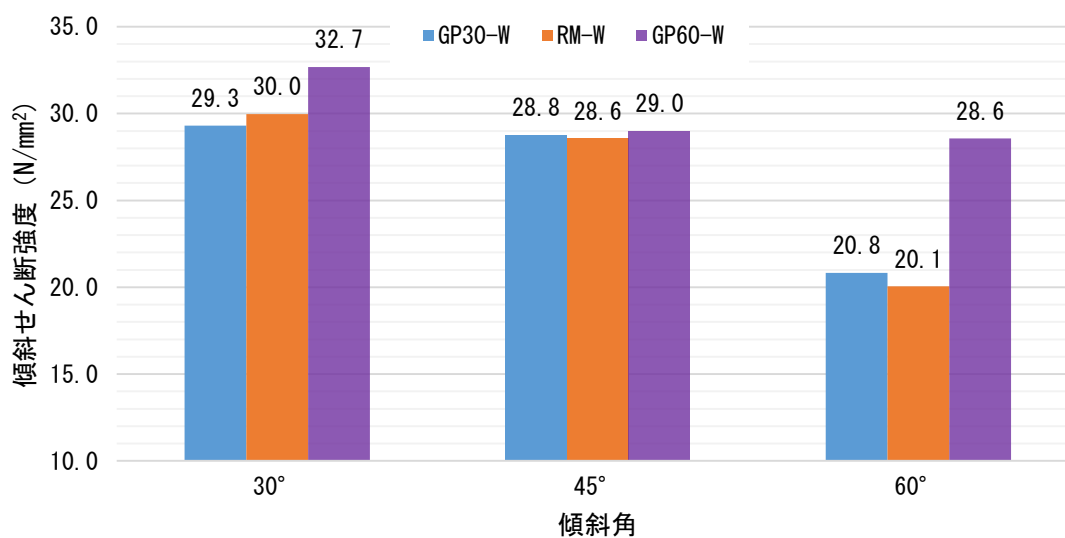







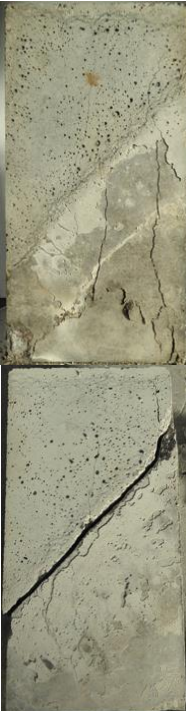



図-3.3.2.2 傾斜せん断強度 (材料の違い：湿潤状態)

表-3.3.2.1 破壊性状 (材料の違い: 湿潤面)

補修材料	傾斜角 (°)		
	30	45	60
GP30			
GP60			
RM			

(2) 材料の違い (界面：乾燥状態)

図-3.3.2.3に界面の状態が乾燥状態の時の材料の違いによる傾斜せん断試験結果を示す。

傾斜角 30°ではRMがGP30よりやや高いが、傾斜角 45°および 60°はGP30がRMを上回った。これはRMが乾燥面でドライアウトを起こしたのに対して、GPはドライアウトの影響を受けなかったと考えられる。

表-3.3.2.2に破壊性状を示す。GP30は傾斜角 30°、および傾斜角 45°では母材と補修材が一体化した破壊し、傾斜角 60°でも一部界面にひび割れが見られるが付着破壊しなかった。一方、RMは傾斜角 45°、および 60°で付着破壊した。

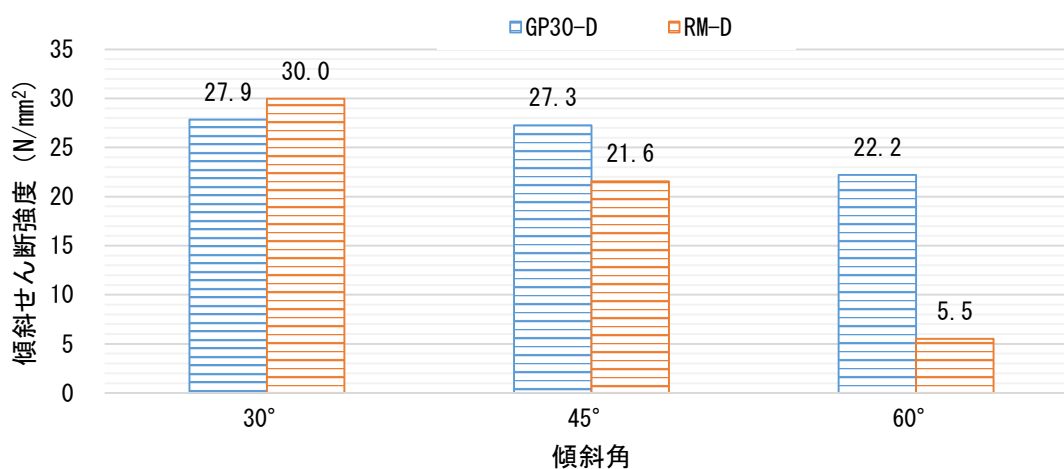





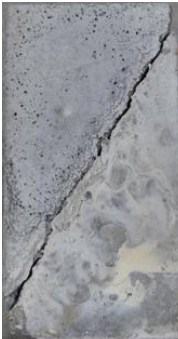


図-3.3.2.3 傾斜せん断強度 (材料の違い：乾燥状態)

表-3.3.2.2 破壊性状 (材料の違い: 湿潤面)

補修材料	傾斜角 (°)		
	30	45	60
GP30			
RM			

(3) GPの乾湿の影響

図-3.3.2.4にGP30の乾湿の影響による傾斜せん断試験結果を示す。

すべての傾斜角で界面の状態が乾湿どちらでも同等の強度となった。

表-3.3.2.3に破壊性状を示す。傾斜角30°、および傾斜角45°では界面の状態に関係無く母材と補修材が一体化した破壊した。傾斜角60°では湿潤状態では付着破壊したのに対し、乾燥状態では一部界面にひび割れが見られるが付着破壊しなかった。

この結果より、ジオポリマーの界面の状態は乾燥状態の方が良い可能性がある。

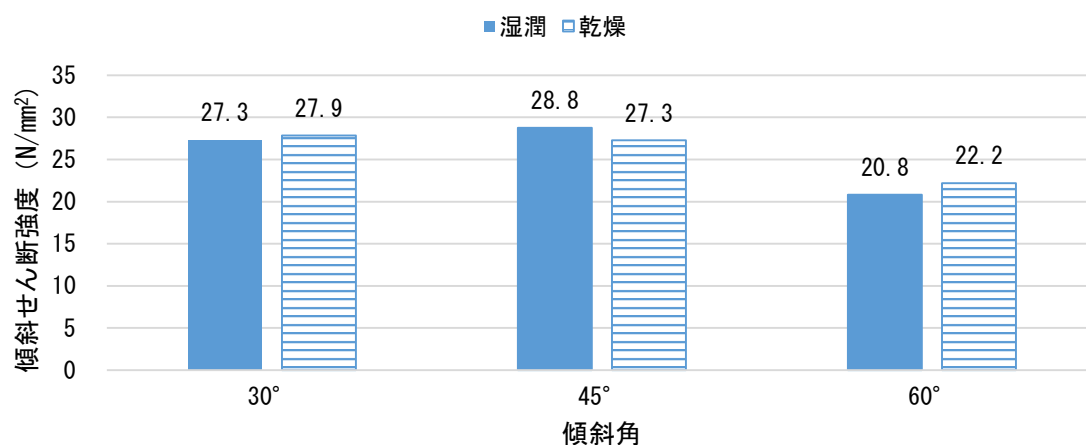

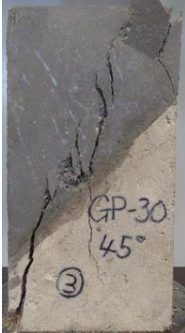






図-3.3.2.4 傾斜せん断強度 (GP30の乾湿の影響)

表-3.3.2.2 破壊性状 GP30

界面の状態	傾斜角 (°)		
	30	45	60
湿潤			
乾燥			

(4) 破壊基準

本実験で付着破壊した条件を表-3.3.2.3に、付着破壊した時の供試体の付着界面の分力を図-3.3.2.1に、破壊基準線を図-3.3.2.2に示す。

既往の研究⁴⁾を参考に、本実験での破壊基準式を作った。図-3.3.2.1より荷重Pは分力としてせん断力Qと垂直力Nに分けることができ、せん断面積Aで除した値がそれぞれの応力であり、傾斜角によって図-3.3.2.2の線上にプロットすることができる。

図-3.3.2.3に付着試験結果を示す。傾斜角によって、いずれかの点線上にプロットさせる。この図より付着力はRMよりGPの方が高く、RMは乾燥状態より湿潤状態の方が付着強度は高いのに対して、GPは湿潤状態より乾燥状態の状態の方が付着力は高い結果となった。

表-3.3.2.3 付着破壊した条件

材料	界面の状態	傾斜角 (°)
GP30	乾燥	60
	湿潤	60
RM.30	乾燥	45, 60
	湿潤	45, 60

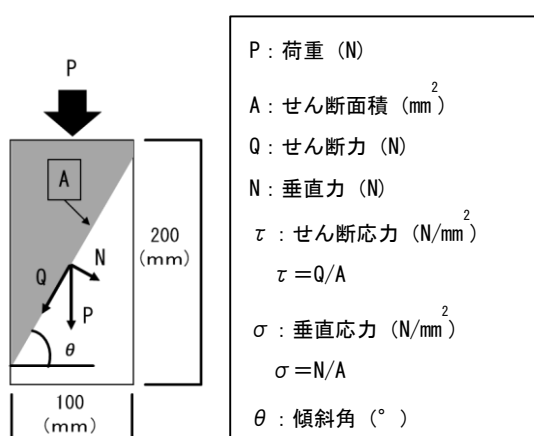


図-3.3.2.1 付着界面の力の分力

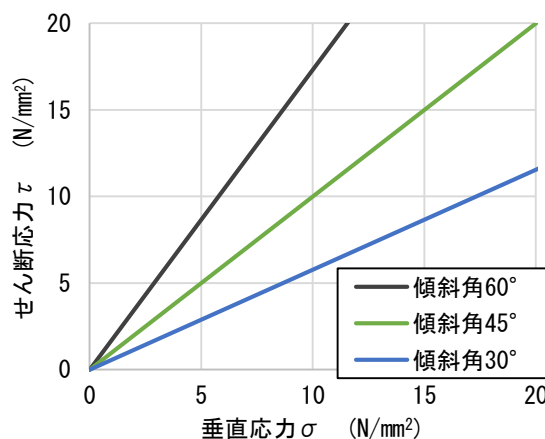


図-3.3.2.2 破壊基準線

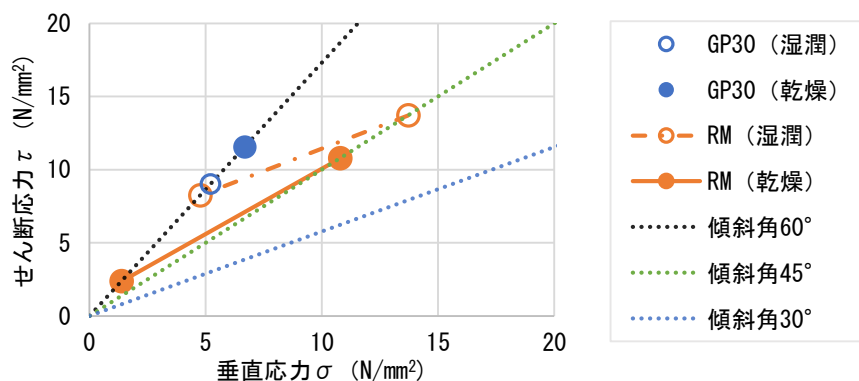


図-3.3.2.4 付着試験結果

3.4 まとめ

本章では、一般的なジオポリマーである高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーとコンクリートの付着特性を調べるために傾斜せん断試験を行った。本章で得られた結果を以下にまとめる。

- 1)コンクリートと同一強度のジオポリマーは同一強度の補修用無収縮モルタルと同等以上の付着強度を示した。
- 2)ジオポリマーは無収縮モルタルと比べて、ドライアウトの影響を受けにくいことが確認された。
- 3)ジオポリマーはセメント系とは逆に、湿潤状態より乾燥状態の方が付着強度は高くなる可能性がある。

第4章

超微粒子粉体のシリカフェームを添加した ジオポリマーの基礎特性（圧縮強度およびフロー値）

4.1 概要

本研究では、ジオポリマーをひび割れ注入材として活用するため、粒子の細かさに着目し微粒子粉体を用いたジオポリマーの基礎特性を調べ、注入試験を行う。

シリカフェームは超微粒子（約 200000 ブレーン）であるが、今までシリカフェームを用いたジオポリマーに関する研究は、ほとんどがシリカフェーム置換率（全粉体に占めるシリカフェームの占める割合）は約 2~10%であり、主要な粉体として用いている研究ほとんど見れない。

本章では、シリカフェームのジオポリマーの主要な粉体として適用が可能であるか調べることを目的とする。実験Ⅰでは、一般的なジオポリマーであるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末にシリカフェームで置換し、練り混ぜが可能であるか、流動性（フロー値）、および圧縮強度について基礎的な実験を行った。実験Ⅱでは、新たに 2 種類のシリカフェームを用い、練混ぜの可否、フロー値、および圧縮強度について基礎的な実験を行った。なお、実験Ⅱではばらつきの大きいフライアッシュは用いず、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームのみの比率を変えた。

4.2 実験 I

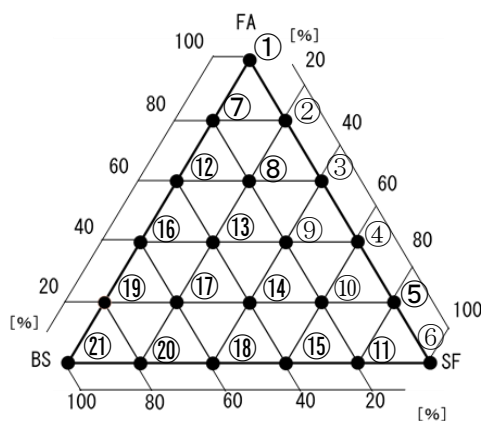
4.2.1 実験の要因と水準

表-4.2.1 に本実験の要因と水準を、図-4.2.1 に粉体比を示す。本実験では、溶液と粉体の質量比 (以下, W/P) を 0.5 とし、溶液比は水ガラス 2 号 (以下, WG2) : 水酸化ナトリウム水溶液 (以下, NH) = 2 : 1 で一定とし、粉体の比率のみを変化させた。ただし、練混ぜが出来なかった調合は、粉体の明らかな乾燥部分が無くなりペースト化するまで溶液を加えて実験を行った。

表-4.2.1 要因と水準

要因	水準
粉体 (P)	FA, BS, SF
粉体比	図-4.2.1 に詳細に記す
溶液粉体比 (W/P)	W/P=0.5
溶液 (W)	WG2, NH
溶液比	WG2 : NH=2 : 1

※FA : フライアッシュ, BS : 高炉スラグ微粉末, SF : シリカフェーム,
W : 溶液 (W=WG2+NH), P : 粉体 (P=FA+BS+SF), W/P : 溶液粉体比,
WG2 : 水ガラス 2 号, NH : 水酸化ナトリウム水溶液,



※FA : フライアッシュ, BS : 高炉スラグ微粉末, SF : シリカフェーム

図-4.2.1 粉体比

4.2.2 使用材料および調合

(1) 使用材料

表-4.2.2.1 に本実験の使用材料を示す。

本実験では、粉体にはフライアッシュ（以下、FA）の JIS II種を、JIS 規定された高炉スラグ微粉末（以下、BS）とシリカフェーム（以下、SF）を使用した。アルカリ溶液には、WG2 の原液、および 10mol/L の NH を使用した。

表-4.2.2.2 に蛍光 X 線分析（XRF）による粉体の主な化学組成を示す。

FA は Al_2O_3 がおよそ 25%、 SiO_2 がおよそ 60% で構成されており、FA は CaO がおよそ 43% で、次に SiO_2 が 34%、 Al_2O_3 が 15% であった。SF は約 98% が SiO_2 であった。Si は FA, BS, SF のすべてに、 Al_2O_3 は FA, BS に含まれており、CaO については BS が主な供給源となる。

表-4.2.2.1 使用材料

種別	略号	材料名	密度 (g/cm^3)
粉体 (P)	FA	フライアッシュ JIS II種 (JIS A 6201)	2.29
	BS	高炉スラグ微粉末 4000 (JIS A 6208)	2.91
	SF 1	シリカフェーム (JIS A 6207)	2.2
溶液 (W)	WG2	水ガラス 2号 原液	1.45
	NH	水酸化ナトリウム水溶液 (10mol/L)	1.35

表-4.2.2.2 活性フィラーの化学組成

	FA	BS	SF1
Al_2O_3	23.64	14.94	0.23
SiO_2	60.49	34.04	97.75
CaO	2.9	42.72	0.23
Fe_2O_3	4.68	0.35	0.1
K_2O	1.21	0.26	0.86
MgO	0.53	5.81	0.22
Na_2O	0.49	0.26	0.09
Ig. loss	4.03	0.25	0.28

(2) 調合

表-4.2.2.3 に本実験で用いた調合表を示す。粉体比は FA, SF, BS, 20% ごと変化させた。

表-4.2.2.3 調合表

記号	粉体比	単分量 (g/L)						
		FA	SF	BS	WG2	NH	P	W
①	FA100-SF0-BS0	1265.8	0.0	0.0	421.9	211.0	1265.8	632.9
②	FA80-SF20-BS0	1013.1	253.3	0.0	422.1	211.1	1266.4	633.2
③	FA60-SF40-BS0	760.2	506.8	0.0	422.3	211.2	1267.0	633.5
④	FA40-SF60-BS0	507.0	760.6	0.0	422.5	211.3	1267.6	633.8
⑤	FA20-SF80-BS0	253.6	1014.6	0.0	422.7	211.4	1268.2	634.1
⑥	SF100-SF0-BS0	0.0	1268.8	0.0	422.9	211.5	1268.8	634.4
⑦	FA80-SF0-BS20	1036.7	0.0	259.2	432.0	216.0	1295.9	648.0
⑧	FA60-SF20-BS20	777.9	259.3	259.3	432.2	216.1	1296.6	648.3
⑨	FA40-SF40-BS20	518.9	518.9	259.4	432.4	216.2	1297.2	648.6
⑩	FA20-SF60-BS20	259.6	778.7	259.6	432.6	216.3	1297.8	648.9
⑪	FA0-SF80-BS20	0.0	1038.8	259.7	432.8	216.4	1298.5	649.2
⑫	FA60-SF0-BS40	796.5	0.0	531.0	442.5	221.3	1327.5	663.8
⑬	FA40-SF20-BS40	531.3	265.6	531.3	442.7	221.4	1328.2	664.1
⑭	FA20-SF40-BS40	265.8	531.5	531.5	443.0	221.5	1328.9	664.4
⑮	FA0-SF60-BS40	0.0	797.7	531.8	443.2	221.6	1329.5	664.8
⑯	FA40-SF0-BS60	544.3	0.0	816.4	453.6	226.8	1360.7	680.4
⑰	FA20-SF20-BS60	272.3	272.3	816.8	453.8	226.9	1361.4	680.7
⑱	FA0-SF40-BS60	0.0	544.8	817.3	454.0	227.0	1362.1	681.1
⑲	FA20-SF0-BS80	279.1	0.0	1116.5	465.2	232.6	1395.6	697.8
⑳	FA0-SF20-BS80	0.0	279.3	1117.1	465.4	232.7	1396.3	698.2
㉑	FA0-SF0-BS100	0.0	0.0	1432.3	477.4	238.7	1432.3	716.2

※FA：フライアッシュ，SF：シリカフェーム，BS：高炉スラグ微粉末，

WG2：水ガラス2号，NH：水酸化ナトリウム水溶液，P：粉体，W：溶液

4.2.3 試験方法

(1) 練混ぜ方法

溶液は前日にWG2とNHを質量比で2:1となるように混ぜ、20°C、60%R.H.の養生室で保管したものをを用いた。

粉体はハンドスコップで粉体のみを空練りした後、溶液を追加し、モルタル用ハンドミキサーを用い60秒間練り混ぜ、30秒間掻き落としをした後、再び120秒間練り混ぜた。なお本実験では1バッチの練混ぜ量を2Lで行った。

硬化前のフレッシュ性状を確認するために、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に基づいてフロー試験を行った。また、材齢1, 7, 28日において圧縮強度試験を各調合3本ずつ行えるよう、φ50×100mmの円柱供試体型枠に打ち込んだ。

(2) 養生方法

打込み後、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留めて封かん養生とし、以下のような温湿度条件下で養生を行った。

材齢1日は60°Cで27時間の加温養生とし、材齢7, 28日は20°C、60%R.H.の環境で養生を行った。

また、膨張が発生した供試体は、膨張した部分をコンクリートカッターで切断、または研磨機で削り、円柱形になるように整形し、研磨機で端面を平滑にした。

4.2.4 試験結果

(1) 練混ぜの可否

図-4.2.4.1に W/P=0.5 での練混ぜの可否および瞬結の状況を示す。図中に、W/P=0.5 で練混ぜが不可の調合については溶液を加えたことにより変更した W/P の値を示す。また、凝結時間が短く、打込み時に明らかな硬化が起こったものについては瞬結と記す。

SF 置換率 40~100%の範囲で、W/P=0.5 での練混ぜが行えなかったものがあった。これは SF の比表面積が大きいいため、溶液との接触面積が大きくなったためだと考えられる。

また、BS 置換率 100%および BS 置換率 80%FA 置換率 20% (SF 置換率 0%) で瞬結が起こった。既往の研究においても、BS 置換率が大きいと凝結時間が短くなることが報告されている¹⁾。

(2) フロー試験

図-4.2.4.2にフロー試験の結果を示す。

SF 置換率が大きいほど、フロー値が低くなる傾向が見られた。これはコンクリートでも見られる、SF の比表面積が大きい 20~22 (m²/g) と大きいため使用量を増やすと、水と接触する部分が多くなりスランプ値が低下する現象²⁾³⁾と同様に、GP ペーストでも比表面積が大きいことが原因である考える。

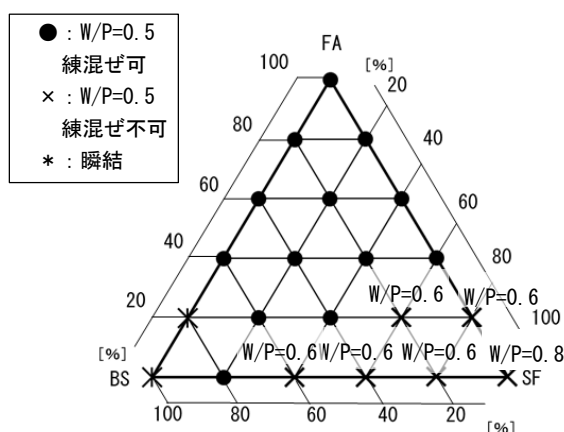


図-4.2.4.1 W/P=0.5 での練混ぜの可否および瞬結の状況

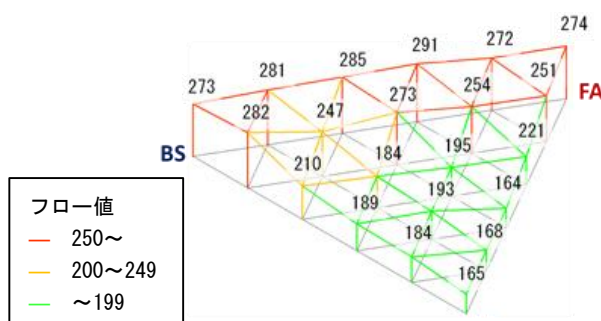


図-4.2.4.2 フロー試験結果

(3) 膨張性

図-4.2.4.3(a)に加温養生の、(b)に封緘養生の時のそれぞれの膨張の有無を示す。

結果、SF置換率が大きい範囲かつBS置換率が低い範囲で膨張する傾向がみられた。

加温養生の場合、BS40%の時にFA20%SF40%、およびFA0%SF60%で膨張しているのに対して、封緘養生の場合、膨張していない結果となった。

また、表-4.2.4.1に加温養生時の膨張の様子を、表-4.2.4.2に封緘養生時の膨張の様子を示す。どちらも、SF置換率が大きいほど膨張量が多くなり、BS置換率が小さいほど膨張量が小さくなる結果となり、SF100%の供試体が最も膨張量が多くなった。このことから、SFの添加によって膨張したと考えられる。

加温養生と封緘養生を比較すると、加温養生の方が、膨張量が増加する傾向が見られた。

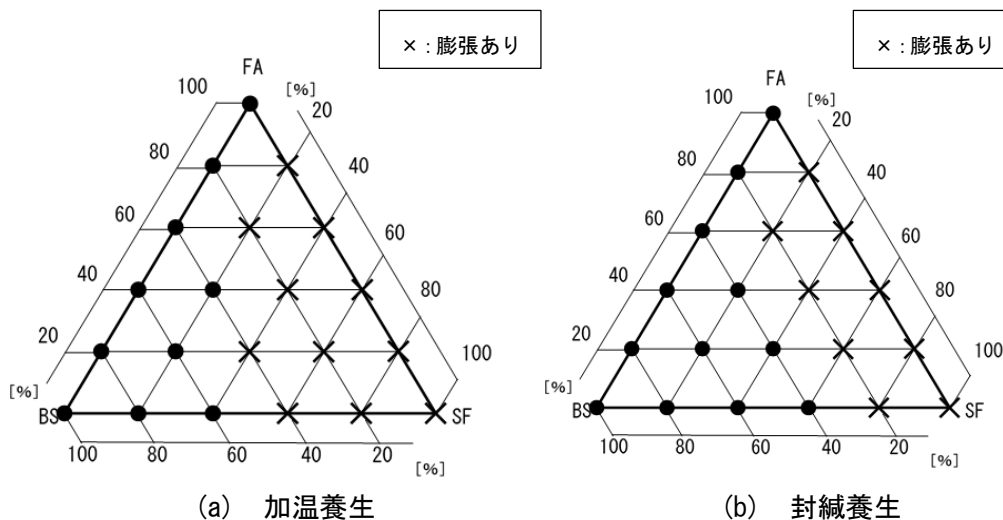













図-4.2.4.3 膨張の有無

表-4.2.4.1 膨張の様子 (加温養生)

	②	③	④	⑤	⑥
	FA80-SF20	FA60-SF40	FA40-SF60	FA20-SF80	FA0-SF100
BS0%					
	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
	FA80-SF0	FA60-SF20	FA40-SF40	FA20-SF60	FA0-SF80
BS20%	膨張なし				
	⑫	⑬	⑭	⑮	
	FA60-SF0	FA40-SF20	FA20-SF40	FA0-SF60	
BS40%	膨張なし	膨張なし			

表-4.2.4.2 膨張の様子(封緘養生)

	②	③	④	⑤	⑥
	FA80-SF20	FA60-SF40	FA40-SF60	FA20-SF80	FA0-SF100
BS0%					
	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
	FA80-SF0	FA60-SF20	FA40-SF40	FA20-SF60	FA0-SF80
BS20%	膨張なし				
		⑫	⑬	⑭	⑮
		FA60-SF0	FA40-SF20	FA20-SF40	FA0-SF60
BS40%		膨張なし	膨張なし		

(4) 圧縮強度試験

図-4.2.4.4 に、圧縮強度試験の (a) に材齢 1 日加温養生の、(b) に材齢 7 日封緘養生の、(c) に材齢 28 日封緘養生の結果を示す。

全ての材齢において、BS 置換率が大きいほど圧縮強度は高く、SF の比率が高いほど圧縮強度は低い傾向を示した。これらの理由として、BS を使用した条件においては、SF の添加によりカルシウム含有量が相対的に減少するため C-A-S-H などの硬化体の生成が抑えられたことや、本実験の条件では SF が良好に反応しなかったなどの可能性が考えられる。

また BS100 は、瞬結の影響で打込みが困難であり、供試体に未充填部が存在していたため、圧縮強度が落ちている。材齢 28 日では、研磨時にこれに起因する破壊が生じた。

図-4.2.4.5 (a) に SF-BS 系 (FA 置換率 0%)、(b) に FA-BS 系 (SF 置換率 0%) の圧縮強度と BS 置換率との関係を示す。

SF-BS 系では BS 置換率が 20% のとき、養生方法に関わらず圧縮強度は 10N/mm² 程度と低く、80% で急激に上昇し、その圧縮強度は 100～130N/mm² 程度となった。一方、FA-BS 系では、BS 置換率が 20%、材齢 1 日加温養生において 80N/mm² 近く、材齢 28 日封緘養生であっても 50N/mm² 以上得られており、粉体の反応性に大きな違いがあることが確認できた。

また、BS 置換率が高いと瞬結が発生し、既述した供試体の未充填部の発生が原因で圧縮強度の低下が生じた。但し、SF-BS 系と FA-BS 系、供試体作製条件などにより、圧縮強度の低下が生じる BS 置換率や強度低下の度合いが異なっており定量的な評価には至っていない。

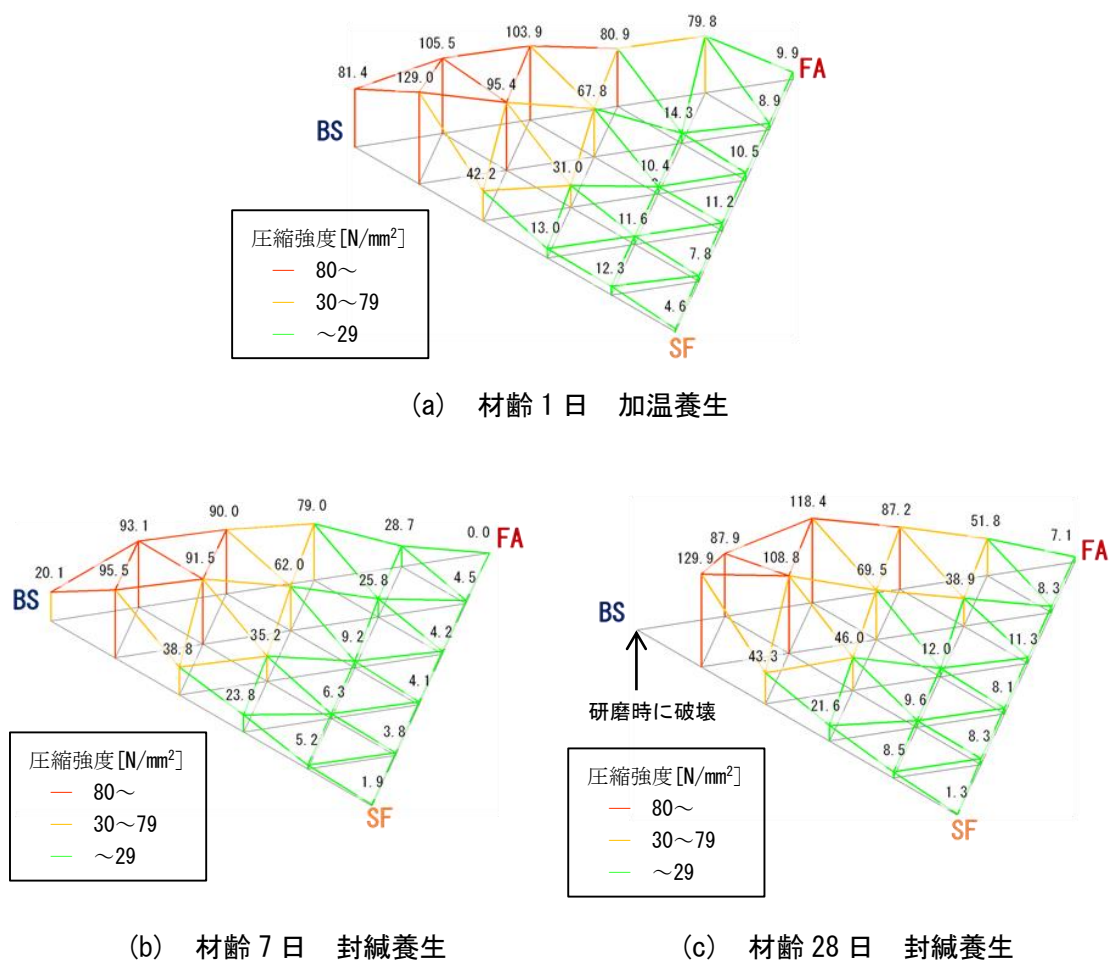


図-4.2.4.4 圧縮強度試験

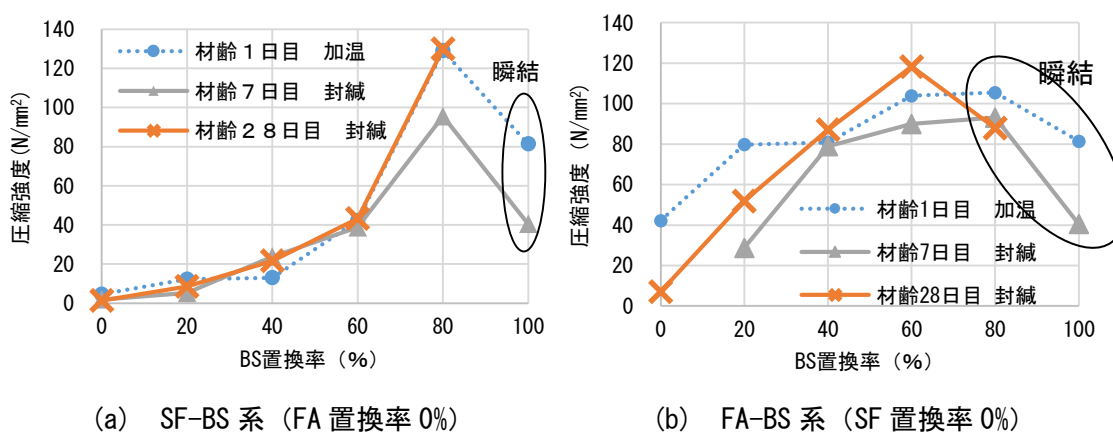


図-4.2.4.5 圧縮強度とBS置換率の関係

図-4.2.4.6に、圧縮強度と単位容積質量の関係を示す。同図によれば、単位容積質量に2倍程度の差が生じ、数値が大きくなるほど圧縮強度が高くなる傾向を示した。これは、SFの添加により何らかの反応による発泡が生じ供試体を膨張させたため、単位容積質量が低くなるとともに、圧縮強度が低下したと考えられる。

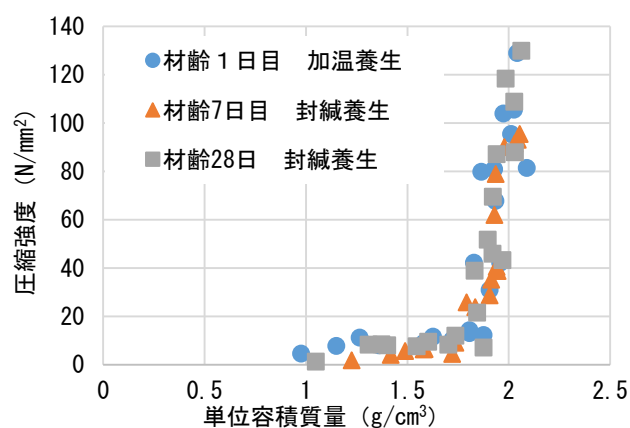


図-4.2.4.6 圧縮強度と単位容積質量の関係

(5) 膨張性の考察

現時点では、SFによるGPペーストの膨張の原因を明らかに出来ていないが、SFの粒子が超微細粒子(0.1~10 μm)のために反応しやすい形態であること、金属シリコン、金属アルミ、炭素などの含有があればアルカリ溶液と反応し、水素ガスなどの気体が発生する可能性もあることなどが推察される。SF置換率が増加すると硬化反応前に大量の発泡が生じ、圧縮強度と単位容積質量の低下に結び付いたのではないかと考える。

4.3 実験Ⅱ（シリカフェームの種類の影響）

実験Ⅰでは、一般的に粉体として用いられているフライアッシュと高炉スラグ微粉末にシリカフェームを置換して、練混ぜの可否、硬化状況、フロー値および圧縮強度を確認した。

本実験では、種類（産地・起源）の異なるシリカフェームを3種類用い、高炉スラグ微粉末との粉体比を変え、硬化状況（膨張）、フロー値、および圧縮強度の確認を行う。なお、製造工場およびロットによって性状が変わるフライアッシュは用いず、粉体はシリカフェームと高炉スラグ微粉末のみとした。

4.3.1 実験の要因と水準

表-4.3.1に、本実験の要因と水準を示す。シリカフェーム（以下、SF）と高炉スラグ微粉末（以下、BS）の粉体比を変化させた。溶液の種類、および溶液粉体比は一定とした。

表-4.3.1 実験の要因と水準

粉体比(質量比)	SF:BS	100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80
シリカフェーム	SF1, SF2, SF3（詳細は表-4.3.2.2に記述）	
溶液比	NH:WG2=1:2（一定）	
溶液粉体比	W/P=0.5（一定）	

4.3.2 使用材料および調合

表-4.3.2.1に、本実験の使用材料を示す。使用粉体としては、BSおよびSF（JIS規格）を使用した。使用溶液としては、水ガラスの2号の原液（以下、WG2）および10mol/Lの水酸化ナトリウム（以下、NH）を使用した。

表-4.3.2.1 使用材料

種別	略号	材料名	密度(g/cm ³)
粉体 (P)	BS	高炉スラグ微粉末4000 (JIS A 6206)	2.91
	SF (1~3)	シリカフェーム (JIS A 6207)	2.2
溶液 (W)	WG2	水ガラス2号 原液	1.45
	NH	水酸化ナトリウム水溶液(10mol/L)	1.35

表-4.3.2.2 に3種類のSFの産地、起源、および化学成分を、図-4.3.2 に3種類のSFの粒度分布を示す。なお、粒度分布はレーザー回折・散乱法によって、測定した。

SF1 はノルウェー産で金属シリコン製造時に排出されるSF、SF2 は別産地（中国産）でSF1と同じく金属シリコン製造時に排出されるSF、そしてSF3はSF2と同じく中国産で電融ジルコニア製造時に排出されるSF（別起源）を用いた。

表-4.3.2.3 に、本実験で使用したジオポリマーの調合表を示す。溶液粉体比（以下、W/P）はW/P=0.5、使用する溶液はWG2/NH=2.0で一定とした。

表-4.3.2.2 SFの化学成分（%）

	SF1	SF2	SF3
産地	ノルウェー	中国	中国
起源	金属シリコン	金属シリコン	電融ジルコニア
SiO ₂	97.75	93.15	96.5
Al ₂ O ₃	0.23	0.14	0.26
Fe ₂ O ₃	0.1	0.06	0.27
CaO	0.23	0.89	0.03
MgO	0.22	0.72	0.02
K ₂ O	0.86	2.28	0.1
Na ₂ O	0.09	0.37	0.01
ZrO ₂ +HfO ₂	-	-	2.34
Ig.loss	0.28	2.38	0.43

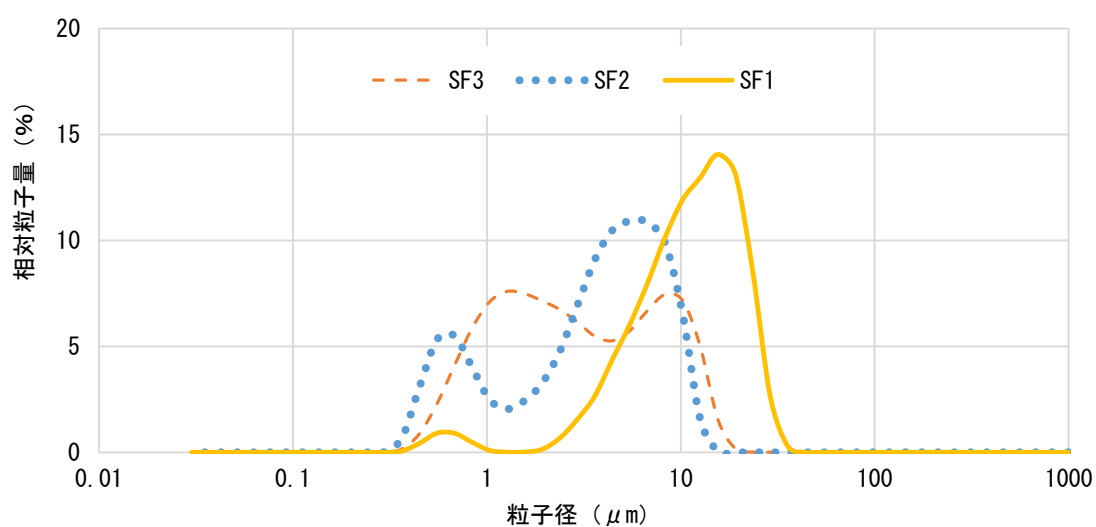


図-4.3.2 粒度分布

表-4.3.2.3 調合表

V _{SF} (%) *1	単分量(g/L)				W/P*1	WG2/NH
	SF	BS	WG2	NH		
100	1269	0	423	211	0.5	2.0
80	1039	260	433	216		
60	798	532	443	222		
40	545	817	454	227		
20	279	1117	465	233		

[注] *1 : SF の質量置換率 $V_{SF} = SF / (SF + BS)$

*2 : W/P=溶液/粉体 (質量比)

4.3.3 試験方法

本実験の試験体作製方法および試験方法は、試験 I と同様とした。

4.3.4 試験結果

(1) 練混ぜの可否

表-4.3.1.1 に練り混ぜの可否を示す。W/P=0.5 の調合で○は練り混ぜを行えたものを、×は練り混ぜを行えなかったものを、×の横の数字は溶液を加えたことにより変更した溶液粉体比 (W/P) の値が示してある。

SF1 は V_{BS}=40%まで練り混ぜが行えなかったが、SF2 および SF3 は練り混ぜが可能であった。このことから、SF の種類によってジオポリマーペースト (以下、GP) の流動性に及ぼす影響が異なることが分かった。

表-4.3.4.1 練混ぜの可否

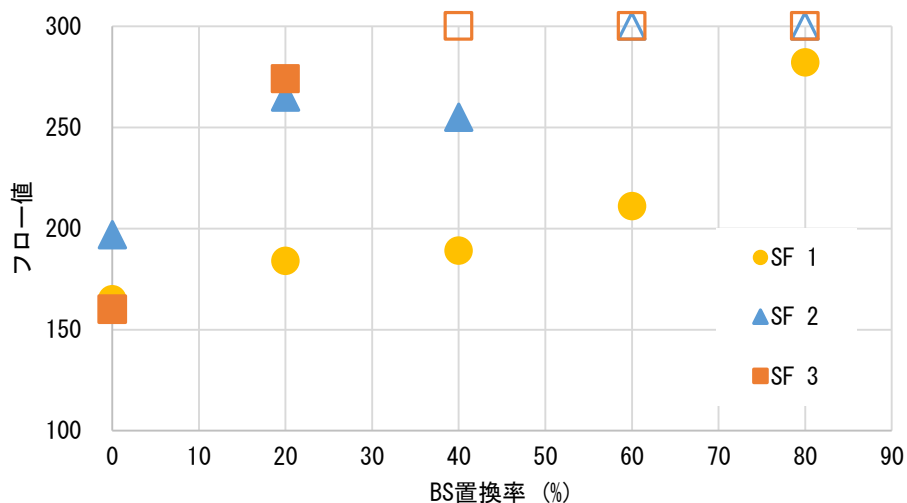
V _{BS} (%)	0	20	40	60	80
SF1	×:0.8*	×:0.6*	×:0.6*	○	○
SF2	○	○	○	○	○
SF3	○	○	○	○	○

[注] *練り混ぜが可能になった溶液粉体比 (W/P) の値

(2) フロー試験

図-4.3.4.1 および表-4.3.4.2 にフロー試験結果を示す。SFの種類に関係なく、BS置換率が大きくなるほど、フロー値が大きくなる傾向があり、粒子の細かいSF置換率が大きいとフロー値が減少する。

一方、同じBS置換率でもSFの種類によって、フロー値が大きくなることが分かった。



※白抜きは300を越えていたもの

図-4.3.4.1 フロー試験結果

表-4.3.4.2 フロー試験結果

$V_{BS}(\%)*1$	SF1	SF2	SF3
0	165	197	160
20	184	265	274
40	189	255	300 以上
60	210	300 以上	300 以上
80	282	300 以上	300 以上

[注] *1 : BSの質量置換率 $V_{BS} = BS / (BS + SF)$

(3) 膨張性

表-4.3.4.3に材齢1日加温養生の硬化体の様子を、表-4.3.4.4に材齢1日加温養生の膨張の有無を示す。SFの種類によって膨張量が異なる結果となった。これは実験Iで推測した膨張原因から、種類によってSFのSiO₂量、C量、pH、粒子の細かさが異なっているためではないかと考える。

表-4.3.4.3 硬化体の様子 (材齢1日加温養生)

	SF (BS) 置換率 (%)					
	0 (100)	20 (80)	40 (60)	60 (40)	80 (20)	100 (0)
SF1						
SF2						
SF3						

表-4.3.4.4 膨張の有無 (材齢1日加温養生)

	SF (BS) 置換率 (%)					
	0 (100)	20 (80)	40 (60)	60 (40)	80 (20)	100 (0)
SF1	○	○	○	×	×	×
SF2	○	○	○	○	×	×
SF3	○	○	○	○	○	×

○：膨張無し， ×：膨張有り

表-4.3.4.5に、材齢28日封緘養生の硬化体の様子を、表-4.3.4.6に、材齢28日封緘養生の膨張の有無を示す。材齢1日加温養生と同様にSFの種類によって、膨張量が異なる結果となった。また、材齢1日加温養生と比べて、すべての種類のSFで膨張量が減少した。これは加温が60℃、封緘養生が20℃と温度の違いによる反応量の違いではないかと考える。

表-4.3.4.5 硬化体の様子 (材齢28日封緘養生)



















	SF (BS) 置換率 (%)					
	0 (100)	20 (80)	40 (60)	60 (40)	80 (20)	100 (0)
SF1						
SF2						
SF3						

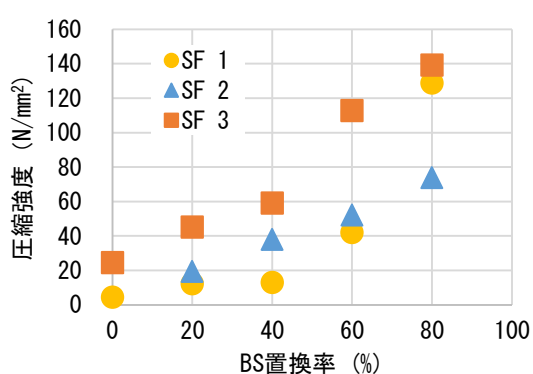
表-4.3.4.6 膨張の有無 (材齢28日封緘養生)

	SF (BS) 置換率 (%)					
	0 (100)	20 (80)	40 (60)	60 (40)	80 (20)	100 (0)
SF1	○	○	○	○	×	×
SF2	○	○	○	○	×	×
SF3	○	○	○	○	○	○

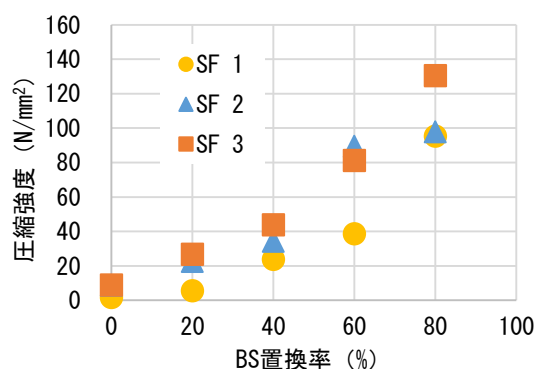
※○：膨張無し，×：膨張有り

(4) 圧縮強度試験

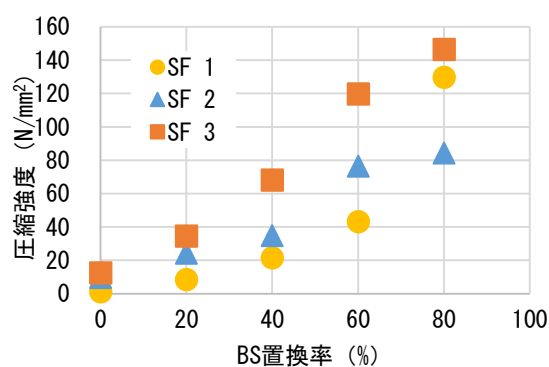
図-4.3.4.2 に圧縮強度と BS 置換率の関係を、(a)に材齢 1 日加温養生の、(b)に材齢 7 日封緘養生の、(c)に材齢 28 日に封緘養生の結果を示す。SF の種類、材齢および養生条件に関わらず、BS 置換率が大きくなるほど、圧縮強度は増加する結果となった。また、SF の種類によって、圧縮強度が変わり、特に SF3 である電融ジルコニア製造時に排出される SF は他の 2 種類（金属シリコン）と比較して、高い傾向を示した。SF3 は BS20 (SF80) %の置換率で材齢 1 日加温養生および材齢 28 日封緘養生で 30N/mm² を越えており、BS 置換率の増加に伴い、圧縮強度も増加した。



(a) 材齢 1 日 加温養生



(b) 材齢 7 日 封緘養生



(c) 材齢 28 日 封緘養生

図-4.3.4.2 圧縮強度—BS 置換率の関係

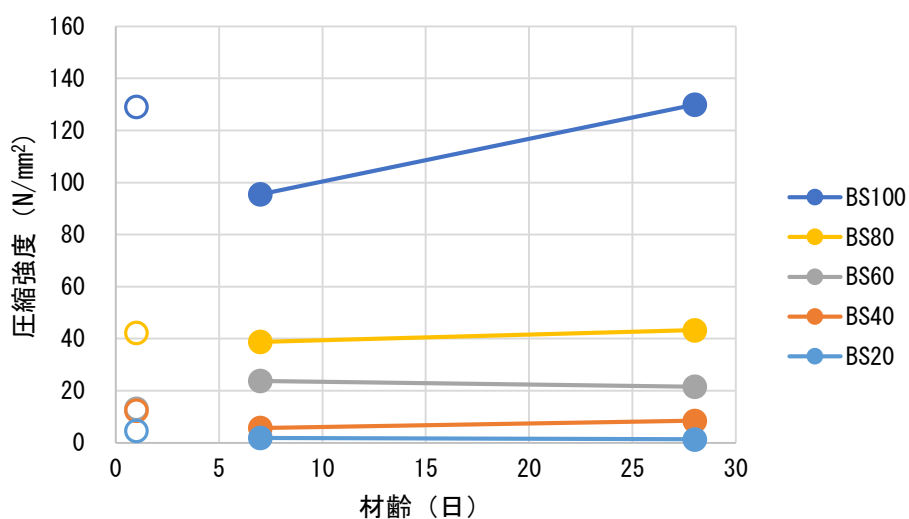
図-4.3.4.3 に圧縮強度と材齢の関係を、(a)に SF1, (b)に SF2, (c)に SF3 について示す。

SF の種類によって、加温養生の影響や材齢 7 日から材齢 28 日までの圧縮強度の増加量に違いがある。

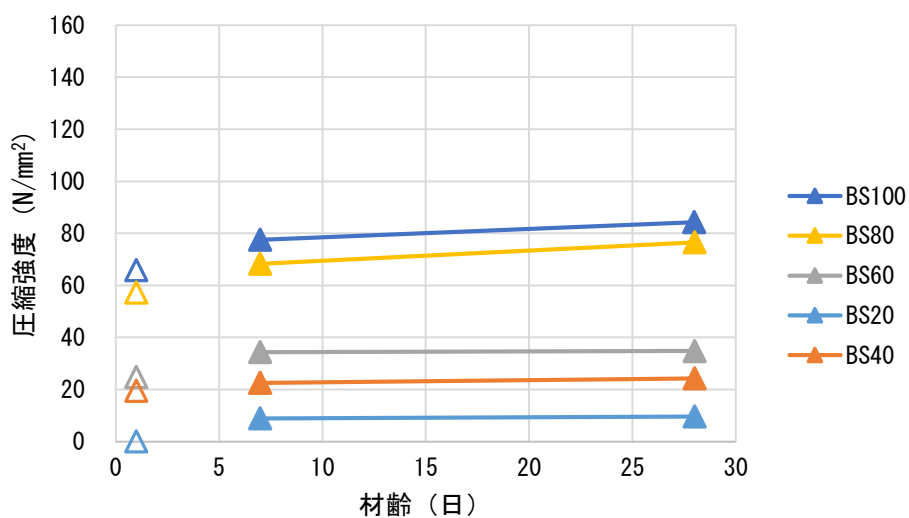
加温養生による圧縮強度の増加について、(a)の SF1 は BS 置換率 20~80 (%) では加温養生による圧縮強度の増加が見られない結果であった。(b)の SF2 はすべての BS 置換率で、同様に加温養生による圧縮強度の増加が見られない結果であった。(c)の SF3 では、SF1 と SF2 とは異なり、僅かではあるが加温養生による圧縮強度の増加の影響が見られた。

これは、圧縮強度低下の原因が SF の添加による何らかの気体が発生し、膨張したためだと考えられる。加温すると気体の発泡する反応が活性化され、ジオポリマー化や高炉スラグ微粉末による C-A-S-H の生成より、発泡による膨張、単位容積質量の減少が多くなり、圧縮強度の低下に繋がったと考えられる。

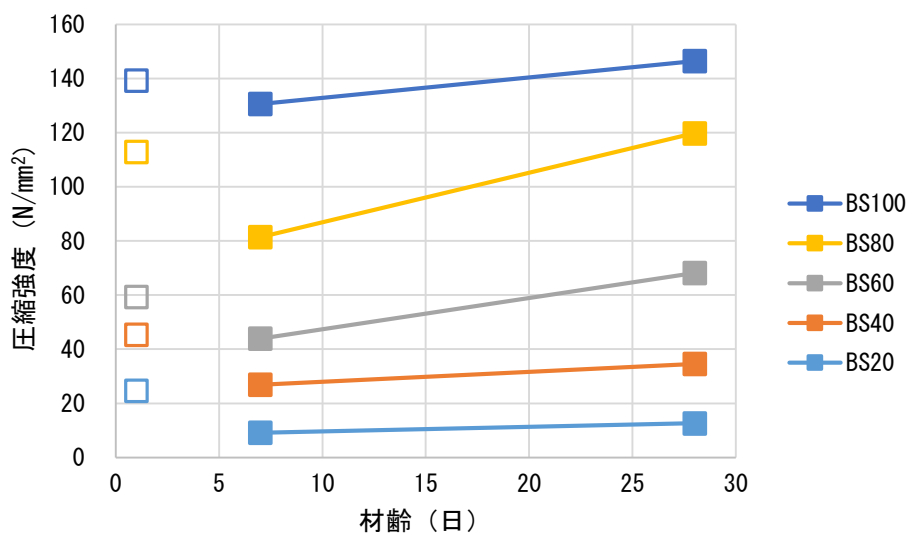
材齢 7 日から材齢 28 日までの圧縮強度の増加量は、BS 置換率が小さい、すなわち SF 置換率が大きいと、増加しにくくなる傾向となった。



(a) SF1



(b) SF2

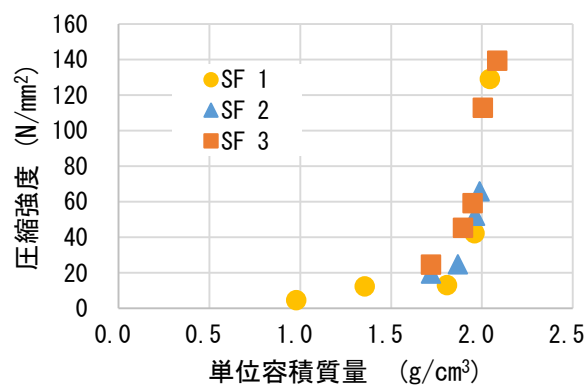


(c) SF3

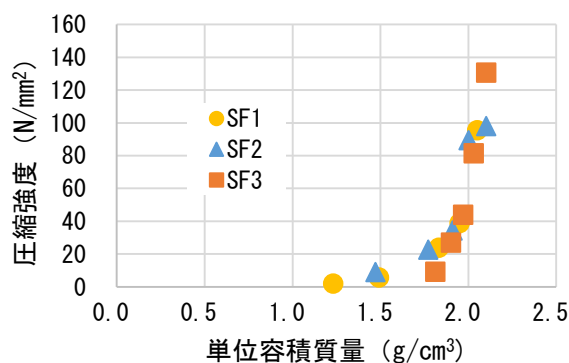
図-4.3.4.3 圧縮強度—材齢 関係

図-4.3.4.4に圧縮強度と単位容積質量の関係を、(a)に材齢1日加温養生の、(b)に材齢7日封緘養生の、(c)に材齢28日封緘養生について示す。SFの種類に関わらず、単位容積質量が低下すると圧縮強度が低下している。これは、実験Iと同様、SFのアルカリ溶液との反応で何らかの気体が発生し、供試体の膨張による圧縮強度の低下が生じたと考える。

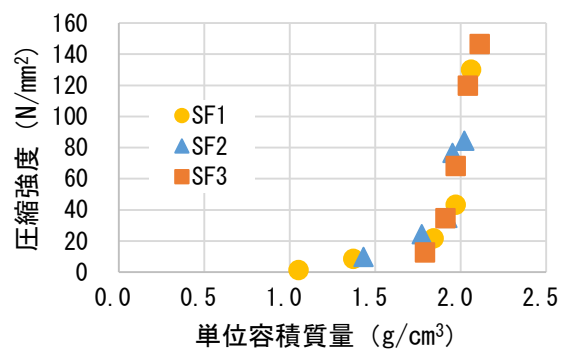
現時点では、SFによるGPペーストの膨張の原因を明らかに出来ていないが、SFの粒子が超微細粒子(0.1~10 μm)で反応しやすい形態であること、金属シリコン、金属アルミ、炭素などの含有があればアルカリ溶液と反応し、水素ガスなどの気体が発生する可能性も推察される。SF置換率が増加すると硬化反応前に大量の発泡が生じ、圧縮強度と単位容積質量の低下に結び付いたのではないかと考える。



(a) 材齢1日 加温養生



(b) 材齢7日 封緘養生



(c) 材齢 28 日 封緘養生

図-4.3.4.4 圧縮強度-単位容積質量 関係

4.4 まとめ

本章では、シリカフェームをジオポリマーの主要粉体として適用できるかどうかを調べることを目的とし、実験Ⅰでフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末にシリカフェームを置換し、練り混ぜが可能であるかどうか、流動性（フロー値）および圧縮強度について基礎的な実験を行い、実験Ⅱでは3種類のシリカフェームと高炉スラグ微粉末の比率を変え、練混ぜの可否、フロー値、および圧縮強度について基礎的な実験を行い、シリカフェームを用いたジオポリマーの基礎特性について検討した。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 1)シリカフェームの添加量を増やすと、比表面積が大きいため、ジオポリマーペーストのフロー値が減少した。
- 2)シリカフェームの添加量が増加すると、ジオポリマーペーストが膨張する傾向となる。また、膨張に伴う単位容積質量の減少が生じ、圧縮強度が低下する。
- 3)産地・起源（製造由来）の種類が異なるシリカフェームにおいても膨張することが確認された。但し、種類によって、膨張量、流動性および圧縮強度が大きく異なることが明らかになった。これはシリカフェームの成分、比表面積が異なるためであると考えられる。

第5章

微粒子粉体の高炉スラグ微粉末を添加した
ジオポリマーの基礎特性（圧縮強度およびフロー値）

5.1 概要

第4章では、超微粒子であるシリカフェームをジオポリマーの活性フィラーとして使えるか調べるために、一般的なジオポリマーの粉体（フライアッシュ、高炉スラグ微粉末）にシリカフェームを置換して、基礎的な実験を行い、シリカフェームの添加によるフロー値、および圧縮強度などの影響に関して、一定の知見を調べた。

本章では、別の微粒子粉体として、一般に添加される4000ブレーンの高炉スラグ微粉末¹⁾²⁾より細かい6000, 8000ブレーンの高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーのフロー値、凝結時間、および圧縮強度と言った基礎特性を調べることを目的とする。

5.2 実験概要

5.2.1 要因と水準

表-5.2.1に、実験の要因と水準を示す。既往の研究³⁾⁴⁾を参考に、4000ブレーンの高炉スラグ微粉末（以下、BS）で、30N/mm²以上の圧縮強度および凝結の始発時間がJIS R 5210「ポルトランドセメント」で規定される1時間以上を満たす調合とした。溶液粉体比W/Pは0.5に、溶液の種類はWG2:NH=2:1で一定とし、BS置換率を0, 20, 40%の3水準、BSの比表面積を4000, 6000, 8000の3水準設けた。

表-5.2.1 実験の要因と水準

粉体比 FA : BS (%)		BS 比表面積	溶液粉体比 (W/P=0.5)	溶液比 WG2 : NH
FA100	BS0	4000, 6000, 8000	0.5	2 : 1
FA80	BS20			
FA60	BS40			

※FA：フライアッシュ，BS：高炉スラグ微粉末，W：溶液，P：粉体，
WG2：水ガラス2号，NH：水酸化ナトリウム水溶液

5.2.2 使用材料および調合

(1) 使用材料

本実験の使用材料を表-5.2.2.1に示す。活性フィラーとして、フライアッシュ JIS I種 (以下, FA), 3種類のBS ブレーン 4000, 6000, および 8000 級を使用した。使用溶液は、水ガラス 2号の原液 (以下, WG2) および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液 (以下, NH) を用いた。

活性フィラーの蛍光 X線元素分析 (XRF) による化学成分分析結果を表-5.2.2.2に示す。FA は SiO₂ が約 63%, Al₂O₃ が約 22% で構成されており, BS はブレーン値による化学組成の差はほとんど見られず, SiO₂ が約 35%, Al₂O₃ が約 13% であった。

表-5.2.2.1 使用材料

	記号	材料名	比表面積 (cm ² /g)
粉体	FA	フライアッシュ JIS I種	5000 以上
	BS	高炉スラグ微粉末	4000
			6000
			8000
溶液	WG2	水ガラス 2号 原液	
	NH	水酸化ナトリウム水溶液 (10mol/L)	

表 5.2.2.2 活性フィラーの化学組成 (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
FA	63.38	22.16	3.77	1.04	0.03	2.53	1.32	0.55	1.44
BS4000	35.60	13.05	0.42	0.44	0.07	43.49	5.51	0.09	0.33
BS6000	35.22	12.85	0.30	0.38	0.11	41.8	6.14	0.13	0.19
BS8000	36.35	13.47	0.27	0.44	0.08	43.56	5.52	0.15	0.16

使用した活性フィラーの粒度分布を図-5.2.2.3 に示す。粒度分布は4章と同様、レーザー一回折・散乱法で測定した。

粒子径のピークから、JIS規格通りBSはブレン8000が最も細かく、続いて6000, 4000という順であった。また、FAはBS8000以下の粒子径であった。

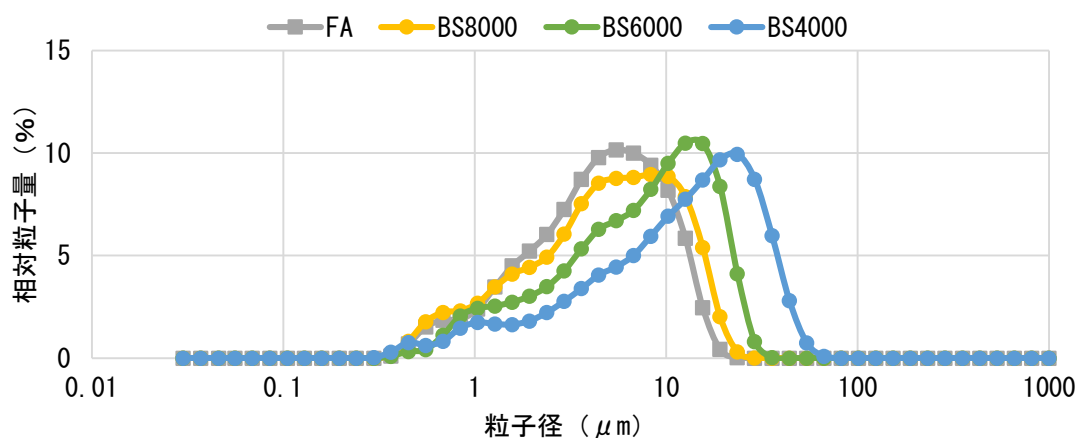


図-6.2.2 粒度分布

(2) 調合

表-5.2.2.3 に使用したジオポリマーの調合を示す。

既往の研究を参考³⁴⁾に、BS4000 ブレーンを用い、圧縮強度が 30N/mm² 以上、および凝結時間の始発が JIS R 5210 「ポルトランドセメント」で規定される 1 時間以上を満たす調合とした。

表-5.2.2.3 調合表

記号 (粉体比)	単位量 (g/L)						W/P
	FA	BS	WG2	NH	P	W	
FA100	1265.8	0.0	421.9	211.0	1265.8	632.9	0.5
FA80BS20	1036.7	259.2	432.0	216.0	1295.9	648.0	
FA60BS40	796.5	531.0	442.5	221.3	1327.5	663.8	

※FA：フライアッシュ，SF：シリカフェーム，BS：高炉スラグ微粉末，NH：水酸化ナトリウム水溶液，

WG2 水ガラス 2 号，P：粉体の合計 (P=FA+BS)，W：溶液の合計 (W=NH+WG2)

W/P：溶液粉体比 (質量比)

5.2.3 実験方法

(1) フロー試験

本実験では、圧縮強度試験および凝結時間試験において、硬化前のフレッシュ性状についてフロー値の測定を行った。フロー値は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」のモルタルフロー試験に準拠して測定した。

(2) 凝結時間試験

既往の研究を参考³⁴⁾に、供試体の作製を行った。まず粉体のみで空練りをし、その後溶液を投入し、モルタル用ハンドミキサーで60秒間練り混ぜた。その後、30秒間掻き落としを行い、さらに120秒間練り混ぜた。溶液は前日に2種類の溶液を混合した状態で粉体に投入した。その後、フロー試験を行った。

凝結時間試験は、JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠したプロクター貫入抵抗試験により測定した。プロクター貫入抵抗試験の貫入針は、断面積が25mm²のものを使用し、試験容器はφ160×160mmの円筒容器を使用した。

(3) 圧縮強度試験

凝結時間試験と同様に、既往の研究を参考³⁴⁾に、供試体の作製を行った。練混ぜ方法は溶液を入れる前に、粉体のみで空練りをし、その後溶液を投入し、モルタル用ミキサーで60秒間練混ぜた。その後、30秒間掻き落としを行い、さらに120秒間練混ぜた。なお、本実験では1バッチの練混ぜ量を2Lで行った。また、溶液は2種類を事前に混合したものを用いた。

練り混ぜ後、φ50×100mmの円柱供試体に各調合9本ずつ打ち込み養生を行った。

養生においては、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留めて封緘養生とし、以下のような温度条件下で養生を行った。

材齢1日は60℃で27時間の加温養生とした。材齢7、28日は、20℃、60%のR.H.の環境の養生を行った。

養生後、供試体は研磨機で研磨し、端面を平滑にした。

研磨後、硬化後の供試体に対して、材齢1、7、28日における圧縮強度試験を行った。

5.3 実験結果および考察

5.3.1 フロー試験

表-5.3.1.1 にフロー試験結果を、図-5.3.1 に BS が粉体に占める割合 (以下, BS 置換率) とフロー値の関係を、表-5.3.1.2 にフロー試験の写真を示す。結果より, 比表面積が大きいほど, フロー値は減少する傾向が見られる。これは, 比表面積が大きいほど溶液との接触面積が大きくなるため, 粘性が高くなりフロー値が減少したと考えられる。

また BS の比表面積が同じ場合, 本実験の範囲では, BS 置換率によるフロー値への影響はほとんど見られなかった。

表-5.3.1.1 フロー試験

調合	BS プレーン	フロー値	平均フロー値
FA100		287×292	290
FA80BS20	4000	300×300*	300*
	6000	286×287	287
	8000	268×265	267
FA60BS40	4000	300×300*	300*
	6000	269×292	280
	8000	263×268	266

*: フロー値が 300mm を超えたものを示す。

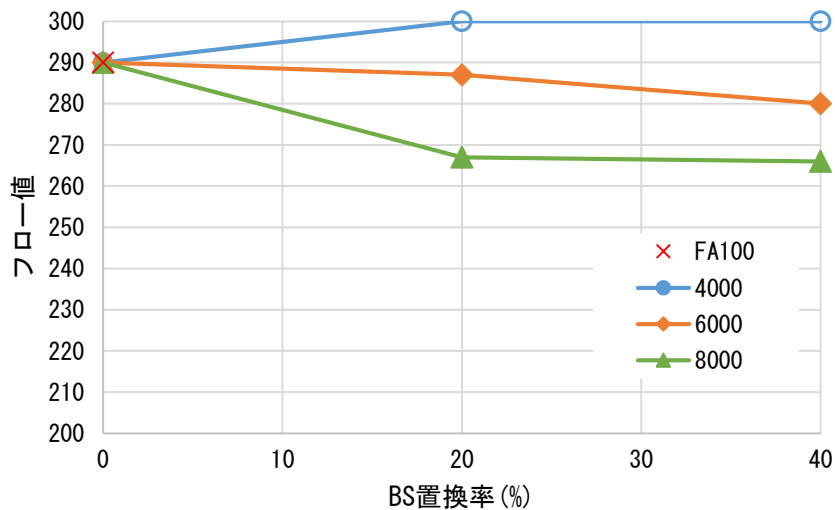









図-5.3.1 フロー試験結果

表-5.3.1.2 フロー試験 写真

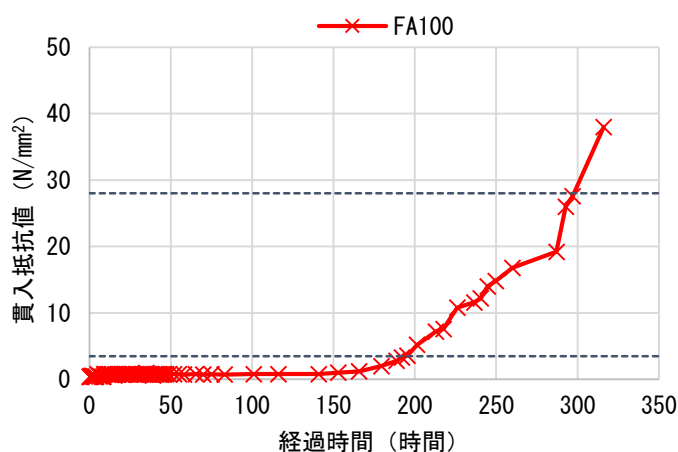
	BS ブレーン		
	4000	6000	8000
FA100			
FA80BS20			
FA60BS40			

5.3.2 凝結時間試験

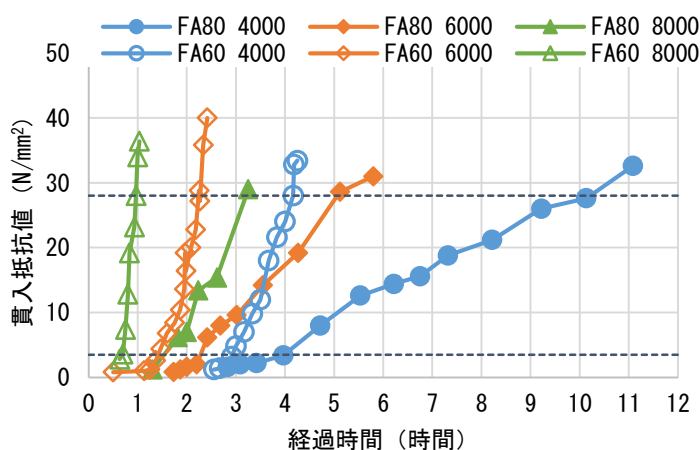
表-5.3.2に、各調合における凝結の始発・終結時間の結果を示す。また図-5.3.2.1(a)にFA100%の場合、(b)にBS置換率20~40%の場合の貫入抵抗値の時刻歴を、図-5.3.2.2(a)に圧縮強度と凝結時間の関係（始発時間）を、(b)に終結時間との関係を示す。

表-5.3.2 プロクター貫入抵抗値試験結果

	FA100	FA80BS20			FA60BS40		
		BS4000	BS6000	BS8000	BS4000	BS6000	BS8000
始発時間	194 時間	3 時間 59 分	2 時間 17 分	1 時間 32 分	2 時間 56 分	1 時間 25 分	42 分
終結時間	294 時間	10 時間 13 分	5 時間 4 分	3 時間 12 分	4 時間 10 分	2 時間 14 分	58 分

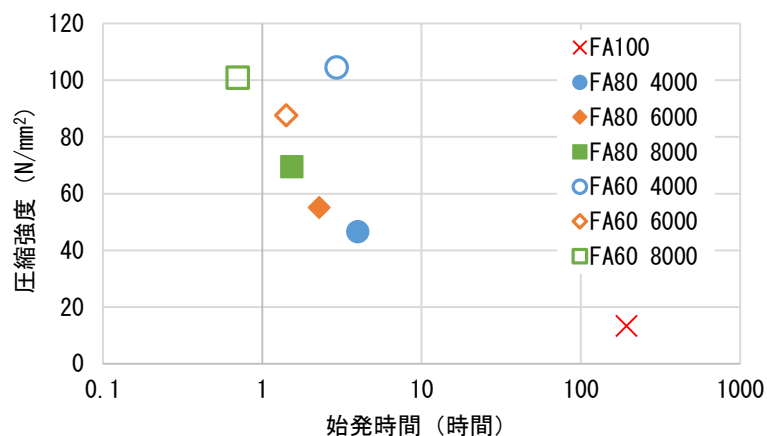


(a) FA100

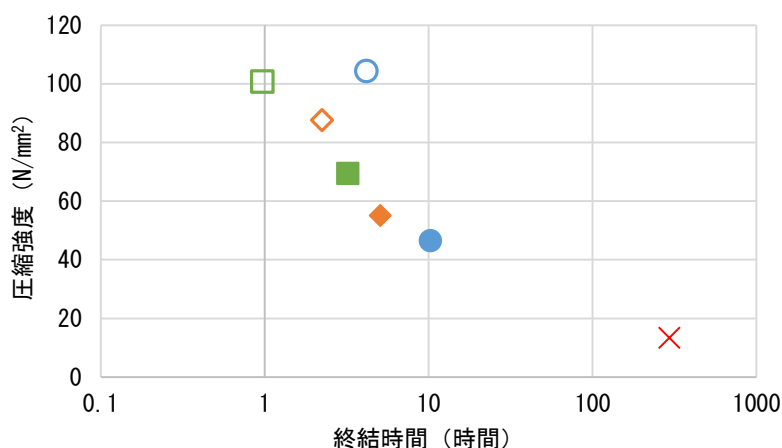


(b) FA80BS20 および FA60BS40

図-5.3.2.1 貫入抵抗値の時刻歴



(a) 凝結時間 始発



(b) 凝結時間 終結

図-5.3.2.2 圧縮強度—凝結時間 関係

表-5.3.2 より，FA100 は凝結時間の始発が 197 時間（約 8 日），終結が 294 時間（約 12 日）と，BS 置換率 20%以上では最も長い調合（FA80BS20 4000 ブレーン）で終結が 10 時間と比較して，凝結時間が長い結果となった。

また図-5.3.2.1 (b) より，凝結時間は BS 置換率が大きいほど，比表面積が大きいほど短くなった。始発後の貫入抵抗値の変化量は，BS 置換率が大きいほど大きく，急激に増加している。これは BS が早期強度発現性を有しているためだと考えられる。また，始発時間は比表面積が大きいほど早くなる傾向が見られた。これは比表面積が大きいほど溶液との接触面積が大きくなり，反応量が多くなったためだと考える。

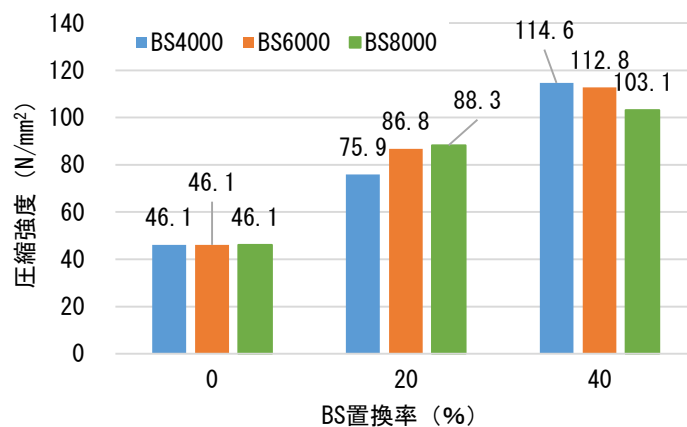
図-5.3.2.2 より圧縮強度と始発・終結時間の関係は，反比例の関係にあり，既往の研究³⁾と同様の傾向を確認した。

5.3.3 圧縮強度試験

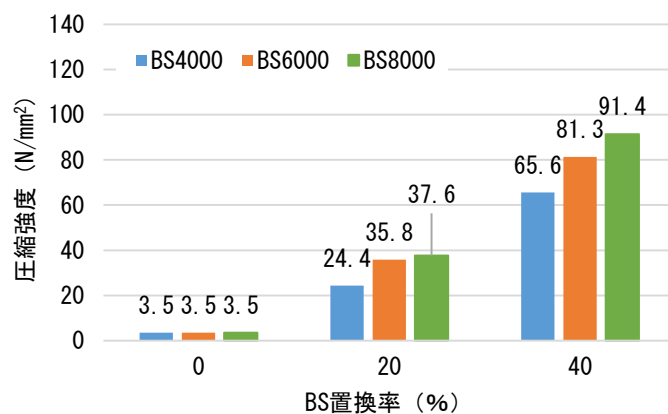
図-5.3.3.1 に圧縮強度と BS 置換率の関係を示す。(a)は材齢 1 日加温養生, (b)は材齢 7 日封緘養生, (c)は材齢 28 日封緘養生である。すべての材齢, 養生条件で BS 置換率が大きくなるほど, 圧縮強度は大きくなっている。BS 置換率 20%では, BS の比表面積が大きくなるほど, 圧縮強度も増加する傾向が見られるが, BS 置換率 40%では, 材齢 7 日封緘養生のみ圧縮強度が増加し, 材齢 1 日加温養生および材齢 28 日封緘養生ではその傾向は見られない結果となった。

図-5.3.3.2 に FA 置換率ごとの圧縮強度と材齢の関係を示す。(a)は FA100, (b)は FA80BS20, (c)は FA60BS40 の比率である。また, 図-5.3.3.3 にブレンごとの材齢と圧縮強度の関係を示す。(a)に 4000 ブレン, (b)に 6000 ブレン, そして(c)に 8000 ブレンを示す。なお, 材齢 1 日は加温養生, 材齢 7, 28 日は常温養生である。

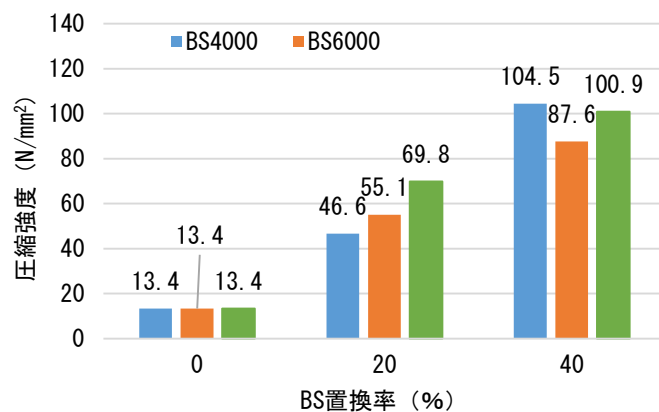
図-5.3.3.2 および図-5.3.3.3 より, 本実験においても加温養生による圧縮強度の向上効果が確認された。また, 材齢 7 日から 28 日かけて比表面積の大きさに関係なく圧縮強度の増加傾向が確認された。



(a) 材齢1日 加温養生

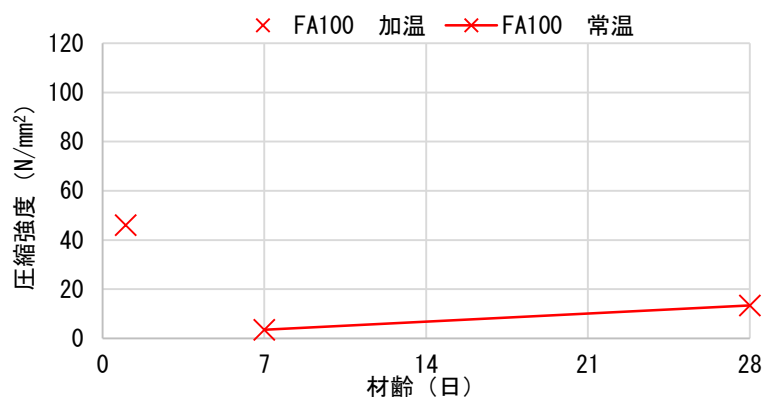


(b) 材齢7日 封緘養生

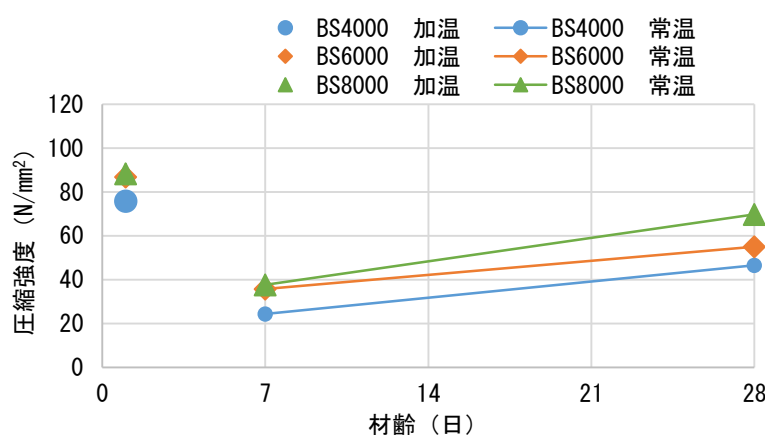


(c) 材齢28日 封緘養生

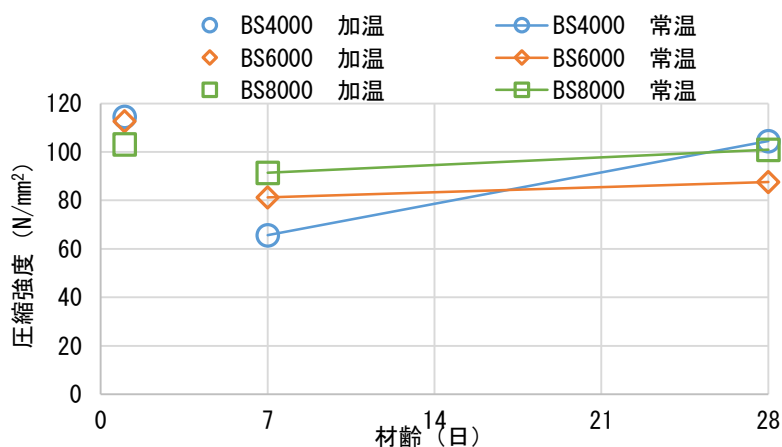
図-5.3.3.1 圧縮強度—BS置換率 関係



(a) FA100

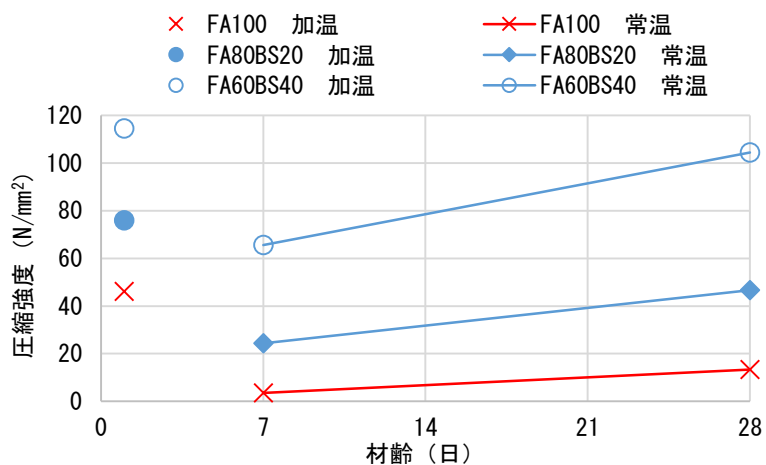


(b) FA80BS20

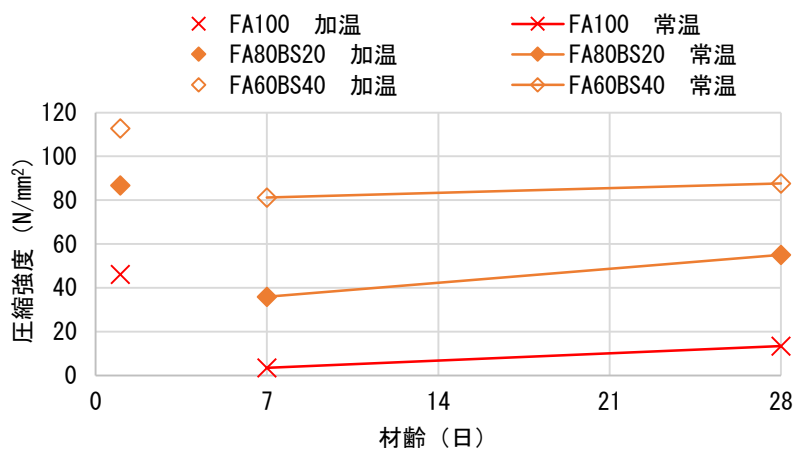


(c) FA60BS40

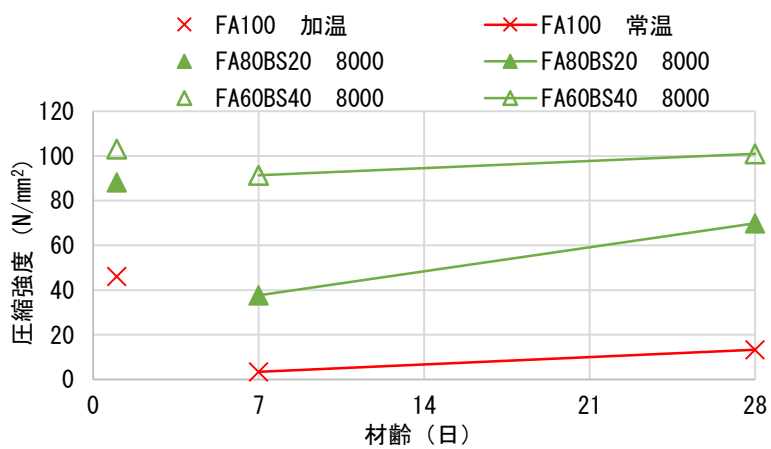
図-5.3.3.2 圧縮強度-材齢 関係 (FA 置換率ごと)



(a) 4000 ブレーン



(b) 6000 ブレーン



(c) 8000 ブレーン

図-5.3.3.3 圧縮強度-材齢 関係 (ブレーンごと)

図-5.3.3.4に圧縮強度と単位容積質量の関係を示す。BS 置換率およびブレンを変化した調合においても、単位容積質量が大きいほど圧縮強度が大きくなる傾向が見られた。

BS 置換率が高いほど、単位容積質量も増加し圧縮強度が増加していることから、BS により緻密化したと考えられる。

また BS の比表面積による単位容積質量への影響は見られなかった。

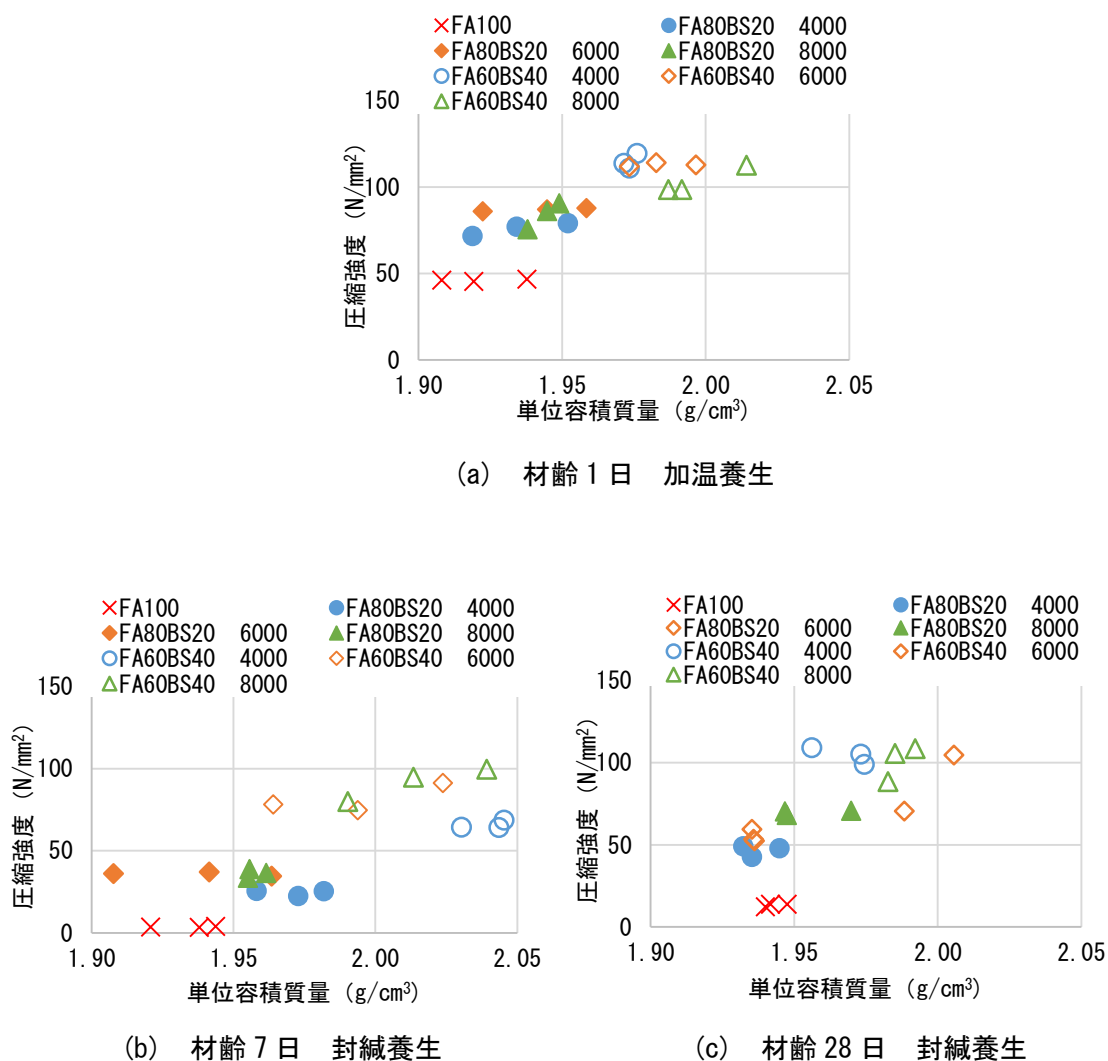


図-5.3.3.4 圧縮強度—単位容積質量 関係

5.4 まとめ

本章では、フライアッシュに比表面積の大きさが異なる高炉スラグ微粉末を置換し、ジオポリマーペーストのフロー値、凝結時間、および圧縮強度に与える影響を調べた。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 1)高炉スラグ微粉末の比表面積が大きくなるほど、粘性が高くなり、フロー値は減少する。
しかし、高炉スラグ微粉末の比表面積が同一の場合、高炉スラグ微粉末置換率(20~40%)による影響はほとんど見られず、同程度のフロー値となった。
- 2)高炉スラグ微粉末(4000, 6000, 8000)置換率(20~40%)で、凝結時間が短いほど、圧縮強度は高くなる傾向がある。
- 3)高炉スラグ微粉末の置換率が小さいほど、凝結の始発からの貫入抵抗値の変化量は高炉スラグ微粉末の影響を大きく受ける。
- 4)高炉スラグ微粉末の置換率およびブレン値を変化させても、圧縮強度と単位容積質量に相関が見られた。
- 5)高炉スラグ微粉末の置換率が増えると単位容積質量が増加することが確認された。

第6章

微粒子粉体（高炉スラグ微粉末・シリカフェーム）を添加した ジオポリマーのひび割れ注入実験

6.1 概要

第4章でシリカフューム（以下，SF）の，第5章で比表面積の異なる（ブレーン値：4000，6000，8000）高炉スラグ微粉末（以下，BS）の基礎特性（フロー値，圧縮強度）について調べた。

この結果から，圧縮強度 40N/mm²を超えた調合，および溶液を変更し注入が期待できる調合を用い，塩ビ板による擬似ひび割れ注入実験を行い，実験装置の問題点と注入性に与える要因の確認を行った。

6.2 実験の要因と水準

表-6.2.1に実験の要因と水準を示す。フライアッシュ（以下，FA）に高炉スラグ微粉末を添加したFA-BS系と，SFとBSを用いたSF-BS系の2水準とし，FA-BS系ではFA置換率100，80，60%の3水準，BSの比表面積を4000，6000，8000の3水準設けた。また，W/P=0.5を基本とし，FA置換率60%の場合のみW/P=0.7についても行った。SF-BS系では，SF置換率60，40%の2水準とした。比較のため，市販の無機系補修材料も注入を行う。

表-6.2.1 実験の要因と水準

種類	粉体比 FA(SF):BS(%)		BS 比表面積	溶液粉体比 (W/P)	溶液比 (WG2:NH)
	FA100	BS0			
FA-BS系	FA80	BS20	4000	0.5	2 : 1
			6000		
			8000		
	FA60	BS40	4000	0.5, 0.7	
			6000		
			8000		
SF-BS系	SF60	BS40	4000	0.5, 0.7	
	SF40	BS60			
無機系*1	超微粒子高性能ポリマーセメント系注入材				

[注] *1：市販の無機系補修材料

6.3 使用材料および調合

6.3.1 使用材料

表-6.3.1.1 に本実験のジオポリマーの使用材料を示す。FA は5章で用いたものと同様に JIS I種を、SF3 は4章で用いた SF3 と同一のものを使用した。BS も5章と同様に 4000, 6000, 8000 ブレーンの3種類用いた。溶液は、水ガラス2号の原液（以下、WG2）および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液（以下、NH）を使用した。

表-6.3.1.2 に活性フィラーの蛍光 X線分析（XRF）による粉体の化学組成を示す。FA は SiO₂ が約 63.4%、Al₂O₃ が約 22.2% で構成されており、BS は CaO が約 43% で、次に SiO₂ が約 35% であった。BS のブレーンによる化学組成の差はほとんど見られなかった。

表-6.3.1.1 ジオポリマーの使用材料

種別	略号	材料名	比表面積 (cm ² /g)
粉体 (P)	FA*1	フライアッシュ JIS I種	5000以上
	BS4000	高炉スラグ微粉末 (JIS A 6206)	4000
	BS6000		6000
	BS8000		8000
	SF3*2	シリカフェーム (JIS A 6207)	
溶液 (W)	WG2	水ガラス2号 原液	
	NH	水酸化ナトリウム水溶液(10mol/L)	

[注] *1 : 5章で用いた FA と同一

*2 : 4章で用いた SF3 と同一

表-6.3.1.2 活性フィラーの化学組成 (%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	ZrO ₂ + HfO ₂
FA	63.38	22.16	3.77	1.04	0.03	2.53	1.32	0.55	1.44	—
BS4000	35.6	13.05	0.42	0.44	0.07	43.49	5.51	0.09	0.33	—
BS6000	35.22	12.85	0.30	0.38	0.11	41.8	6.14	0.13	0.19	—
BS8000	36.35	13.47	0.27	0.44	0.08	43.56	5.52	0.15	0.16	—
SF3	96.50	0.26	0.27	0.02	—	0.03	0.02	0.01	0.10	2.34

図-6.3.1 に使用した活性フィラーの粒度分布を示す。粒度分布は、レーザー回折・散乱法で測定を行った。粒子径のピークから、規格通り BS はブレン 8000 が最も細かく、続いて 6000，そして 4000 という順であった。また，FA は BS8000 と同等またはより細かい粒径であり，SF は最も細かい材料である。

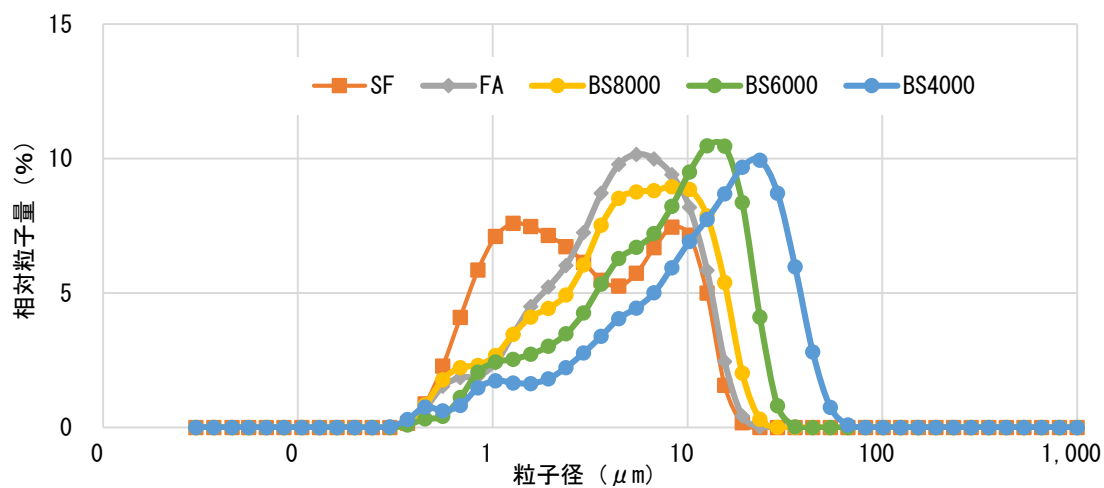


図-6.3.1 粒度分布

6.3.2 ジオポリマーの調合

表-6.3.2.1に W/P=0.5 の場合、表-6.3.2.2に W/P=0.7 の場合に使用したジオポリマーの調合表を示す。BS はすべてのブレン値で同じ調合を用いた。

表-6.3.2.1 調合表 (W/P=0.5)

	記号 (粉体比)	単位量 (g/L)							W/P
		FA	SF	BS	WG2	NH	P	W	
FA-BS 系	FA100	1265.8	0.0	0.0	421.9	211.0	1265.8	632.9	0.5
	FA80BS20	1036.7	0.0	259.2	432.0	216.0	1295.9	648.0	
	FA60BS40	796.5	0.0	531.0	442.5	221.3	1327.5	663.8	
SF-BS 系	SF60BS40	0.0	797.7	531.8	443.2	221.6	1329.5	664.8	
	SF40BS60	0.0	544.8	817.3	454.0	227.0	1362.1	681.1	

※FA：フライアッシュ、SF：シリカフェーム、BS：高炉スラグ微粉末、

WG2：水ガラス2号、NH：水酸化ナトリウム水溶液

P：粉体の合計 P=(FAまたはSF)+BS、W：溶液の合計 W=WG2+NH

W/P：溶液粉体比（質量比）

表-6.3.2.2 調合表 (W/P=0.7)

	記号 (粉体比)	単位量 (g/L)							W/P
		FA	SF	BS	WG2	NH	P	W	
FA-BS 系	FA60BS40	670.7	0.0	447.1	521.6	260.8	1117.8	782.5	0.7
SF-BS 系	SF60BS40	0.0	671.5	447.7	522.3	261.2	1119.2	783.5	
	SF40BS60	0.0	456.9	685.3	533.0	266.5	1142.2	799.6	

6.3.3 無機系補修材料の調合

表-6.3.3に無機系補修材料の調合表を示す。注入幅によって調合が異なっており、本実験では0.2~0.5mm用の調合で行った。

表-6.3.3 調合表

	調合比	実施調合(g)
粉体	15	300
混和液	2	40
水	6	120

6.4 実験方法

6.4.1 ジオポリマーの練混ぜ方法

溶液は前日に WG2 と NH を質量比で 2 : 1 となるように混ぜ、20℃、60% R.H.の養生室で保管したものをを用いた。

溶液を入れる前に粉体のみを予め空練りした後、溶液を投入し、手練りで 60 秒間練り混ぜた。その後、30 秒間掻き落としを行い、さらに 120 秒間手練した。

なお本実験では、1 バッチの練混ぜ量を 60ml とした。

6.4.2 無機系補修材料の練混ぜ方法

容器に水と混和液を入れ、粉体を投入し、市販のミキサーで粉体の玉がなくなるまで攪拌した。細かい気泡が無くなるまで静置する。

6.4.3 試験体作製方法

図-6.4.3.1 に試験体寸法を、図-6.4.3.2 に試験体断面図を、写真-6.4.3 に実際の試験体を示す。既往の研究を参考に、塩ビ板を用い擬似的にひび割れを作製した。

作製方法は、300mm×300mm の塩ビ板（厚さ 5mm）を 2 枚用意し、その間に設定ひび割れ幅である 0.2mm のテフロンシートを挟み、5箇所をボルトでしっかりと締める。注入座金を置くためにL字金具をサポートにし、アクリル板を直角に当て、接着剤で接着する。（図-6.4.3.2 参照）その後、12個のクリップを周囲に止めた後、スケールルーペで注入口の幅を測定し、所定の幅となっているか確認する。確認後、注入口およびその周辺をシーリングし、シーリング硬化後（24時間以上放置）、注入試験を行った。

注入試験はゴムの本数および注入量で注入圧力を調整するタイプの注入器具を用いた。注入圧力はゴム本数4本、注入量50ml（およそ0.2MPa）とした。

測定項目は、所定のひび割れ幅への注入の可否と5cmごとの到達時間を調べた。本実験では、ひび割れ注入工法は幅0.2~1.0mmの範囲で適用されることから、その最小ひび割れ幅である0.2mmに設定し、実験を行った。

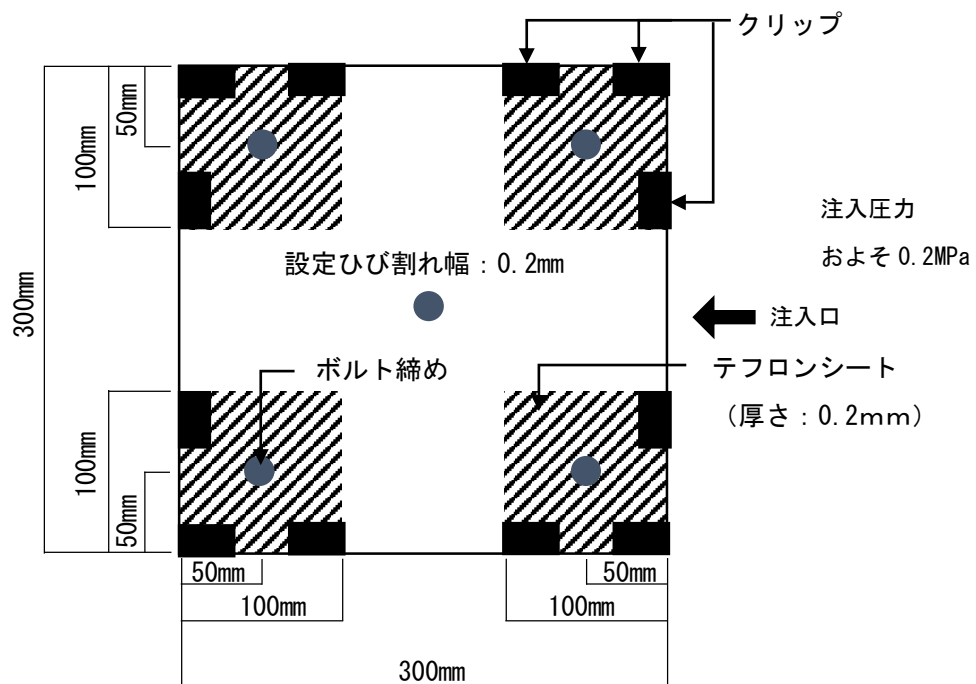


図-6.4.3.1 擬似ひび割れ試験体 概要図

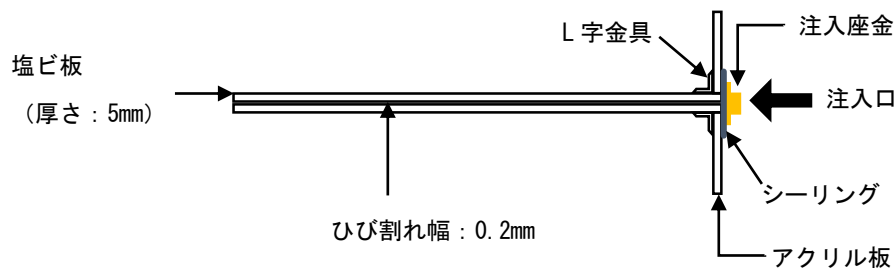


図-6.4.3.2 擬似ひび割れ試験体 断面図

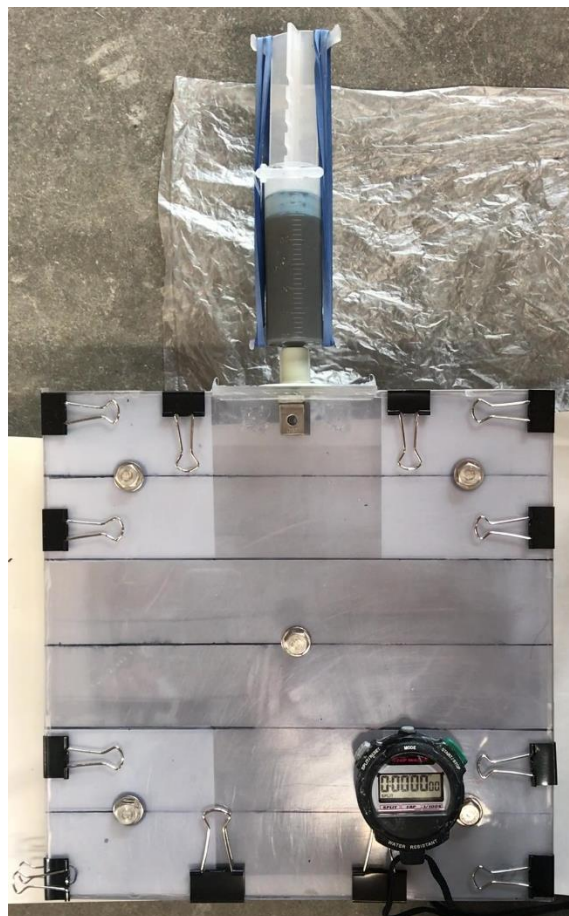


写真-6.4.3 擬似ひび割れ試験体

6.5 実験結果

6.5.1 FA-BS系 W/P=0.5の場合

写真-6.5.1.1に代表的な注入試験の結果として、FA100の様子を示す。表-6.5.1にFA-BS系 W/P=0.5の注入試験の結果を示す。この結果より、本実験で用いたジオポリマーは、0.2mmのひび割れ幅に入るが、5cm程度までしか入らない結果となった。

写真-6.5.1.2に表-6.5.1の×であったFA80BS20（6000ブレーン）の試験結果を示す。ひび割れ幅0.2mmには注入出来ているが、5cmには到達しなかった。

注入深さが少なかった原因として、本実験に用いたGPの粘性が高かったことが原因であると考えられる。

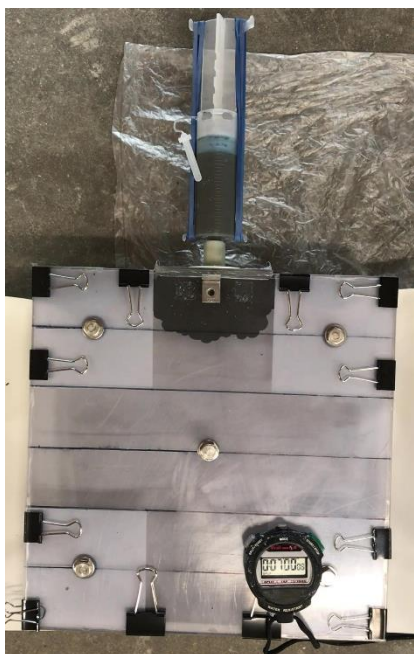


写真-6.5.1.1 FA100 注入試験結果

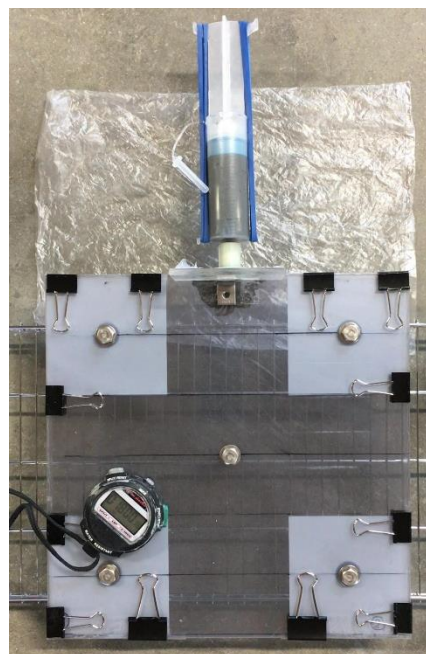


写真-6.5.1.2 FA80BS20 (6000)
注入試験結果 (× : 5 cm未達)

表-6.5.1 注入試験結果

	FA100	FA80BS20			FA60BS40		
		BS4000	BS6000	BS8000	BS4000	BS6000	BS8000
注入深さ	5cm	5cm	×	5cm	5cm	10cm	5cm

6.5.2 FA-BS系 W/P=0.7の場合

写真-6.5.2に代表的な注入実験の結果として、FA60BS40（6000ブレーン）の様子を、
表-6.5.2に注入試験結果を示す。

この結果より、BSの比表面積に関わらず、全ての調合において最大30cmの注入が可能であった。W/P=0.5からW/P=0.7に溶液量が増えたことで粘性が低下し、より深くまで注入できたと考えられる。

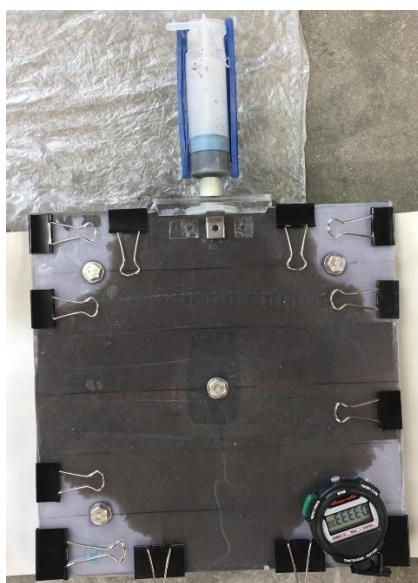


写真-6.5.2 FA60BS40（6000）
注入試験結果

表 6.5.2 注入試験結果

	FA60BS40		
	BS4000	BS6000	BS8000
注入深さ	30 cm	30 cm	30 cm

6.5.3 SF-BS系

表-6.5.3にSF-BS系の注入試験結果を示す。

W/P=0.7の調合は粉体比に関係なく、設定ひび割れ幅2mmに注入可能であった。

W/P=0.5の調合では、SF40BS60は粘性が高く、設定ひび割れ幅2mmに注入はできた
が、5cmには到達しなかった。

表-6.5.3 注入試験結果

注入深さ (cm)	W/P=0.7		W/P=0.5	
	SF60BS40	SF40BS60	SF60BS40	SF40BS60
	BS4000			
	到達時間(s)			
5	4	5	53	×
10	11	18	140	
15	17	51	224	
20	55	119	332	
25	*	370	*	
30	*	×	*	

[注] *注入口付近のシーリングから漏れているため、注入完了しているが30cmまで到達しなかった

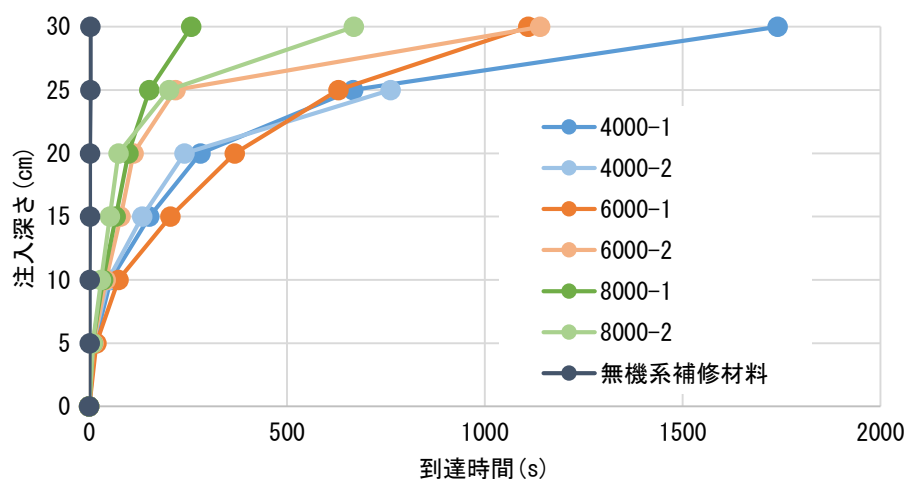
6.5.4 注入深さと到達時間の関係

図-6.5.4に注入深さと到達時間の関係を、(a)にFA-BS系として、FA60BS40 (W/P=0.7) の4000, 6000, 8000 ブレーンの各2回の結果と比較のために無機系補修材料の結果を、(b)にSF-BS系として、BS4000 ブレーンのSF60BS40 (W/P=0.5, 0.7) およびSF40BS60 (W/P=0.7) の結果を、比較のために同じくBS4000 ブレーンのFA60BS40 (W/P=0.7) の結果および無機系補修材料の結果を示す。

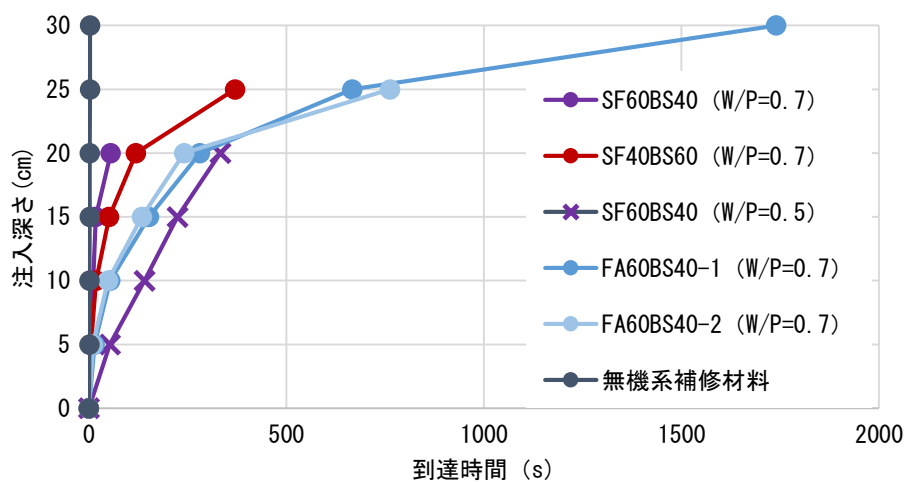
(a)より、注入完了（注入深さ 30 cm）までの到達時間は、比表面積が大きいほど早い結果となった。また、浸透速度は注入深さが深くなるにつれて遅くなり、比表面積が小さいほど、その傾向は顕著となった。

(b)より、SF60BS40 と SF40BS60 を比較すると、SF 量が多い、SF60BS40 の浸透速度が速い結果となった。SF60BS40 と FA60BS40 (W/P=0.7) を比較すると SF60BS40 の浸透速度が速い結果となった。このことから、粒径が細かいと浸透速度に影響を与えていると考えられる。また、SF60BS40 の W/P=0.7 と 0.5 を比較すると溶液量の多い方が、浸透速度が速い結果となった。

(a), (b)ともに、市販で用いられている無機系補修材料の浸透速度が最も速い結果となった。



(a) FA-BS系 (FA60BS40) (W/P=0.7)



(b) SF-BS系 (BS4000)

図-6.5.4 注入深さ-到達時間 関係

6.5 まとめ

本章では、ひび割れを簡易的にモデル化し、塩ビ板を用いた擬似ひび割れ注入実験を行った。本章で得られた結果をまとめると、以下のようなになる。

- 1) W/P=0.5 の場合、塩ビ板擬似ひび割れ試験体には注入深さ 5cm 程度であったが、W/P=0.7 の場合、注入深さ 30cm まで注入できた。溶液粉体比を増やすことで、粘性が低下し注入性能が向上した。
- 2) 擬似ひび割れ試験では、同じ高炉スラグ微粉末置換率ならば、BS の比表面積による注入深さへの影響は見られなかったが、浸透速度に対して、比表面積が大きいほど、速くなり、注入深さが深くなるほど、顕著になった。
- 3) 活性フィラーにフライアッシュ JIS I 種を用いるより、シリカフェームを用いた方が浸透速度は速くなる傾向がみられた。

第7章

総括

7.1 本研究の総括

本研究では、ジオポリマーをひび割れ補修材として活用することを目的とし、以下の流れで実験を行い検討した。第3章では、一般的なジオポリマーのコンクリートとの付着特性について調べ、第4章、第5章で微粒子粉体を用いたジオポリマーペーストの基礎特性を調べ、その後第6章で擬似ひび割れを作製し、注入実験を行い、微粒子粉体がひび割れ注入性能に及ぼす影響について検討を行った。以下に、本論文の第2章から第7章において既に既述した各章のまとめを再掲する。

第2章 既往の研究

本章では、微粒子粉体を用い、ジオポリマーのひび割れ補修材としての適用に関する研究を行う前段階として、ジオポリマーの基本事項、微粒子粉体の概要、微粒子粉体を用いたジオポリマーの研究、微粒子粉体を用いたジオポリマーの研究、およびひび割れ補修に関する基本事項・既往の研究を整理した。

ジオポリマーは、製造工程においてセメントを使用せず、産業副産物を主原料とすることから環境に優しい材としてセメント代替材料として期待されており、近年研究が活発化しており、ジオポリマーの強度発現、凝結時間、各種抵抗性などの多くの研究がなされている。現在、使用材料（特にフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を出発粉体とする）による傾向が見えてきており、ジオポリマーの実用化に向けた研究が行われ始めてきた。

さらに、ジオポリマーのひび割れ補修材として用いるため、微粒子粉体であるシリカフェームと高炉スラグ微粉末 6000, 8000 ブレーンに着目し、特徴とジオポリマーの研究についてまとめた。シリカフェームは混和剤としての（添加率 5~10%）少量のみの使用で活性フィラーとして用いた研究はなかった。また、高炉スラグ微粉末 6000, 8000 ブレーンを活性フィラーとして用いた研究も少ない現状であった。

またジオポリマーのひび割れ補修材への活用に向けて、現在使われている補修材を種類別に分け、特徴をまとめた。現在、有機系と無機系に大別され、それぞれが長所と短所があり、ひび割れの発生原因や発生時状況などによって、使い分けられている。

そこで、粘性が高く垂れが生じにくく、凝結時間が短く、耐久性に優れるジオポリマーをひび割れ補修材として活用するために、ひび割れ注入性状に優れたジオポリマーの研究の初期段階として、微粒子粉体を活性フィラーとして用い、ジオポリマーの実用化に向けた研究の一助となるべく、データを蓄積することを目的とし、検討を行っていく。

第3章 ジオポリマーを補修材として活用するための初期実験

本章では、一般的なジオポリマーである高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーとコンクリートの付着特性を調べるために傾斜せん断試験を行った。本章で得られた結果を以下にまとめる。

1)コンクリートと同一強度のジオポリマーは同一強度の補修用無収縮モルタルと同等以上の付着強度を示した。

- 2) ジオポリマーは無収縮モルタルと比べて、ドライアウトの影響が受けにくいことが確認された。
- 3) ジオポリマーはセメント系とは逆に、湿潤状態より乾燥状態の方が付着強度は高くなる可能性を明らかにした。

第4章 超微粒子粉体のシリカフェームを添加したジオポリマーの基礎特性

本章では、シリカフェームをジオポリマーの主要粉体として適用できるかどうかを調べることを目的とし、実験Ⅰでフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末にシリカフェームを置換し、練り混ぜが可能であるかどうか、流動性（フロー値）および圧縮強度について基礎的な実験を行い、実験Ⅱでは3種類のシリカフェームと高炉スラグ微粉末の比率を変え、練混ぜの可否、フロー値、および圧縮強度について基礎的な実験を行い、シリカフェームを用いたジオポリマーの基礎特性について検討した。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) シリカフェームの添加量を増やすと、比表面積が大きいため、ジオポリマーペーストのフロー値が減少した。
- 2) シリカフェームの添加量が増加すると、ジオポリマーペーストが膨張する傾向となる。また、膨張に伴う単位容積質量の減少が生じ、圧縮強度が低下する。
- 3) 産地・起源（製造由来）の種類が異なるシリカフェームにおいても膨張することが確認された。但し、種類によって、膨張量、流動性および圧縮強度が大きく異なることが明らかになった。これはシリカフェームの成分、比表面積が異なるためであると考えられる。

第5章 微粒子粉体の高炉スラグ微粉末を添加したジオポリマーの基礎特性

本章では、フライアッシュに比表面積の大きさが異なる高炉スラグ微粉末を置換し、ジオポリマーペーストのフロー値、凝結時間、および圧縮強度に与える影響を調べた。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 高炉スラグ微粉末の比表面積が大きくなるほど、粘性が高くなり、フロー値は減少する。しかし、高炉スラグ微粉末の比表面積が同一の場合、高炉スラグ微粉末置換率（20~40%）による影響はほとんど見られず、同程度のフロー値となった。
- 2) 高炉スラグ微粉末（4000, 6000, 8000）置換率（20~40%）で、凝結時間が短いほど、圧縮強度は高くなる傾向がある。
- 3) 高炉スラグ微粉末の置換率が小さいほど、凝結の始発からの貫入抵抗値の変化量は高炉スラグ微粉末の影響を大きく受ける。
- 4) 高炉スラグ微粉末の置換率およびブレン値を変化させても、圧縮強度と単位容積質量に相関が見られた。
- 5) 高炉スラグ微粉末の置換率が増えると単位容積質量が増加することが確認された。

第6章 微粒子粉体（高炉スラグ微粉末・シリカフェーム）を添加したジオポリマーのひび割れ注入実験

本章では、ひび割れを簡易的にモデル化し、塩ビ板を用いた擬似ひび割れ注入実験を行った。本章で得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) W/P=0.5 の場合、塩ビ板擬似ひび割れ試験体には注入深さ 5cm 程度であったが、W/P=0.7 の場合、注入深さ 30cm まで注入できた。溶液粉体比を増やすことで、粘性が低下し注入性能が向上した。
- 2) 擬似ひび割れ試験では、同じ高炉スラグ微粉末置換率ならば、BS の比表面積による注入深さへの影響は見られなかったが、浸透速度に対して、比表面積が大きいほど、速くなり、注入深さが深くなるほど、顕著になった。
- 3) 活性フィラーにフライアッシュ JIS I 種を用いるより、シリカフェームを用いた方が浸透速度は速くなる傾向がみられた。

7.2 今後の課題

本論文において、微粒子粉体を用いたジオポリマーの基礎特性と擬似的なひび割れを作製し、ひび割れ注入性能を調べたが、以下に示すようないくつかの課題が残されている。

第4章において、シリカフェームの産地・起源（製造由来）の種類によって膨張量、流動性および圧縮強度が大きく異なることが明らかになったが、シリカフェームの粒径、pH、分散性、化学成分などの何に影響を受けているかを調べる必要がある。

第6章において、ジオポリマーは無機系補修材料に比べ、注入性が劣っているため、溶液粉体比、溶液の種類などの使用材料および粘性や粒子などの材料特性の注入性に及ぼす影響を検討する必要がある。

この他にも、ジオポリマーのひび割れ補修材としての活用に向けて、付着性、収縮量、耐久性、施工性、注入器具および注入圧の選定など、多くの検討を行う必要がある。

本研究が、今後の研究の一助になることを願う。

付録

～コンクリートへの注入実験～

【付録】コンクリートへの注入実験

本実験では、GP のコンクリートへの注入性能を確認するため、実際のコンクリートで擬似的なひび割れを作製し、GP と市販の無機系補修材を注入した。

1. 実験の要因と水準

表-1 に本実験の要因と水準を示す。本実験では、GP の注入性能を知るための初期実験であるため、実験 I では、6 章の実験で注入深さ 30cm まで到達し浸透速度が最も速かった調合である FA60BS40 の BS8000 ブレーンでコンクリートに注入を行った。実験 I の結果より、凝結時間が短い可能性があるため、実験 II では凝結時間がより長い FA60BS40 の BS4000 ブレーン、収縮および粘性を調整した特殊溶液を用いた FA80BS20 (4000 ブレーン)、および市販の無機系補修材を用いた。

ひび割れ幅は同じ条件で作製した供試体の注入口付近のひび割れ幅をスケールルーペで測定しサイズごとに振り分けた。ひび割れ幅は 0.2mm を基準とし、FA60BS40 (8000 ブレーン) は 0.4mm を、それ以外の注入材料は 0.1mm にも注入を行った。注入器具は、ゴムによる注入とバネによる注入の 2 水準とした。

表-1 実験の要因と水準

	注入材料				ひび割れ幅	注入器具
	FA:BS	BS ブレーン	W/P	W		
実験 I	FA60BS40	8000	0.7	WG2 : NH=2 : 1	0.4mm, 0.2mm	ゴム
実験 II	FA60BS40	4000				
		FA80BS20	4000	0.8	特殊*	0.2mm, 0.1mm
	無機系補修材					

[注] FA : フライアッシュ, BS : 高炉スラグ微粉末, W/P : 溶液粉体比, W : 溶液,

WG2 : 水ガラス 2 号, NH : 水酸化ナトリウム水溶液

*ひび割れ注入材を目的とし、GP の収縮、粘性を低下させるために、共同研究を行っている企業が調整した特殊溶液

2. 使用材料および調合

2.1 注入材料

GP の使用粉体は第 6 章と同一のものを用いた。なお、GP の使用溶液は、FA60BS40 は実験 I と同一のものを、FA80BS20 はひび割れ注入材を目的として、収縮量および粘性を低下させるために調整した特殊溶液で、企業秘密のため本論文では詳細な調合は記述しない。無機系補修材も実験 I と同一のものである。

表-2.1 に FA60BS40 の調合表を、表-2.2 に無機系補修材の調合表を示す。

表-2.1 FA60BS40 (W/P=0.7) 調合表

記号 (粉体比)	単分量 (g/L)						
	FA	SF	BS	WG2	NH	P	W
FA60BS40	670.7	0.0	447.1	521.6	260.8	1117.8	782.5

※FA：フライアッシュ，SF：シリカフェーム，BS：高炉スラグ微粉末，

WG2：水ガラス 2 号，NH：水酸化ナトリウム水溶液

P：粉体の合計 (P=FA または SF+BS)，W：溶液の合計 (W=WG2+NH)

表-2.2 無機系補修材 調合表

	調合比	実施調合 (g)
粉体	15	300
混和液	2	40
水	6	120

2.2 母材コンクリート

表-2.3 にコンクリートに使用した材料を，セメントは普通ポルトランドセメントを使用し，細骨材には三重県桑名市町屋川産の川砂，粗骨材には三重県志摩産の砕石，また化学混和剤には高性能 AE 減水剤を用いた。また，表-2.4 にコンクリートの調合表を示す。

表-2.3 使用材料

材料	記号	特性値
セメント	C	普通ポルトランド セメント
細骨材	S	川砂 表乾密度：2.55g/cm ³
粗骨材	G	砕石 表乾密度：2.60g/cm ³
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

表-2.4 コンクリートの調合表

Fc (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					フレッシュ性状
			W	C	S	G	SP	SL (cm)
24	60	46.8	179.3	298.8	896.5	1017	157.31	20.8

※Fc：設計基準強度，W/C：水セメント比，s/a：細骨材，W：水，C：セメント，S：細骨材，G：粗骨材，
SP：高性能 AE 減水剤，SL：スランプ

3. 実験方法

3.1 練混ぜ方法

GP および無機系補修材の練混ぜ方法は実験 I と同様に行った。

3.2 試験体作製方法

供試体の形状は $\phi 100 \times 200$ の円柱とし、材齢 28 日まで 20°C 、 $60\% \text{R.H.}$ の養生室で、上面をビニルテープで覆い、封緘養生とした。供試体の作製方法は JIS S 1132 に準じて行った。材齢 28 日に脱型し、その後 3 体を研磨し圧縮試験を、残りを擬似ひび割れ試験体とした。

3.3 擬似ひび割れ作製方法

図-3.1 にコンクリート試験体の概要図、写真-3.1 にコンクリート試験体を示す。

既往の研究を参考¹⁾²⁾³⁾に、コンクリートの擬似的なひび割れを作製した。

擬似ひび割れを作製するため、割裂引張試験の要領で円柱供試体にひび割れを割裂した。その後、割裂面の間に設定ひび割れ幅である厚さ 0.2mm の両面テープを両端面から 30mm ほど離れた位置に貼り付け、その位置の上に鋼製バンドで締め付けた。その後、ひび割れの上面に注入座金、その周辺、およびコンクリート試験体の側面にシーリングした。シーリングが硬化後（24 時間以上放置）、注入試験を行った。

注入器具は、ゴムの本数および注入量で注入圧力を調整するタイプの注入器具はゴム 4 本、注入量 50ml （注入圧：およそ 0.2MPa ）と注入圧 0.06MPa のバネによる低圧力で注入するタイプの 2 種類を用いた。

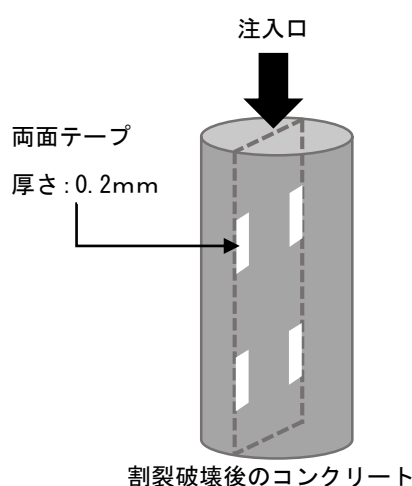


図-3.1 コンクリート試験体 概要図

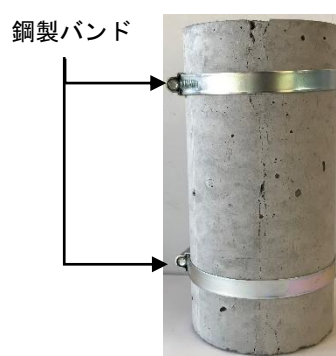


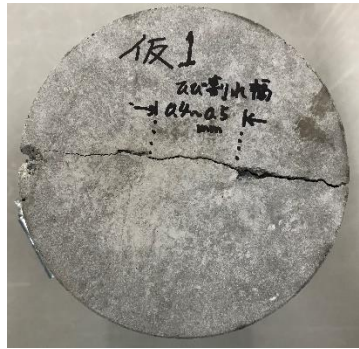

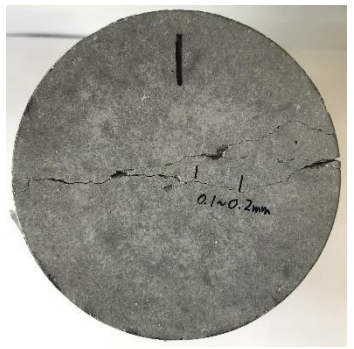
写真-3.1 コンクリート試験体

3.4 実験前ひび割れ状況

表-3.1 に代表的な実験前のコンクリート試験体のひび割れ状況を示す。

スケールルーペでひび割れ幅を測定し、ひび割れ幅を3つに分類した。なお、ひび割れ幅は場所によって異なるため、ひび割れ幅の測定は注入口の幅である 10mm 間に出来るだけ欠損部がなく均一な位置で行った。

表-3.1 ひび割れ状況

ひび割れ幅(mm)		
0.5~0.4	0.3~0.2	0.2~0.1
		

4. 実験結果

4.1 実験 I

写真-4.1 にひび割れ幅 0.2mm の、写真-4.2 にひび割れ幅 0.4mm の注入後の様子を示す。注入口のひび割れ幅が大きいほど注入量が多い結果となった。ひび割れ幅 0.2mm では注入量が少なかった原因は、粘性が高い可能性、凝結時間が短い可能性、および試験体の注入口付近のひび割れ幅が 0.2mm でも内部の幅が異なる可能性があったなどが考えられる。



写真-4.1 ひび割れ幅 0.2mm



写真-4.2 ひび割れ幅 0.4mm

4.2 実験Ⅱ

写真-4.3 に注入後の試験体の一覧を、図-4.1 に最大注入深さを示す。

最大注入深さは注入器具にバネを用いるよりゴムを用いた時の方が大きい結果となった。これは低圧なバネより、ゴムによる注入圧が高かったためだと考えられる。また、実験Ⅱと同様に、注入口のひび割れ幅が小さいほど、注入量および注入深さは少なくなった。無機系補修材に比べて、ジオポリマーは注入量および最大注入深さは少ない結果となった。

実験Ⅱの FA60BS40 の BS4000 ブレーンと FA60BS40 の BS8000 ブレーンをひび割れ幅 0.2mm で比較すると、4000 ブレーンの注入量が多い結果となった。実験Ⅰでは、8000 ブレーンと 4000 ブレーンでは同等の注入量で、浸透速度は 8000 ブレーンの方が速いという結果であった。このことから、コンクリート試験体内部のひび割れ幅のばらつきが大きい可能性があるため、鋼製バンドの締付け量やひび割れ幅を調整している両面テープの量を増やすなどの検討をする必要があると考える。

写真-4.3 注入後 実験結果一覧

ひび割れ幅：0.2mm ひび割れ幅：0.1mm ひび割れ幅：0.2mm
 注入器具：パネ 注入器具：ゴム 注入器具：ゴム
 (0.06MPa) (0.2MPa) (0.2MPa)

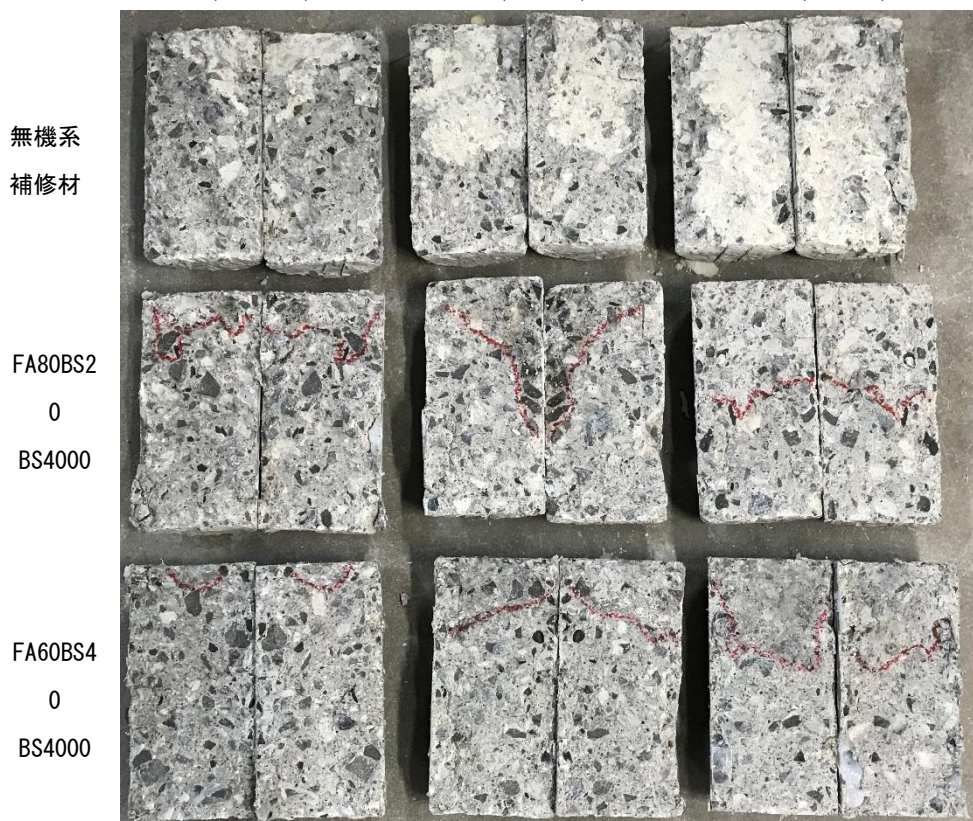
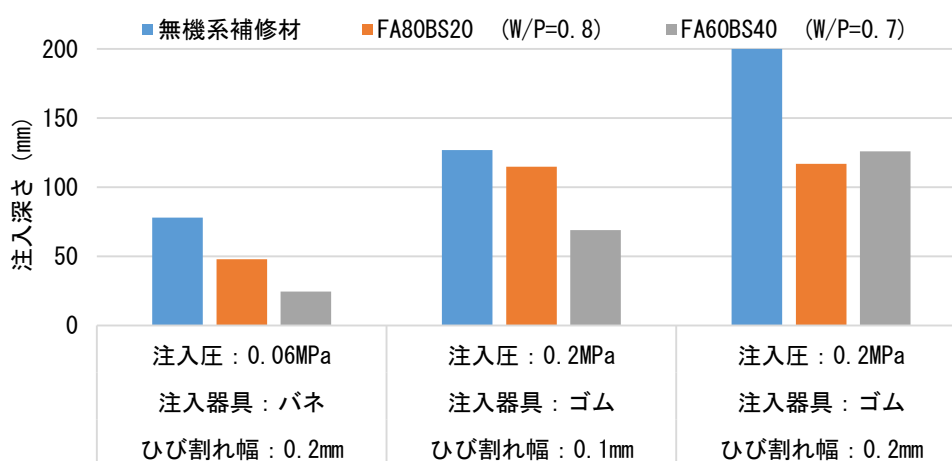


図-4.1 最大注入深さ



引用文献

【引用文献】

第1章 序論

- 1) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
- 2) 井上真澄，Saphouong khamhou，児島孝之：アクリル樹脂を用いたコンクリートひび割れ補修材に関する基礎的研究，材料，Vol.56，No.12，pp.1183-1188，2007.12
- 3) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術 '12 [基礎編]，pp.247-253，2012
- 4) 江口和雄，片脇清士：補修・補強材料入門①ひび割れ注入材，コンクリート工学，Vol.52，No.6，pp.540-544，2014
- 5) 加藤利美，飯坂武男，梅原秀哲，吉田弥智：無機系ひび割れ注入材料の基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.12，No.1，pp.1263-1268，1990
- 6) Sanjay PAREEK，鹿島大雄，丸山一平，荒木慶一：各種異なる母材及び鉄筋に対するジオポリマーモルタルの付着特性に関する基礎的研究，コンクリート工学会年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1839-1844，2018
- 7) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光：高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーペーストの圧縮強度発現性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2271-2276，2016
- 8) 合田寛基，原田耕司，津郷俊二，日比野誠：フライアッシュII種を用いたジオポリマーの材料特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1993-1998，2015
- 9) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光：ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1957-1962，2015
- 10) 鶴田康彦：材料-合成樹脂を中心に-，コンクリート工学，Vol.14，No.12，pp.65-69，1976
- 11) 佐藤隆恒，大木信洋，東原実，上原元樹：石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2023-2028，2013
- 12) 上原元樹：セメントを用いない低炭素型新材料であるジオポリマーの開発，鉄道総研月例発表会要旨，pp.1-4，2016
- 13) 川尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1943-1948，2011
- 14) 国枝実，李虎，上田尚史，中村光：ジオポリマーコンクリートおよびモルタルの曲げ破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1993-2004，2013
- 15) 一宮一夫，原田耕司，池田攻，津郷俊二：フライアッシュベースのジオポリマーの配合ならびに高温抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2230-2235，2014
- 16) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1987-1992，2015
- 17) 東原実，大木信洋，上原元樹：短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの実用化に向けた基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1963-1968，2015

- 18) 佐藤隆恒, 上原元樹, 南浩輔, 山崎淳司: ジオポリマー硬化体の種々の配合, 作製法における生成物とpH等諸性質との関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2325-2330, 2016
- 19) 佐藤隆恒, 上原元樹, 山崎淳司: 低アルカリ/水比, 高ケイ素/アルカリ比のケイ酸アルカリ溶液を使用したジオポリマー硬化体の諸性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2035-2040, 2017
- 20) 北田達也・李柱国: コンクリートのジオポリマー系ひび割れ補修材に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, 2017

第2章 既往の研究

- 1) Joseph DAVIDOVITS : GEOPOLYMER CHEMISTRY AND APPLICATIONS 4th edition, Institute Geopolymer, 2015.11
- 2) 日本コンクリート工学会: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017
- 3) 橋本忍, 鎌田隼人, 山崎裕司, 武田はやみ: ジオポリマーの耐火材料への適用, 耐火物, Vol.64, pp.446-451, 2012
- 4) 一宮一夫, 津郷俊二, 原田耕司, 池田攻: ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.575-580, 2011
- 5) 一宮一夫, 原田耕司, 池田攻, 津郷俊二: フライアッシュベースのジオポリマーの配合ならびに高温抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2230-2235, 2014
- 6) 上原元樹, 南浩輔, 平田紘子, 山崎淳司: ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1987-1992, 2015
- 7) 市川敬悟, 三島直生, 前川明弘, 畑中重光: ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現性に関する基礎的研究, Vol.37, No.1, pp.1957-1962, 2015
- 8) 市川敬悟, 三島直生, 前川明弘, 畑中重光: 高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーペーストの圧縮強度発現性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2271-2276, 2016
- 9) 岡田朋久, 菅彰, 橋爪進, 李柱国: ジオポリマーに適用する凝結遅延剤に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1975-1980, 2015
- 10) 岡田朋久, 李柱国, 橋爪進, 永井伴英: 凝結遅延剤を添加したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察, Vol.38, No.1, pp.2295-2300, 2016
- 11) 原田耕司, 一宮一夫, 津郷俊二, 池田攻: ジオポリマーモルタルの耐久性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011
- 12) 合田寛基, 原田耕司, 津郷俊二, 日比野誠: フライアッシュII種を用いたジオポリマーの材料特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1993-1998, 2015
- 13) 日本フライアッシュ協会: フライアッシュの種類別品質と性能, <http://www.japan-flyash.com/fquality.html>

- 14) 太平洋セメント株式会社：普通ポルトランドセメント，
http://www.taiheiyo-cement.co.jp/service_product/cement/pdf/ncement_v3.pdf
- 15) 米倉重州夫：超微粒子シリカフュームのコンクリートへの利用，粉体工学会誌，Vol.26，No.7，
pp.512-519，1989
- 16) 松藤泰典：資源の有効利用とコンクリート/第6回 シリカフュームを用いたコンクリート，コ
ンクリート工学，Vol.34，No.5，pp.70-75，1996.5
- 17) 陣内浩，佐伯竜彦，長瀧重義：シリカフューム，コンクリート工学，Vol.52，No.5，pp.399-404，
2014.5
- 18) 長瀧重義，米倉重州夫：シリカフュームとコンクリート，コンクリート工学，Vol.23，No.5，
pp.5~15，1985.5
- 19) 合田寛基，原田耕司，津郷俊二，日比野誠：フライアッシュII種を用いたジオポリマーの材料
特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1993-1998，2015
- 20) 佐藤隆恒，大木信洋，東原実，上原元樹：石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短ま
くらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2023-2028，2013
- 21) 上原元樹：セメントを用いない低炭素型新材料であるジオポリマーの開発，鉄道総研月例発
表会要旨，pp.1-4，2016
- 22) 川尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研
究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1943-1948，2011
- 23) 国枝実，李虎，上田尚史，中村光：ジオポリマーコンクリートおよびモルタルの曲げ破壊性状，
コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1993-2004，2013
- 24) 一宮一夫，原田耕司，池田攻，津郷俊二：フライアッシュベースのジオポリマーの配合ならび
に高温抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2230-2235，2014
- 25) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コン
クリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1987-1992，2015
- 26) 東原実，大木信洋，上原元樹：短繊維補強ジオポリマー短まぐらぎの実用化に向けた基礎的検
討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1963-1968，2015
- 27) 佐藤隆恒，上原元樹，南浩輔，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の種々の配合，作製法における
生成物とpH等諸性質との関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2325-2330，2016
- 28) 佐藤隆恒，上原元樹，山崎淳司：低アルカリ/水比，高ケイ素/アルカリ比のケイ酸アルカリ溶
液を使用したジオポリマー硬化体の諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2035-
2040，2017
- 29) 北田達也・李柱国：コンクリートのジオポリマー系ひび割れ補修材に関する研究，コンクリ
ート工学年次論文集，Vol.39，No.1，2017
- 30) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編]，2012
- 31) 江口和雄，片脇清士：補修・補強材入門 ①ひび割れ注入材，コンクリート工学，Vol.52，No.6，
pp.540-544，2014.6

- 32) 萩村敬隆, 毛塚貴洋, 白杵匠, 伊代田岳史: 無機系ひび割れ注入材の基本物性とひび割れ注入効果の検証, 第39回土木学会関東支部技術研究発表会, V-60
- 33) 佐藤晋哉, 白杵匠, 伊代田岳史: 簡易的なひび割れ注入工法に用いる各種注入材料の補修効果の検討, 第40回土木学会関東支部技術研究発表会, V-60

第3章 ジオポリマーを補修材として活用するための初期実験

- 1) 日本コンクリート工学会: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書 5章共通試験, pp.197-217, 2017
- 2) Tanakorn Phoo-ngernkham, Vanchai Sata, Sakonwan Hanjitsuwan, Charoenchai Ridthirud, Shigemitsu Hatanaka, Prinya Chindapasirt: High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, *Construction and Building Materials*, pp.482-488, 2015
- 3) 金子佳生, 三橋博三; ひずみ局所化領域におけるコンクリートのせん断軟化特性に関する解析的系研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.68, No.573, pp145-152, 2003.11
- 4) 中浜高生, 畑中重光, 三島直生: 煉瓦目地のせん断試験方法および破壊基準に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.641, pp.1225-1232, 2009.7

第4章 超微粒子粉体のシリカフェームを添加したジオポリマーの基礎特性

- 1) 市川敬悟, 三島直生, 前川明弘, 畑中重光: ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現性に関する基礎的研究, Vol.37, No.1, pp.1957-1962, 2015
- 2) 長滝重義, 大即信明, 久田真, 水野和彦: シリカフェームの品質とその評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol.28, No.520, pp.87-98, 1995.8
- 3) 松藤泰典: 資源の有効利用とコンクリート/第6回 シリカフェームを用いたコンクリート, コンクリート工学, Vol.34, No.5, pp.70-75, 1996.5

第5章 微粒子粉体の高炉スラグ微粉末を添加したジオポリマーの基礎特性

- 1) 日本コンクリート工学会: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017
- 2) 市川敬悟: 高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーの基礎物性に関する研究, 三重大学大学院修士論文, 2016
- 3) 市川敬悟, 三島直生, 前川明弘, 畑中重光: ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現性に関する基礎的研究, Vol.37, No.1, pp.1957-1962, 2015
- 4) 市川敬悟, 三島直生, 前川明弘, 畑中重光: 高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーペーストの圧縮強度発現性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2271-2276, 2016

第6章 微粒子粉体（高炉スラグ微粉末・シリカフェーム）を添加したジオポリマーのひび割れ注入実験

- 1) 佐藤晋哉，臼杵匠，伊代田岳史：簡易的なひび割れ注入工法に用いる各種注入材料の補修効果の検討，第40回土木学会関東支部技術研究発表会，V-60，2013

【付録】 コンクリートへの注入実験

- 1) 後藤正明，土田祥彬，澤本武博，地頭菌博：ひび割れにエポキシ樹脂を注入したコンクリートの圧縮強度および引張強度特性に関する研究，ものづくり大学紀要，No.2，pp.42-47，2011
- 2) 若杉三紀夫：ポリマーセメント系補修材の開発と無機系複合表面処理工法の ASR 抑制効果に関する研究 第3章ポリマー超微粒子セメント系ひび割れ注入材の開発，京都大学大学院博士論文，pp.19-44，2014

謝辞

【謝辞】

本実験で使用した高炉スラグ微粉末は、エスメント中部株式会社より提供していただいた。

本研究費の一部は、科学研究費基盤研究(B)(研究代表者：一宮一夫大分高専教授)によった。付記して謝意を表す。

本研究を行うにあたり、多大なるご指導ご鞭撻を賜りました畑中重光先生（三重大学大学院教授）に対し、心から感謝するとともに、ここに御礼を申し上げます。また本研究に際し、ご助言、ご指導をいただいた三島直生先生（元三重大学准教授）、シリカフェームジオポリマーの膨張原因に関する検証実験をはじめ、粒度分布、化学組成、およびX線回折の測定に関して前川明弘氏（三重県工業研究所）、ひび割れ注入実験、シリカフェームおよび無機系補修材の材料に関して水野敏行氏（丸敏陶料所）、ひび割れ補修方法、ひび割れ実験モデル、補修材に関して長谷川哲也氏（日本診断設計）、中村正行氏（株式会社リノテック）、および稲富研祐氏（株式会社リノテック）に多くのご助言、ご指導いただきましたこともあわせて感謝いたします。

実験を行うにあたり、和藤浩氏（三重大学技術職員）、ポンマハーサイパラミ氏（三重大学大学院生）、五百蔵沙耶氏（三重大学学部生）をはじめ、畑中研究室の方々にたびたびご助力をいただきました。

最後に、学生生活を支えてくださった家族、友人たちに、心から感謝いたします。誠にありがとうございました。

投稿論文

微粒子粉体を用いたジオポリマーのひび割れ補修材としての活用に関する基礎的研究

工学研究科 建築学専攻 畑中研究室 伊藤彰利

1. はじめに

非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ溶液を用いて硬化させたジオポリマー（以下、GP）は、製造工程でCO₂を排出するセメントを使用せず、産業副産物であるフライアッシュ（以下、FA）や高炉スラグ微粉末（以下、BS）の有効活用することから、低炭素・資源循環型社会実現のためのセメント代替材料として、土木分野および建築分野における構造物への利用が期待されている。しかし、その用途や活用方法は模索段階である。本研究では、GPの活用としてひび割れ補修材への適用を検討する。

現在、ひび割れ補修材はエポキシ樹脂などの有機系補修材料とポリマーセメント系などの無機系補修材料の2種類が用いられている。有機系補修材料は、付着やひび割れ追従性能などが良いことから、多く活用されているが、紫外線による劣化や耐火性に劣る点、施工時の温度管理や湿潤面での接着不良²⁾、またコンクリートとの熱膨張係数、引張強度が異なるなどの問題がある。一方、無機系補修材料は、コンクリートと同等の材料特性を有し、紫外線などの耐久性に優れているが、付着やひび割れ注入性能は有機系補修材料に劣り、さらに乾燥面でドライアウトを起こすなどの欠点がある⁴⁾。どちらの材料も粘度が小さいとダレ現象を起こす⁵⁾。

無機系材料であるGPは①耐久性に優れる、②コンクリートと同程度の材料特性が得られる、③コンクリートおよび鉄筋との付着が良い⁶⁾、そして④コンクリートより耐硫酸性が高い⁷⁾、⑤凝結時間が短い⁹⁾の点でひび割れ補修材として期待するが、ひび割れに必要な諸特性については分かっていない。

そこで本研究では、第3章では初期実験として、一般的なGPとコンクリートとの付着特性を確認した。第4章および第5章では、GPをひび割れ注入材として活用するために、粒子の細かさが注入性状に関係することから、微粒子粉体を用いることを検討し、シリカフェーム（以下、SF）、比表面積の大きなBS（JIS 6000級および8000級）に着目する。しかし、SFは一般的に少量（およそ粉体に占める割合が10%程度）の混和材として使用され⁸⁾¹⁰⁾¹⁸⁾、主要な粉体として使用されている研究はなく、またBSもJIS 4000級が主に使用され、比表面積の大きな6000、8000級をGPの活性フィラーとして用いている研究は少ないため、練混ぜの可否、フロー値、圧縮強度などの基礎特性を調べた。その後、第6章で塩ビ板を用いた擬似ひび割れに注入実験を行う。微粒子粉体を用いたGPの注入性状について検討を行った。

2. ジオポリマーとコンクリートとの付着特性（実験1）

2.1 実験概要

ジオポリマーとコンクリートとの付着特性を確認することを目

的に、傾斜せん断試験を行った。

表2-1に実験の要因と水準を、図2-1に供試体の形状と寸法を示す。本実験では、母材コンクリートと同強度のジオポリマーおよび無収縮モルタル、2倍強度のGPを比較する。モルタルでは界面の乾湿の影響を受けるが、GPでの界面の乾湿の影響は分かっていないため、母材と補修材の界面の乾燥、湿潤状態の比較を行う。傾斜角は30、40、60°の3水準設けた。

表 2-1 実験の要因と水準（実験1）

		設計強度 (N/mm ²)	界面の乾湿	打ち継ぎ角度 (°)
母材	コンクリート	30	—	—
補修材	ジオポリマーモルタル (GP)	30	湿潤 (W) 乾燥 (D)	30, 45, 60
		60	湿潤 (W)	
	補修用無収縮モルタル (RM)	30	湿潤 (W) 乾燥 (D)	

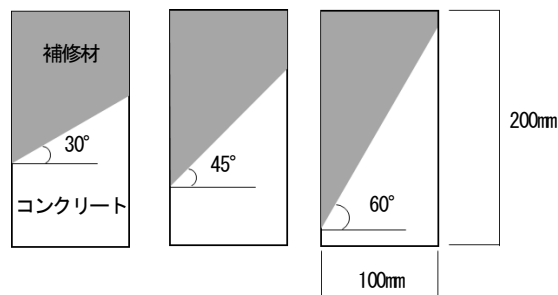


図 2-1 供試体の形状と寸法

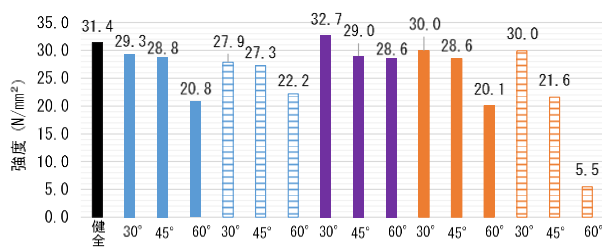


図 2-2 傾斜せん断試験

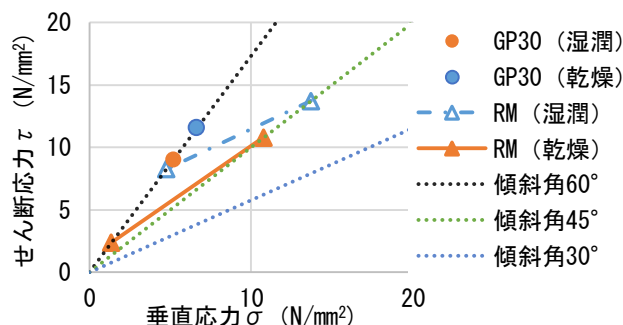


図 2-3 せん断応力-垂直応力関係

2.2 実験結果および考察

図2-2に傾斜せん断試験結果を、図2-3に付着破壊した供試体の付着強度を示す。その結果、GP30は同強度のRMより付着強度が高い結果となった。またRMは界面が湿潤状態より、乾燥状態の方が低くなっているのに対して、GP30は湿潤状態より乾燥状態の方が高い結果となった。

これはRMが水和反応で硬化するため、界面が乾燥状態の場合ドライアウトを起こすのに対して、ジオポリマーは脱水縮重合反応であるためドライアウトの影響を受けなかったと考えられる。

3. 微粒子粉体を用いたジオポリマーの基礎特性

3.1 SFを添加したGPの基礎特性（実験2）

3.1.1 実験概要

本実験では、一般的なGPに用いられるFA、BSにSFを添加した場合の基礎特性（練混ぜの可否、フロー値、圧縮強度）について調べることを目的とする。

溶液は水ガラスの2号の原液（以下、WG2）および10mol/Lの水酸化ナトリウム（以下、NH）を使用した。溶液粉体比（以下、W/P）はW/P=0.5、使用する溶液はWG2/NH=2.0で一定とした。但し、練混ぜが出来なかった場合は、粉体の明らかな乾燥部分が無くなりペースト化するまで溶液を加えて実験を行った。

表3-1に実験の要因と水準を、図3-1に本実験の粉体比と練混ぜの可否を示す。SFの添加により練混ぜが困難になる傾向が確認された。これは、SFの比表面積が大きいため、溶液と接触する面積が大きくなったためだと考えられる。

3.1.2 供試体作製方法

(1) 練混ぜ方法

溶液は前日にWG2とNHを質量比で2:1となるよう混合し、20℃、60%R.H.の室内に24h以上、静置したものをを用いた。

粉体は空練りした後、溶液を混合し、モルタル用ハンドミキサーを用い60秒間練り混ぜた。その後、30秒間揺落としを行い、さらに120秒間練り混ぜた。なお本実験では1バッチの練混ぜ量を2Lとし、ペーストはφ50×100mmの円柱供試体型枠に打ち込んだ。

(2) 養生方法

打ち込み後、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留めて封かん養生とし、以下のような温湿度条件下で養生を行った。

すなわち、材齢1日は60℃で27時間の加温養生とし、材齢7、28日は20℃、60%R.H.の環境で養生を行った。

また、膨張が発生した供試体は、膨張した部分をコンクリートカッターで切断、または研磨機で削り、円柱形になるように整形し、研磨機で端面を平滑にした。

(3) 実験方法

ペーストのフレッシュ性状を確認するために、JIS R

表3-1 実験の要因と水準（実験2）

要因	水準
粉体 (P)	FA, BS, SF
粉体比	図3-1に詳細に記す
溶液粉体比 (W/P)	W/P=0.5
溶液 (W)	WG2, NH
溶液比	WG2 : NH=2 : 1

FA: フライアッシュ, BS: 高炉スラグ微粉末, SF: シリカフューム,

W: 溶液P: 粉体, WG2: 水ガラス2号, NH: 水酸化ナトリウム水溶液,

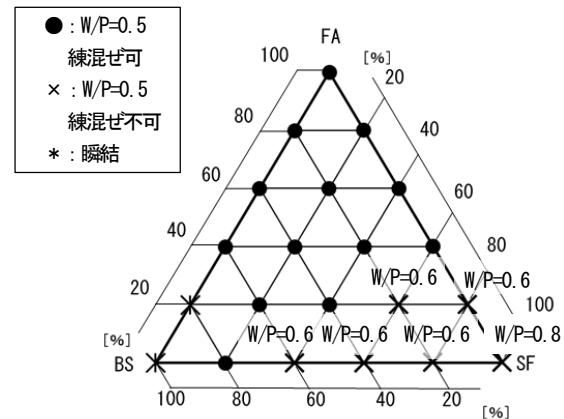


図3-1 W/P=0.5での練混ぜの可否

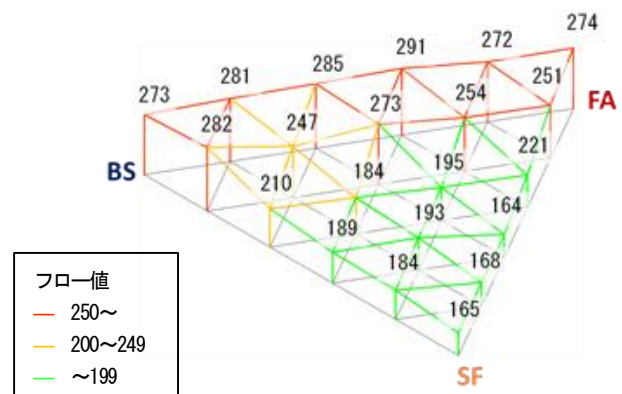


図3-2 フロー試験結果

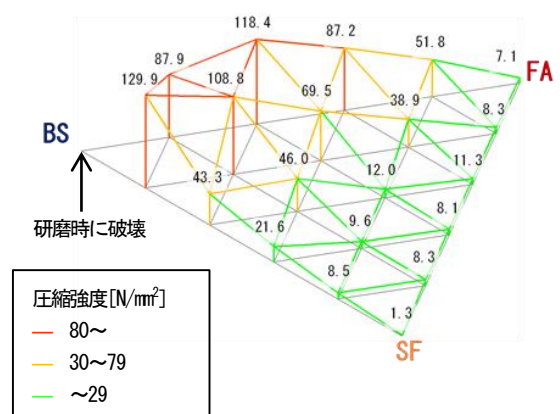


図3-3 圧縮強度（材齢28日 封緘養生）

5201「セメントの物理試験法」に基づいてフロー試験を行った。また GP 硬化体は、材齢 1, 7, 28 日において圧縮強度試験（各調合 3 本ずつ）を実施した。

3.1.3 実験結果および考察

図 3-2 にフロー試験の結果を示す。SF を添加するとフロー値が減少する結果となった。これは、練混ぜが困難になったのと同様に SF の比表面積が大きいためであると考えられる。

図 3-3 に材齢 28 日封緘養生の圧縮強度試験の結果を、図 3-4 に圧縮強度と単位容積質量の関係を示す。SF を添加するほど、圧縮強度は低下する結果となった。これは 3.2（実験 3）で後述するが、膨張したためであると考えられる。

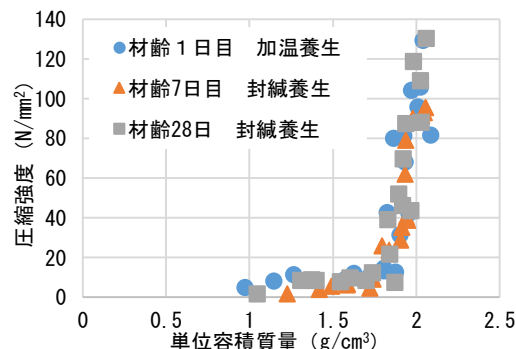


図 3-4 圧縮強度－単位容積質量の関係

3.2 SF の種類を変えた GP の基礎特性（実験 3）

本実験では、3.1 の実験で用いた SF（1）とは異なる 2 種類の SF（2, 3）を用いた場合の、基礎特性への影響について調べることを目的とする。なお、粉体に FA は用いないこととした。

3.2.1 実験概要

表 3-2 に実験の要因と水準を、表 3-3 に 3 種類の SF の産地、起源、および化学成分を、図 3-5 に粒度分布を示す。

本実験では、粉体として、BS は比表面積 4000（以下、BS4000）を用い、SF1 はノルウェー産で金属シリコン製造時に排出される SF、SF2 は別産地（中国産）で SF1 と同じく金属シリコン製造時に排出される SF、そして SF3 は SF2 と同じく中国産で電融ジルコニア製造時に排出される SF（別起源）を用いた。

3.2.2 供試体作製方法

3.1.1(1)～(3)と同様に行った。

3.2.3 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

表 3-4 に練混ぜの可否を示す。SF1 は SF の置換率が 60%以上の時、W/P=0.5 で練混ぜが困難で溶液を足したが、SF2, SF3 では溶液を追加することなく練混ぜを行うことができた。

図 3-6 にフロー試験結果を示す。SF1 はフロー値が小さいのに対し、SF2, SF3 では高く、SF の種類によって GP ペーストの流動性が異なることが分かった。

(2) 膨張性

表 3-5 に材齢 1 日加温養生の硬化体の様子を示す。SF1～3 全ての種類で膨張を確認した。しかし、膨張量に違いがあり、SF1 が最も膨張しており、次に SF2、そして電融ジルコニア製造時に排出される SF3 の膨張量は最も少ない結果となった。現時点では、SF に

表 3-2 実験の要因と水準（実験 3）

粉体比(%) (質量比)	SF:BS	100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80
シリカ フューム	SF1, SF2, SF3（詳細は表 2-3 に記述）	
溶液比	NH:WG2=1:2（一定）	
溶液粉体比	W/P=0.5（一定）	

表 3-3 シリカフュームの産地、起源、化学組成 (%)

	SF1	SF2	SF3
産地	ノルウェー	中国	中国
起源	金属シリコン	金属シリコン	電融ジルコニア
SiO ₂	97.75	93.15	96.5
Al ₂ O ₃	0.23	0.14	0.26
Fe ₂ O ₃	0.10	0.06	0.27
CaO	0.23	0.89	0.03
MgO	0.22	0.72	0.02
K ₂ O	0.86	2.28	0.1
Na ₂ O	0.09	0.37	0.01
ZrO ₂ +HfO ₂	-	-	2.34
Igloss	0.28	2.38	0.43

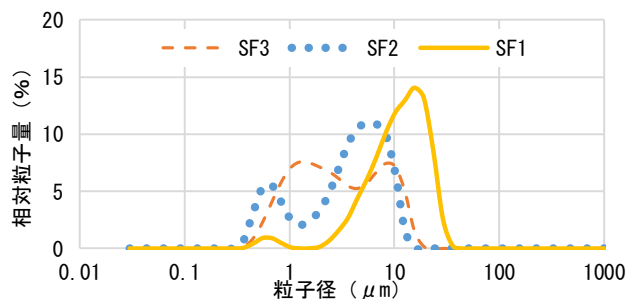


図 3-5 SF の粒度分布（実験 3）

表 3-4 練混ぜの可否

V _{SF} *1 (V _{BS}) (%)	20 (0)	40 (60)	60 (40)	80 (20)	100 (0)
SF1	○	○	×:0.6*2	×:0.6*2	×:0.8*2
SF2	○	○	○	○	○
SF3	○	○	○	○	○

[注] ○：練混ぜ可能、×：練混ぜ不可

*1：粉体に占める SF または BS の割合

*2：練混ぜが可能となった溶液粉体比 (W/P) の値

表3-5 硬化体の様子 (材齢1日 加温養生)

	SF (BS) 置換率 (%)				
	20 (80)	40 (60)	60 (40)	80 (20)	100 (0)
SF-1					
SF 2					
SF 3					

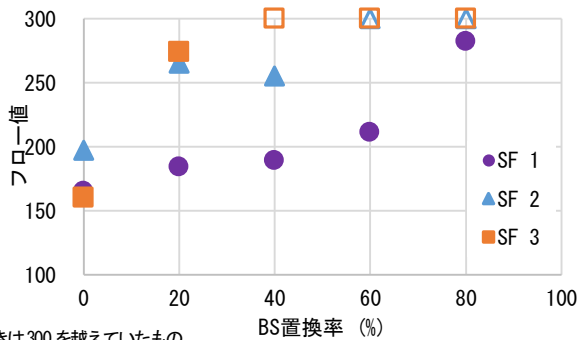


図3-6 フロー試験結果

よるGPペーストの膨張の原因を明らかに出来ていないが、SFの粒子が超微粒子 (0.1~10 μ m) のために反応しやすい形態であること、金属シリコン、金属アルミ、炭素などの含有があればアルカリ溶液と反応し、水素ガス、炭酸ガスなどの気体が発生する可能性もあることなどが推察される。

(3) 圧縮強度

図3-7に、材齢28日封緘養生の圧縮強度試験結果を示す。

SF2とSF3はSF1と比較して、圧縮強度は高い結果となった。SF3はBS置換率20%で30N/mm²を超え、BS置換率60%では120N/mm²近い圧縮強度を、SF2はBS置換率40%で70N/mm²以上を示した。また、SF1は全体的に低い圧縮強度だが、BS置換率80%で、SF2とSF3と同等の圧縮強度となった。

図3-8に、材齢28日封緘養生の圧縮強度と単位容積質量の関係

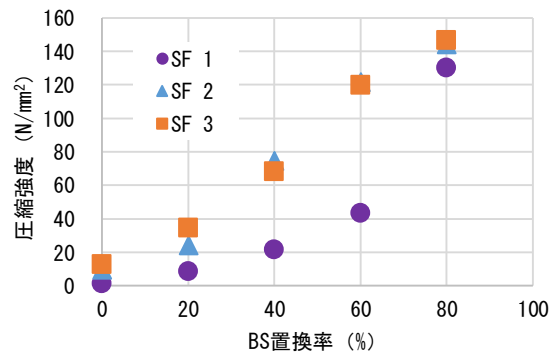


図3-7 圧縮強度 (材齢28日 封緘養生)

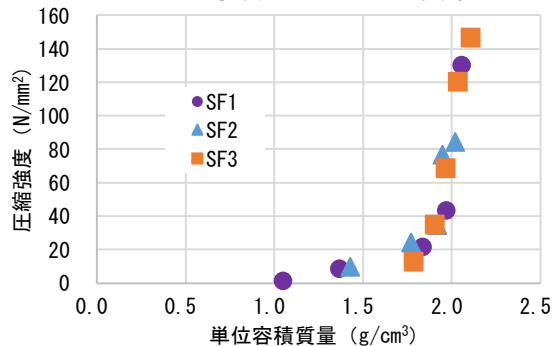


図3-8 圧縮強度—単位容積質量 関係
(材齢28日 封緘養生)

を示す。SFの種類に関わらず、単位容積質量が低下すると圧縮強度が低下している。これはSFとアルカリ溶液との反応で何らかの気体が発生し、供試体の膨張による圧縮強度の低下が生じたと考

えられる。SF置換率が増加すると硬化反応前に大量の発泡が生じ、圧縮強度と単位容積質量の低下に結びついたのでないかと考える。

3.3 異なる比表面積のBS (4000, 6000, 8000)を用いたGPの基礎特性 (実験4)

本実験では、GPに一般に添加されるのBS4000より細かい6000, 8000級 (以下, BS6000, 以下8000)を用いた時のフロー値、圧縮強度と言った基礎特性を調べることを目的とする。

3.3.1 実験概要

表3-6に実験の要因と水準を示す。既往の研究⁷⁾を参考に、BS4000で、30N/mm²以上の圧縮強度および凝結の始発時間がJIS R 5210「ポルトランドセメント」で規定される1時間以上を満たす調合とした。BSの比表面積を4000, 6000, 8000の3水準設けた。

図3-9に使用した活性フィラーの粒度分布を示す。粒子径のピークから、JIS規格通りBS8000が最も細かく、続いて6000, 4000という順であった。またFAはBS8000と同等またはより細かい粒子径であった。

3.3.2 実験方法

3.1.1(1)~(3)と同様に行った。

3.3.3 実験結果および考察

(1) フロー試験

図3-10にフロー値とBSブレン値の関係を示す。

比表面積が大きいほど、フロー値は減少する傾向が見られた。これは比表面積が大きいほど溶液との接触面積が大きくなるため、粘性が高くなりフロー値が減少したと考えられる。

(2) 圧縮強度

図3-11に圧縮強度とBS置換率の関係を示す。BS置換率が大きくなるほど、圧縮強度は高くなる傾向を確認した。これは既往の研究⁷⁾、BS4000と同じ傾向であり、BSは圧縮強度発現性に大きく影響を与える材料であるため、BS置換率が高いと圧縮強度が高くなった。比表面積の影響を見ると、BS置換率20%では、比表面積が大きくなるにつれて圧縮強度は高くなるが、BS置換率40%ではBS4000が最も高くなる結果となった。この原因については不明である。

4. 微粒子粉体を用いたジオポリマーの擬似ひび割れ注入実験 (実験5)

4.1 実験概要

本実験では、実験2~4で微粒子粉体を用いたGPの基礎特性の結果より、GPの注入性状を確認する。微粒子

表3-6 実験の要因と水準 (実験4)

粉体比(%) (質量比)	FA:BS	100:0, 80:20, 60:40
BS比表面積		4000, 6000, 8000
溶液比		NH:WG2=1:2 (一定)
溶液粉体比		W/P=0.5 (一定)

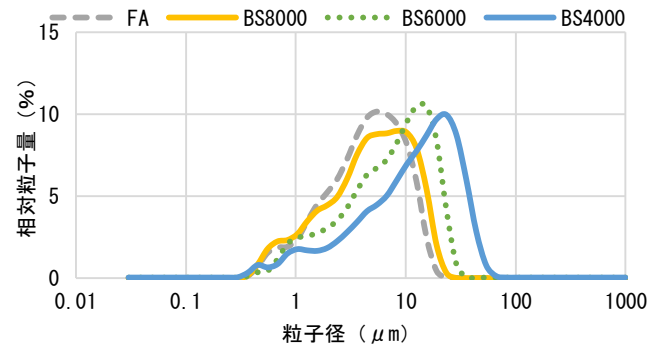


図3-9 粒度分布 (実験4)

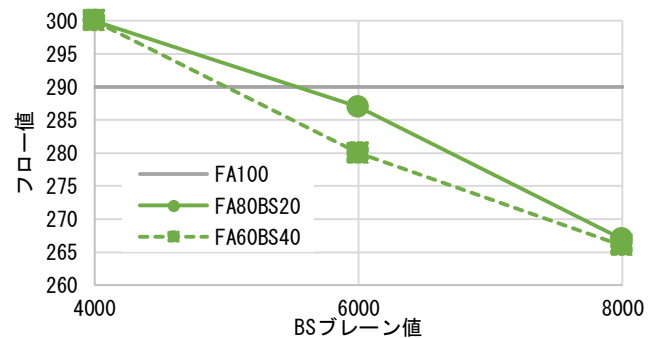


図3-10 フロー値とBSブレン値の関係

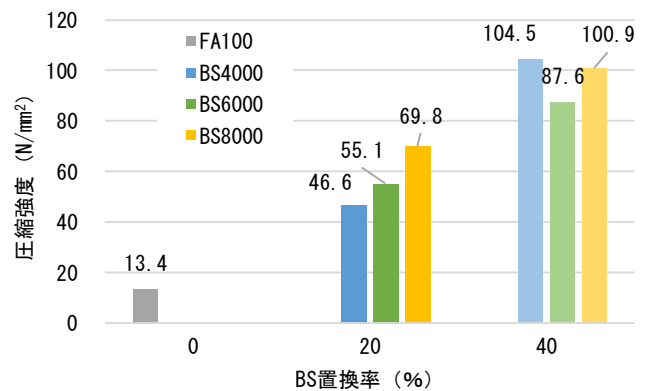


図3-11 圧縮強度—BS置換率 関係
(材齢28日 封緘養生)

粉体のひび割れ注入性状に与える影響を調べるため実験4を基に実験を行うこととした。またSFの影響を調べるため実験3の結果より最もフロー値(流動性)と圧縮強度に優れたSF3を用い、フロー値が優れた範囲であるSF置換率40, 60%の調合についても注入を行う。ここでSF置換率20%(BS80%)も良好なフロー値および圧縮強度を示しているが、BS置換率が高い範囲では凝結時間が短い可能性が高いため⁷⁾、本実験では行わないこ

ととした。

本実験で用いるひび割れ試験体は、塩ビ板を平行に配置した簡易的に擬似ひび割れを作製した。構造物に発生するひび割れは、表面のひび割れ幅や内部のひび割れ深さにより形状が異なり、それをモデル化するのは非常に困難である。また、ひび割れ補修の目的は、ひび割れを抑制することである³⁾。そのため本実験では、ひび割れのモデルはひび割れ補修の範囲である0.2~1.0mmの最も厳しい0.2mmのひび割れ幅とし、塩ビ板を用い擬似的に作製した。本実験の目的は、微粒子粉体を用いたGPが擬似ひび割れ幅0.2mmに注入可能できるか、またGPの調合によって内部の注入深さおよび注入時間にどのような影響を与えるかを確認することである。

表4-1に実験の要因と水準を示す。FAにBSを添加したFA-BS系と、SFおよびBSを用いたSF-BS系の2水準とし、FA-BS系ではFA置換率100, 80, 60%の3水準、BSの比表面積を4000, 6000, 8000の3水準設けた。また、W/P=0.5を基本とし、FA置換率60%の場合のみW/P=0.7についても行った。SF-BS系では、SF置換率60, 40%の2水準とした。比較のため、市販の無機系補修材料でも注入を行う。

図4-1に使用した活性フィラーの粒度分布を示す。

粒度分布の粒子径のピークから、規格通りBSはBS8000が最も細かく、続いてBS6000, そしてBS4000という順であった。またFAはBS8000と同等またはより細かい粒径であり、SFは全ての活性フィラーの中で最も細かい材料であった。

4.2 実験方法

(1) 練混ぜ方法

GPの練混ぜ方法は、実験2~4と同様に行った。ただし、実験2は注入量が50mlのため、1バッチの練混ぜ量は60mlとした。

無機系補修材料の練混ぜ方法は、溶液に水と混和液を入れ、粉体を投入し、市販のミキサーで粉体のダマがなくなるまで攪拌した。細かい気泡が無くなるまで静置し、注入を行った。

(2) 供試体作製方法

図4-2に試験体寸法を、図4-3に試験体断面図を、写真4-1に実際の試験体の様子を示す。

既往の研究¹⁹⁾を参考に、塩ビ板を用い擬似的にひび割れを作製した。

作製方法は、300mm×300mmの塩ビ板(厚さ5mm)を2枚用意し、その間に設定ひび割れ幅である0.2mmのテフロンシートを挟み、5箇所をボルトでしっかりと締める。注入座金を置くためにL字金具をサポートにし、アクリル板を直角に当て、接着剤で接着する。(図4-2参照)その後、12個のクリップを周囲に止めた後、スケール

表4-1 実験の要因と水準 (実験5)

種類	粉体比 FA(SF):BS(%)		BS比表面積	溶液粉体比 (W/P)	溶液比 (WG2:NH)
	FA(SF)	BS			
FA-BS系	FA100	BS0	4000	0.5	2:1
			6000		
			8000		
	FA80	BS20	4000	0.5, 0.7	
			6000		
			8000		
FA60	BS40	4000	0.5, 0.7		
		6000			
SF-BS系	SF60	BS40	4000	0.5, 0.7	
	SF40	BS60			
無機系 ^{*1}	超微粒子高性能ポリマーセメント系注入材				

*1: 市販の無機系補修材料

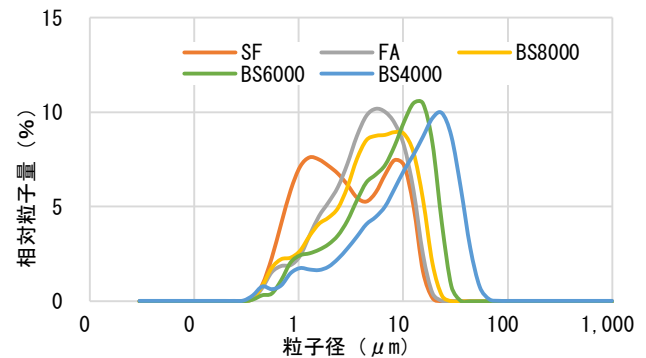


図4-1 粒度分布 (実験5)

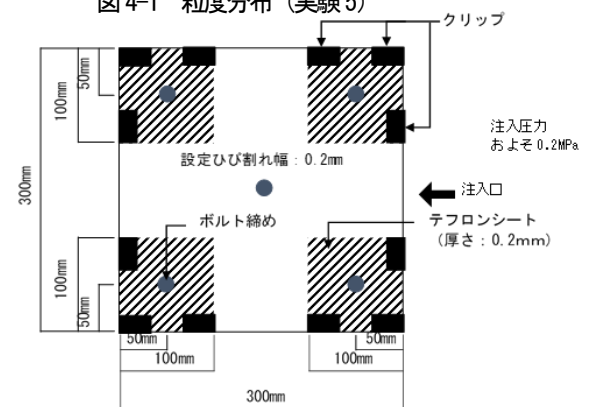


図4-2 試験体寸法

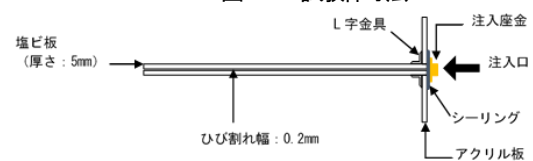


図4-3 試験体断面図

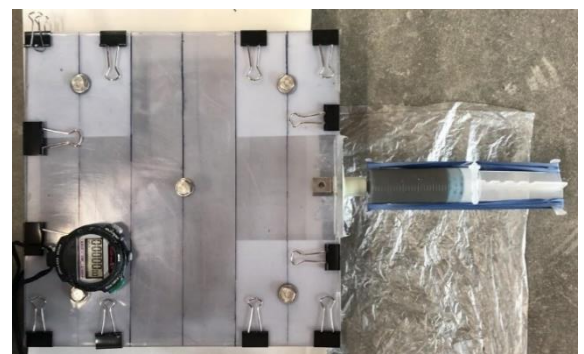
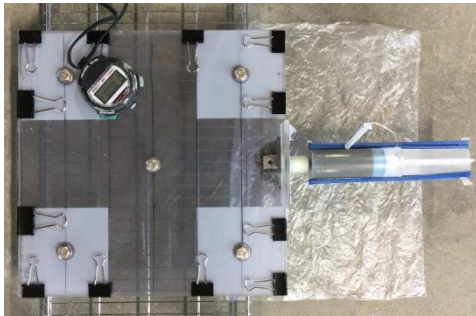


写真4-1 擬似ひび割れ試験体



(a) FA100



(b) FA80BS20 (6000)
(× : 5cm未満)

写真4-2 注入試験結果 (FA-BS系, W/P=0.5)

一ペで注入口の幅を測定し、所定の幅となっているか確認する。確認後、注入口およびその周辺をシーリングし、シーリング硬化後（24時間以上放置）、注入試験を行った。

注入試験はゴムの本数および注入量で注入圧力を調整するタイプの注入器具を用いた。注入圧力はゴム本数4本、注入量50ml（およそ0.2MPa）とした。

測定項目は、所定のひび割れ幅への注入の可否、注入深さおよび5cmごとの到達時間とした。

4.3 実験結果および考察

(1) FA-BS系 W/P=0.5の場合

写真4-2にW/P=0.5の場合の代表的な注入試験の結果として、(a)にFA100の様子を示す。表4-6にFA-BS系W/P=0.5の注入試験の結果を示す。この結果より、本実験で用いたジオポリマーは、0.2mmのひび割れ幅に入るが、5cm程度までしか入らない結果となった。

写真4-2(b)に表4-6の×であったFA80BS20（6000級）の試験結果の様子を示す。注入深さが少なかった原因として、本実験に用いたGPの粘性が高かったことが原因であると考えられる。

(2) FA-BS系 W/P=0.7の場合

表4-7にFA-BS系, W/P=0.7の注入試験結果を、写真4-3にW/P=0.7の場合の代表的な注入試験の結果として、FA60BS40（6000）の様子を示す。

この結果より、BSの比表面積に関わらず、全ての調合において最大30cmの注入が可能であった。W/P=0.5からW/P=0.7に溶

表4-6 注入試験結果 (FA-BS系, W/P=0.5)

	FA100	FA80BS20			FA60BS40		
		BS4000	BS6000	BS8000	BS4000	BS6000	BS8000
注入深さ	5cm	5cm	×	5cm	5cm	10cm	5cm

表4-7 注入試験結果 (FA-BS系, W/P=0.7)

	FA60BS40		
	BS4000	BS6000	BS8000
注入深さ	30cm	30cm	30cm

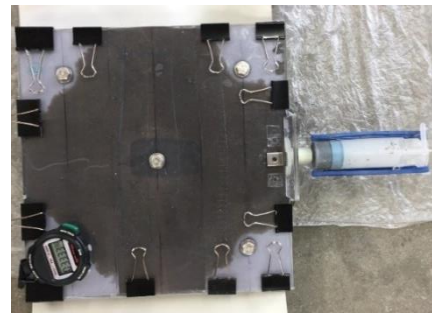


写真4-3 FA60BS40 (6000)
注入試験結果 (FA-BS系, W/P=0.7)

表4-8 注入試験結果 (SF-BS系, W/P=0.7)

注入深さ (cm)	W/P=0.7		W/P=0.5	
	SF60BS40	SF40BS60	SF60BS40	SF40BS60
	BS4000			
到達時間(s)				
5	4	5	53	×
10	11	18	140	
15	17	51	224	
20	55	119	332	
25	*	370	*	
30	*	×	*	

[注] *注入口付近のシーリングから漏れているため、注入完了しているが30cmまで到達しなかった

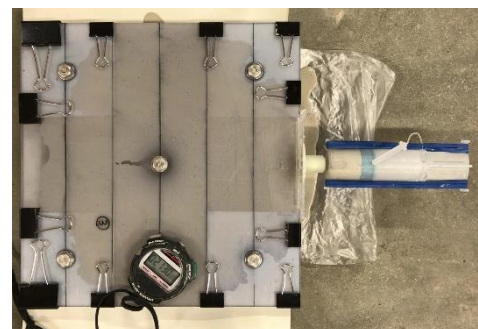
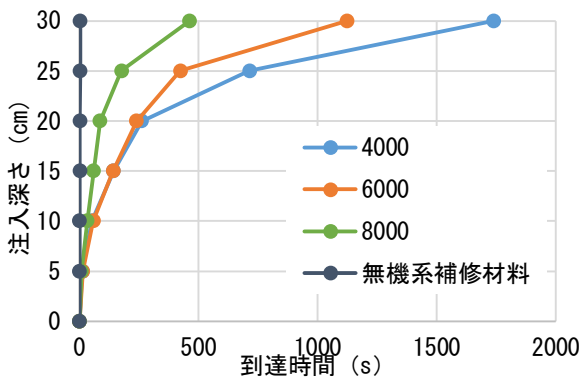


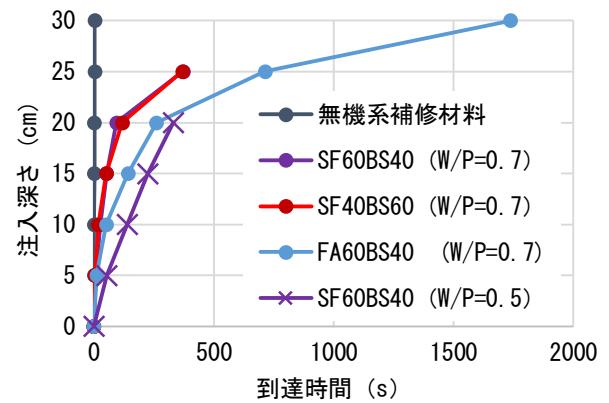
写真4-4 SF40BS60 (4000)
注入試験結果 (SF-BS系, W/P=0.7)

液粉体比が増えたことで粘性が低下し、より深くまで注入出来たと考えられる。

(3) SF-BS系



(a) FA-BS系 (FA60BS40, W/P=0.7)



(b) SF-BS系 (BS4000)

図4-4 注入深さ-到達時間 関係

表4-8にSF-BS系の注入試験結果を、写真4-4に代表的な注入試験の結果を示す。

W/P=0.7の調査は粉体比に関係なく、設定ひび割れ幅0.2mmにおいて、20cm以上、注入可能であった。SF置換率60% (BS40%)は注入口付近から漏れ出たため、注入は完了しているが30cmまで到達しなかった。

W/P=0.5のSF置換率40% (BS60%)の調査では、粘性が高く、設定ひび割れ幅0.2mmにおいて、5cmまで到達しなかった。

(4) 注入深さと到達時間の関係

図4-4に注入深さと到達時間の関係を、(a)にFA-BS系として、FA60BS40 (W/P=0.7)の4000, 6000, 8000級の結果と比較のために無機系補修材料の結果を、(b)にSF-BS系として、BS4000級のSF60BS40W/P=0.5, 0.7およびSF40BS60 (W/P=0.7)の結果を、比較のためにBS4000級のFA60BS40 (W/P=0.7)および無機系補修材料の結果を示す。

(a)より、注入完了(注入深さ30cm)までの到達時間は、比表面積が大きいほど早い結果となった。また、浸透速度は注入深さが深くなるにつれて遅くなり、比表面積が小さいほど、その傾向は顕著となった。

(b)より、SF60BS40とSF40BS60を比較すると、SF量が多い、SF60BS40の浸透速度が速い結果となった。SF60BS40とFA60BS40 (W/P=0.7)を比較するとSF60BS40の浸透速度が速い結果となった。このことから、粒子の細さが浸透速度に影響を与えていると考えられる。また、SF60BS40のW/P=0.7と0.5を比較すると溶液量の多い方が、浸透速度が速い結果となった。

市販で用いられている無機系補修材料の浸透速度は3秒で30cmまで到達し、全ての調査で最も早い結果となった。

(5) 流動性の確認

図4-5にW/P=0.7, FA60BS40のフロー値とBSブレン値の関係を、図4-6にフロー値とSF置換率の関係を示す。どちらも、溶液粉体比(W/P)が大きくなるほ

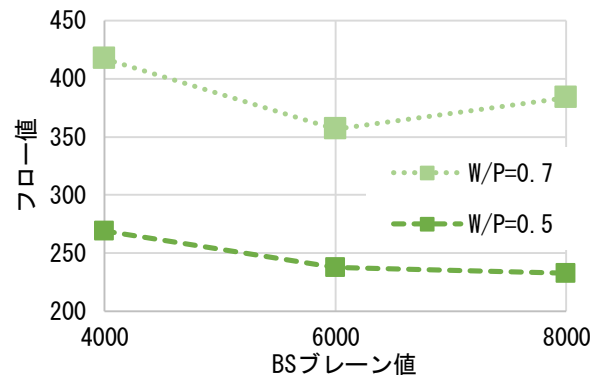


図4-5 フロー値とBSブレン値の関係
FA60BS40

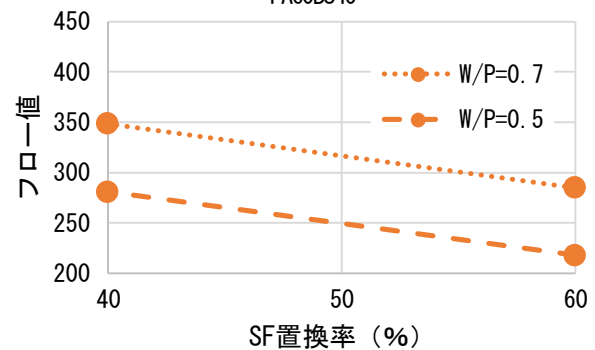


図4-6 フロー値とSF置換率の関係

ど、フロー値が増加した。BSの比表面積が大きくなるほど、SF置換率が大きくなるほど、すなわち比表面積が大きい粒子の割合がおおきくなるほどフロー値が低くなる結果となった。

4. まとめ

本研究では、環境に優しい材料であるジオポリマーをひび割れ補修材としての活用を目的とし、微粒子粉体を用いたジオポリマーの基礎特性およびひび割れ注入性能についての検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

【コンクリートとの付着特性】・・・実験1

1) 同強度の補修用無収縮モルタルと同等以上の付着強度を有していることを確認した。

- 2) ジオポリマーは、乾燥状態においてドライアウトを起さず、むしろ湿潤状態より付着強度が高くなる傾向を示した。

【基礎特性】・・・実験 2～4

- 1) 超微粒子粉体シリカフュームを添加したジオポリマーは膨張し、種類（産地・起源）によって、膨張量、フロー値（流動性）、および圧縮強度が大きく異なることを明らかにした。
- 2) 微粒子粉体を用いると、比表面積が大きいためフロー値（流動性）が低下することを確認した。

【注入性】・・・実験 5

塩ビ板を用いて作製した平行な 0.2mm 幅の擬似ひび割れ実験の結果、

- 1) 溶液粉体比を増やすことで、注入性が向上することを確認した。
- 2) 粉体の比表面積が大きいほど、内部の浸透速度が増加する。

5. 今後の課題

本研究では、擬似ひび割れへの注入による簡易的なひび割れ注入性状を調べた。今後は、実際のコンクリートに注入し、注入性を確認する必要がある。

その他にも、付着性、収縮量、耐久性、施工性、注入後の水分・塩分などの侵入性、注入圧、注入器具の選定など、多くの検討を行う必要があり、本研究が今後の研究の一助となることを願う。

【謝辞】

本実験では使用した高炉スラグ微粉末は、エスメント中部株式会社より提供していただいた。

本研究費の一部は、科学研究費基盤研究（研究代表者：一宮一夫大分高専教授）によった。付記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
- 2) 井上真澄，Saphouong khamhou，児島孝之：アクリル樹脂を用いたコンクリートひび割れ補修材に関する基礎的研究，材料，Vol.56，No.12，pp.1183-1188，2007.12
- 3) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術‘12 [基礎編]，pp.247-253，2012
- 4) 江口和雄，片脇清士：補修・補強材料入門①ひび割れ注入材，コンクリート工学，Vol.52，No.6，pp.540-544，2014
- 5) 加藤利美，飯坂武男，梅原秀哲，吉田弥智：無機系ひび割れ注入材料の基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.12，No.1，pp.1263-1268，1990

- 6) Sanjay PAREEK，鹿島大雄，丸山一平，荒木慶一：各種異なる母材及び鉄筋に対するジオポリマーモルタルの付着特性に関する基礎的研究，コンクリート工学会年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1839-1844，2018
- 7) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光：高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーペーストの圧縮強度発現性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2271-2276，2016
- 8) 合田寛基，原田耕司，津郷俊二，日比野誠：フライアッシュII種を用いたジオポリマーの材料特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1993-1998，2015
- 9) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光：ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1957-1962，2015
- 10) 佐藤隆恒，大木信洋，東原実，上原元樹：石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2023-2028，2013
- 11) 上原元樹：セメントを用いない低炭素型新材料であるジオポリマーの開発，鉄道総研月例発表会要旨，pp.1-4，2016
- 12) 川尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1943-1948，2011
- 13) 国枝実，李虎，上田尚史，中村光：ジオポリマーコンクリートおよびモルタルの曲げ破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1993-2004，2013
- 14) 一宮一夫，原田耕司，池田攻，津郷俊二：フライアッシュベースのジオポリマーの配合ならびに高温抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2230-2235，2014
- 15) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1987-1992，2015
- 16) 東原実，大木信洋，上原元樹：短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの実用化に向けた基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1963-1968，2015
- 17) 佐藤隆恒，上原元樹，南浩輔，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の種々の配合，作製法における生成物とpH等諸性質との関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2325-2330，2016
- 18) 佐藤隆恒，上原元樹，山崎淳司：低アルカリ/水比，高ケイ素/アルカリ比のケイ酸アルカリ溶液を使用したジオポリマー硬化体の諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2035-2040，2017
- 19) 佐藤晋哉，臼杵匠，伊代田岳史：簡易的なひび割れ注入工法に用いる各種注入材料の補修効果の検討，第40回土木学会関東支部技術研究発表会，V-60，2013

Fundamental Study on Application of Geopolymer containing Fine Particle Powders as a Crack Repairing Material

ITO Akitoshi

Department of Architecture, Mie University

Abstract: In this study, basic experiments were conducted to apply geopolymer(GP), which is a new material that can be hardened without cement, for a crack repair material. Expecting for crack injection performance, fine particle powders were used for GPs. Basic properties of the GPs with fine particle powders and their applicability use as crack repairing material was examined. After that, a pseudo-crack test apparatus was made by ourselves and a crack injection experiment was conducted.

1. Outline of thesis

Chapter 2 summarizes the basics and past researches on GPs, fine particle powders, and crack repairing materials.

In Chapter 3, we conducted experiments on the adhesion properties between geopolymer and concrete.

In Chapter 4, we examined the basic properties of the geopolymer when ultrafine powder silica fume(SF) was used. In Chapter 5, we examined the basic properties of the geopolymer when ground granulated blast furnace slag(BS) with JIS 6000 and 8000 finer than the ordinary BS (JIS 4000) was used.

In chapter 6, an injection experiment was conducted using a pseudo-crack test apparatus, based on the results of Chapter 4 and Chapter 5.

2. Adhesion characteristics between geopolymer and concrete (Chapter 3)

In order to investigate the adhesion properties of GP to concrete, a slant shear test was carried out. For comparative purposes, non-shrinkage mortar for repair(RM) of the same strength was used.

As a result, the adhesion strength of GP was equal to or higher than that of RM.

3. Basic characteristics of fine particle powders (Chapter 4, Chapter 5)

As to a basic property of the GP with fine particle powders, it was confirmed whether mixing is possible, measuring flow value, and compressive strength. Fig. 1 shows the experimental range of powder ratio of each chapter. As a result, the applicable range of mixture obtained in this study is shown in Fig. 2. This range satisfies the compressive strength of 30N/mm² or more, an appropriate setting time and flow value.

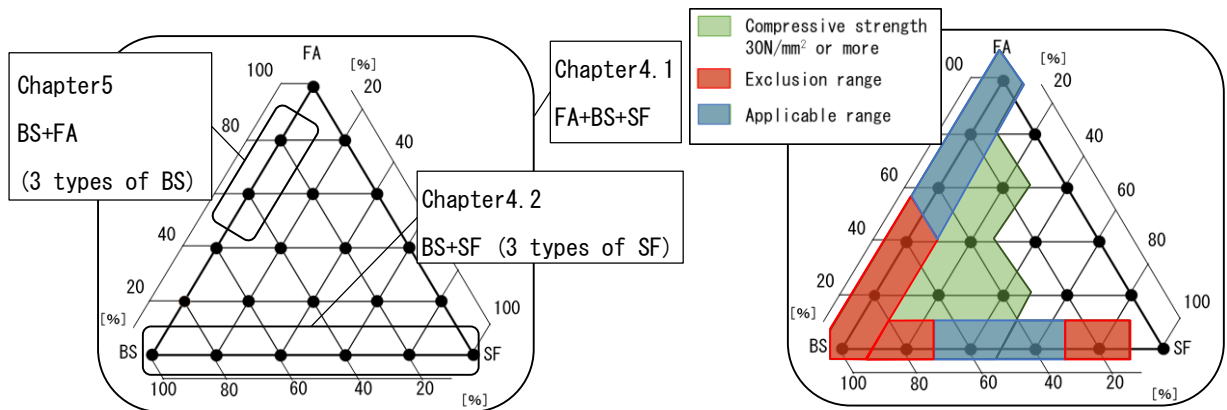


Fig. 1 Powder ratios of each chapters

Fig. 2 Applicable range

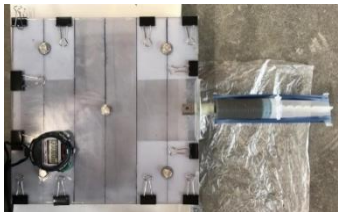


Photo. 1 Pseudo-crack test apparatus

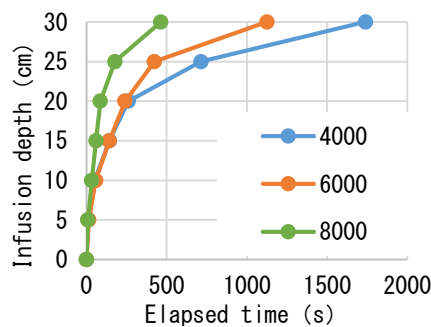


Fig. 3 Effect of BS specific surface area

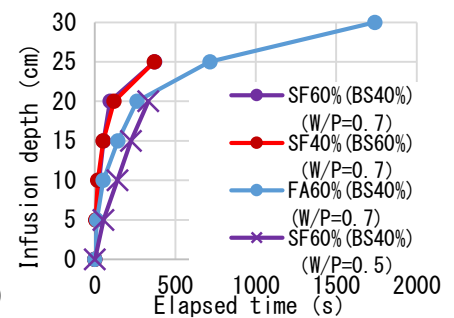


Fig. 4 Influence of materials

4. Pseudo-crack injection experiment (Chapter 6)

An injection experiment was conducted within the range obtained in Chapter 4 and Chapter 5. The pseudo-cracked specimen used in the experiment is shown in Photo. 1.

The results of the FA-BS series are shown in Fig. 3, and the results of the SF-BS series shown in Fig. 4. The larger the specific surface area of BS, the better the injection property (Fig. 3).

A better injection performance was obtained when the ratio of solution to powder was larger or SF was added (Fig. 4).

5. Summary

In this study, adhesion characteristics, basic characteristics, and injection properties were investigated when GP with fine particle powder was used as crack repair material.

- 1) GP showed equal or better properties than the same strength non-shrink mortar for repairing.
- 2) Fundamental characteristics of GP with fine particle powder was clarified.
- 3) By increasing the ratio of the solution to the powder or by using fine particles, the injection property of the GP was improved.

微粒子粉体を用いたジオポリマーの ひび割れ補修材としての活用に関する 基礎的研究

工学研究科 建築学専攻
畑中研究室 伊藤彰利

研究背景

異常気象

2018年7月 西日本集中豪雨



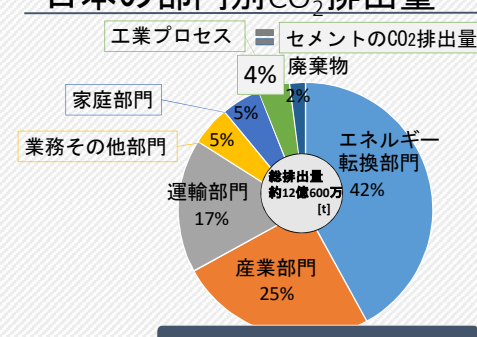
WMO (世界気象機関)
「豪雨災害を含む一連の異常気象は、温室効果ガスの増加による長期的な地球温暖化の傾向と関係している」

<http://www.tenkinoarekore.com/entry/2018/06/12/101856>

1

研究背景

日本の部門別CO₂排出量



セメントの削減が求められている

出典：温室効果ガスインベントリオフィス

2

研究背景

コンクリート構造物

トンネル



https://www.odelic.co.jp/products/execution/other/tunnel_saigo/images/large/01_photo01.jpg

橋



<http://www.zennama.or.jp/park/guide/13-totigi.html>

建築構造物



<https://www.my-kagawa.jp/art/feature/architecture/top>


現代社会に必要な不可欠な材料

3

研究背景

セメントを用いない硬化体

ジオポリマー



ジオポリマー

セメントコンクリート
結合材

ポルトランド
セメント

+

水

非晶質の珪酸アルミニウムを主成分とする粉体
(フライアッシュ、高炉スラグ微粉末など)

火力発電所・製鉄所などから出る産業副産物

+

アルカリ溶液
(NaOH水溶液、KOH水溶液、ケイ酸ナトリウムなど)


環境に優しい材料として注目されている

4

研究背景

コンクリートの歴史・ジオポリマー


ローマンコンクリート(古代ローマ)



- ・火山灰
- ・アルミニウム系結合材

→優れた耐久性・強度

ポルトランドセメントコンクリート(1800年代～)



- ・カルシウム系結合材

ジオポリマー(1970年代)

- ・ケイ素+アルミニウム系結合材

↑

↓

↑

5

研究目的

ジオポリマーの活用

ジオポリマーのひび割れ補修材としての活用
ひび割れ補修材の現状

	有機系	無機系(セメント)	ジオポリマー
利点	<ul style="list-style-type: none"> ・注入性に優れる ・付着性が良い 	<ul style="list-style-type: none"> ・耐久性に優れる 	<ul style="list-style-type: none"> ・凝結時間が短い ・耐酸性に優れる ・コストが安い
欠点	<ul style="list-style-type: none"> ・紫外線・経年劣化 ・コストが高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・注入性に劣る 	<ul style="list-style-type: none"> ・付着性？ ・注入性？ ・収縮量？

論文構成

論文構成

第1章 序論
第2章 既往の研究
第3章 ジオポリマーとコンクリートとの付着特性
投稿論文 ・2017年度 日本建築学会(AIJ)東海支部
第4章 超微粒子粉体のシリカフェームを添加したジオポリマーの基礎特性
投稿論文 ・2018年度 コンクリート工学会(査読付き)・AIJ(東北大会)
第5章 微粒子粉体の高炉スラグ微粉末を添加したジオポリマーの基礎特性
第6章 微粒子粉体を添加したジオポリマーのひび割れ注入特性
投稿論文 ・2019年度 コンクリート工学会(査読付き)・・・投稿
第7章 総括

実験計画

使用材料と調合計画

種別	略号	材料名	密度 (g/cm ³)
粉体 P	FA	フライアッシュ	2.29
	BS	高炉スラグ微粉末	2.9
	SF	シリカフェーム	2.2
溶液 W	WG2	水ガラス2号 原液	1.45
	NH	水酸化ナトリウム水溶液 (10mol/L)	1.35

既存研究の範囲

粉体比

比表面積
4000 6000 8000

4章・5章 微粒子粉体を用いたジオポリマーの基礎特性

4章 5章 基礎特性

基礎特性: 練混ぜの可否, フロー値, 圧縮強度

BS 置換率	80%	60%	40%	20%	0%
圧縮強度[N/mm ²]	80~	30~79	~29		

4章・5章 微粒子粉体を用いたジオポリマーの基礎特性

4章 5章 基礎特性

例) 材齢28日 圧縮強度

圧縮強度[N/mm ²]
80~
30~79
~29

5章: 凝結時間が適切な範囲

4章2: +2種類のシリカフェーム(SF)

6章 微粒子粉体を添加したジオポリマーのひび割れ注入特性

6章 擬似ひび割れ注入実験

ひび割れモデル

雨水・塩分 幅 (0.2mm~)

補修材

注入 幅 (0.2mm)

筒易モデル

塩び板を平行に配置した擬似ひび割れ

6章 微粒子粉体を添加したジオポリマーのひび割れ注入特性

試験体概要

テフロンシート：厚さ0.2mm

クリップ

注入方向

ボルト締め

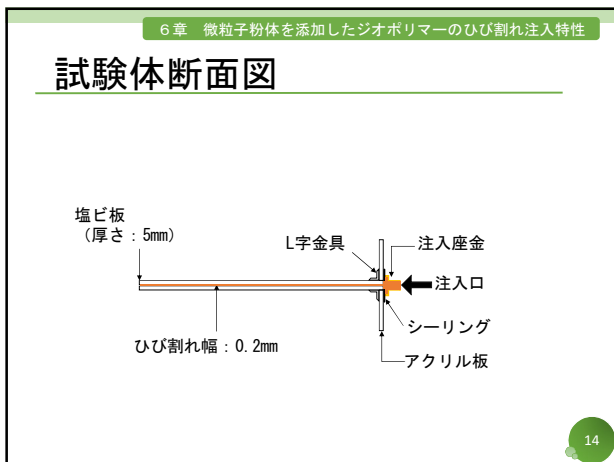
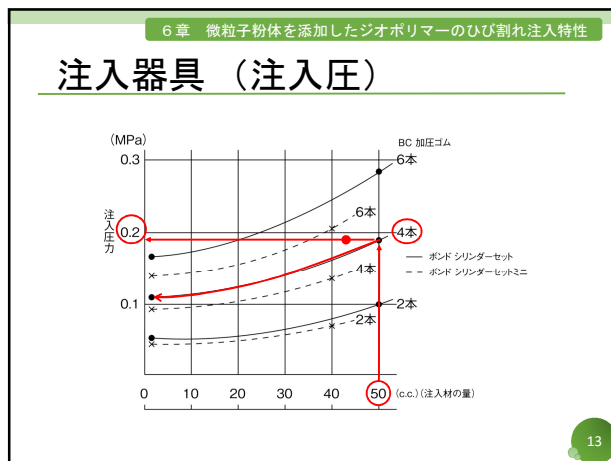
ゴム製注入器具
容量：50cc
ゴム：4本

300mm

300mm

@50mm

12



6章 微粒子粉体を添加したジオポリマーのひび割れ注入特性

実験結果：溶液粉体比(W/P)の影響

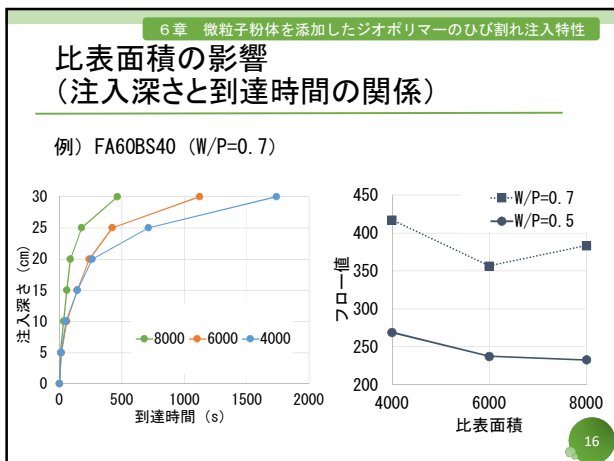
例) FA:BS (6000)=60:40

W/P=0.5		W/P=0.7	
溶液	粉体	溶液	粉体
5	10	7	10

5cm : 1分59秒
10cm : 26分20秒

5cm : 18秒
10cm : 1分14秒

15



6章 微粒子粉体を添加したジオポリマーのひび割れ注入特性

実験結果：シリカフュームの影響

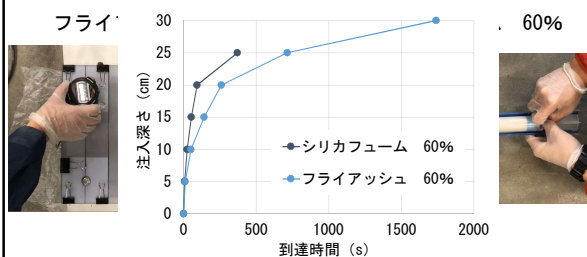
例) 高炉スラグ微粉末(4000)40% (溶液粉体比W/P=0.7)

フライアッシュ 60% シリカフューム 60%

17

実験結果:シリカフュームの影響

例) 高炉スラグ微粉末(4000)40% (溶液粉体比W/P=0.7)



18

まとめ

環境に優しい材料であるジオポリマーをひび割れ補修材として活用することを目的とし、微粒子粉体を用いたジオポリマーの基礎特性および擬似ひび割れによる注入性能についての検討を行った。

溶液(水ガラス2号:水酸化ナトリウム水溶液=2:1)の種類を一定とし、粉体比を変えた

- 1) シリカフュームおよび比表面積の異なる高炉スラグ微粉末の基礎特性を明らかにした。
- 2) 0.2mm幅の平行な擬似ひび割れモデルに注入が可能で、溶液粉体比を増加させること、微粒子粉体を用いることで、ひび割れ注入性能が向上することを明らかにした。

17

今後の課題

本研究では、ジオポリマーのひび割れ補修材としての活用を目的とし、微粒子と溶液粉体比による注入性状への傾向を明らかにした。



実際のコンクリートのひび割れに注入し、ジオポリマーの注入性について調べる。



収縮量、耐候性、耐酸性、注入後の外的要因(水分、塩分など)の浸入性などについて調べる。

18

初期欠陥が生じた鉄筋コンクリート梁の断面修復後の力学挙動に関する基礎的実験

正会員 ○ボンマハーサイパラミ*¹ 同 伊藤彰利*¹
 同 三島直生*² 同 畑中重光*³

初期欠陥 断面修復 曲げ試験
 無収縮モルタル 鉄筋コンクリート梁 曲げ解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC）構造物においては、工事の施工不良等によりかぶり厚さ不足、ジャンカや空洞等の初期欠陥が発生してしまうことも少なくない。このような初期欠陥は、耐力や部材の剛性などの構造的性能に影響を与えるだけでなく構造物の美観性、耐久性などを低下させることに直接影響する。このため、比較的大きな欠陥が発見された場合、その不良箇所をはつり取り、新たな材料を充填する、断面修復工法による補修が行われるのが一般である。

しかし、初期欠陥を補修した RC 部材の力学挙動に関する研究が充実していないことや、補修後の挙動が複雑で不明な点が多いのが現状である。そこで本実験では、RC 梁試験体を対象に圧縮縁中央においてかぶりコンクリート部分に欠陥が発生したと想定し、断面修復を施して曲げ試験を行い、健全状態と比較することで補修前と補修後の力学挙動に及ぼす補修効果について調べた。

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験で対象とした梁試験体は、健全試験体、梁上面の中央にジャンカおよび断面修復を行った試験体の計 4 体とした。なお、補修試験体に関しては、母材コンクリートと補修材との付着状態を良いものと悪いものの 2 種類とした。

梁試験体の形状、寸法および配筋の状況を図-1 に示す。全長は 1700 mm、幅は 120 mm、高さは 200 mm とした。主筋

は引張側には D16 を 2 本、圧縮側には D10 を 2 本、せん断破壊を防ぐためのせん断補強筋には D6 を間隔 80 mm で配筋した。良好なコンクリート部分の調合は表-1 に示す。

ジャンカあるいは補修を設けた箇所は、梁スパン中央の等曲げ区間内の圧縮縁とした。その寸法は、深さ 30mm、幅 120mm、長さ 300mm とした。欠陥あるいは補修部分の作成方法は、健全コンクリート部分の打設を行う際に、設定した欠陥と同等な形状の発泡スチロールを型枠内に埋め込み、脱型後その発泡スチロールを除去してジャンカあるいは無収縮モルタル（補修材）を充填した。ジャンカの調合は、文献^{1,2)}を参考に表-1 に示すようにモルタル分の質量を 60%低減して作成した。補修には、市販の超高強度型無収縮モルタルを使用した。また、補修材の付着の不良箇所は、発泡スチロールの表面をビニールテープで覆うことで界面を平滑にし、さらに補修の際は水分湿しを行わずに乾燥状態のままで施工した。

2.2 試験方法

曲げ試験において、载荷には万能試験機を用い、スパン 1200mm、等曲げモーメント区間 400mm の 3 等分点载荷とした。なお、载荷方法は単調漸増载荷とし、明らかな耐力低下まで载荷を継続することとした。図-2 に曲げ試験の概要を、図-3 にひずみゲージの配置を示す。

3. 実験結果および考察

3.1 材料特性

表-2 にコンクリート、補修モルタルおよびジャンカの圧縮

表-1 コンクリート及びジャンカの調合

種類	F _c (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュ性状		
				W	C	S	G	SP	SL (cm)	Air (%)	T _c (°C)
コンクリート	24	60	44.64	179	298.33	809.92	979.62	0.99	17.8	1.0	26.5
ジャンカ	-	60	24.85	71.60	119.33	323.97	979.62	-	-	-	-

[註] F_c: 設計基準強度, W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材比, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材, SP: 高性能 AE 減水剤; SL: スランプ, Air: 空気量, T_c: 温度

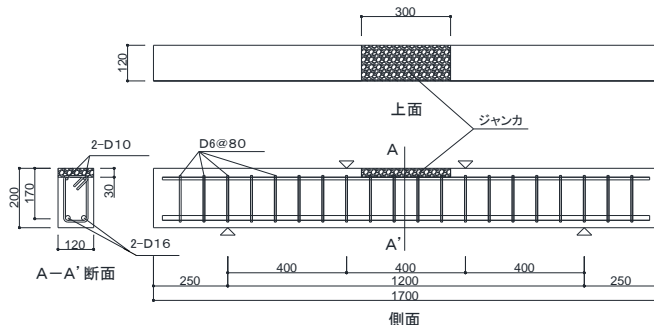


図-1 試験体の寸法及び形状（ジャンカ試験体）

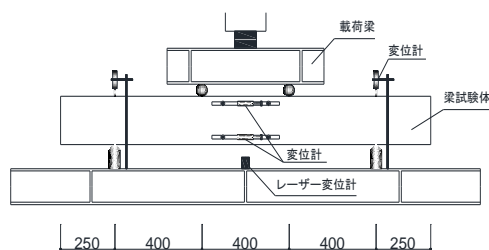


図-2 曲げ試験概要

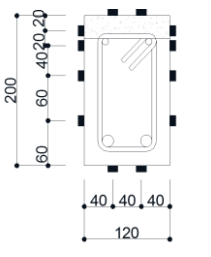


図-3 ひずみゲージ (単位: mm)

性状を、表-3に鋼材の力学性状を示す。母材コンクリートと比べて、補修モルタルの圧縮強度は4倍以上大きく、また、ジャンカは1/3程度の圧縮強度となった。

3.3 ひび割れ状況および破壊性状

図-4に各梁試験体の最終ひび割れ状況を示す。破壊状況としては、まず梁下縁に曲げひび割れが発生し、荷重の増加とともに同ひび割れが圧縮側に進展し、圧縮縁中央のコンクリートあるいはジャンカ部分および補修モルタルが圧壊し、耐力が低下して終局破壊に至るといった典型的な曲げ破壊となった。

健全梁試験体および2種類の補修試験体では、最初の曲げひび割れが荷重15kNのときに発生したのに対し、ジャンカ試験体は約5kN前後に発生した。

補修およびジャンカ試験体のひび割れ状況としては、健全試験体と比較すると、いずれもせん断スパンの領域に微細なひび割れが多く発生したことを除き、ほぼ同様であった。また、いずれの試験体においても、引張主筋に沿った付着ひび割れの発生が観察できた。これは、打込みの際に本来上面となる面を下向きにしたため、ブリーディングなどの影響や気中養生による乾燥などの影響が考えられる。

補修試験体の2種類を比較すると、付着不良の場合は荷重が70kNのときに、付着面の剥がれ音がし、付着面の隙間が徐々に大きく開き、終局時に補修モルタルが破壊して試験体から剥離したが、付着良好の試験体にはこのような破壊は起きなかった。

3.4 曲げ耐力および変形性状

図-5に荷重-たわみ関係を、図-6に曲げモーメント-曲率関係を示す。なお、図-6には解析結果も併示する。解析では、平面保持の成立、コンクリートの引張応力の無視、コンクリートと鉄筋の完全付着を仮定したうえで、コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ曲線をバイリニアモデル（コンクリートの圧壊時ひずみは0.3%）に単純化した。

図-5より、健全試験体は、曲げ降伏後、圧縮縁中央のコンクリートが圧壊し、緩やかに耐力が低下した。

表-2 各種材料の圧縮性状

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
コンクリート	29.2	2.14 × 10 ⁴
補修モルタル	133.3	4.05 × 10 ⁴
ジャンカ	9.5	1.13 × 10 ⁴

表-3 鋼材の性状

呼び名 (SD345)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D16	366.4	551.3	20.1 × 10 ⁴
D10	355.9	489.9	19.7 × 10 ⁴
D6	391.5	532.7	19.1 × 10 ⁴

補修試験体はいずれも健全試験体と同等の耐力が得られ、曲げ降伏後に間もなく補修部分が脆性的に圧壊し、耐力が約85%まで急激に低下し、その後下部のコンクリートが負担して再び耐力が一定となった。ジャンカ試験体は健全試験体と比較して明らかに耐力および初期剛性が低い結果となった。

2種類の補修試験体の結果には、大きな違いが見られなかった。この理由として、補修部周囲のコンクリートからの拘束の影響も考えられ、検討が必要である。さらに実験値と計算値の結果を比較すると、若干ばらつきはあるものの、曲げ剛性および降伏耐力の値は概ね一致している。

4. まとめ

本実験の範囲では以下のような知見が得られた。

- 1) 梁の圧縮縁中央部にジャンカのような欠陥がある場合、梁全体の最大耐力および曲げ剛性が低下する。
- 2) 欠陥部に対し高強度の無収縮モルタルを使用して断面修復したことで、健全な状態と同等の曲げ耐力を回復することができた。
- 3) 今回補修に使用した無収縮モルタルは、曲げ耐力の回復に効果が見られたが、終局時に急激な耐力低下を生じた。

[参考文献]

- 1) 佐々木尚美, 小林薫, 半井健一郎: はり下面に豆板補修箇所を有するRCはりのせん断破壊挙動に関する実験的検討, 土木学会構造工学論文集, Vol.61A, 2015
- 2) 池野誠司, 小林薫, 坂本淳, 梁俊: コンクリート充填不良箇所への固結材注入による補修方法確認試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, 2010
- 3) 田村雄一, 畑中重光, 三島直生: 低強度コンクリートを用いたRC梁の破壊挙動とCFRPによる補強効果に関する研究, 平成21年度三重大学修士論文

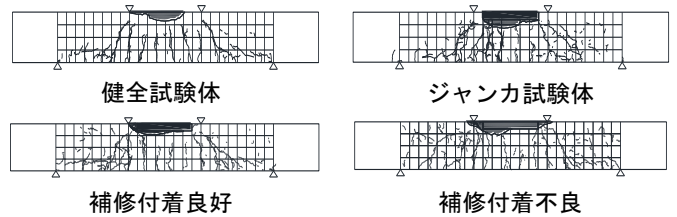


図-4 終局時のひび割れ及び破壊の性状

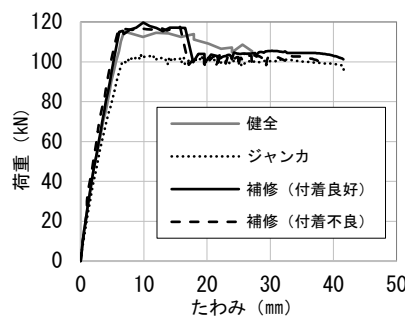


図-5 荷重-たわみ関係

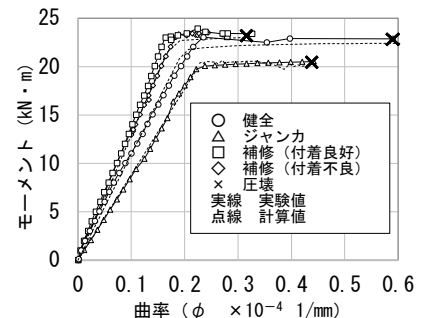


図-6 モーメント-曲率関係

*1 三重大学大学院工学研究科建築専攻 大学院生
 *2 三重大学大学院工学研究科建築専攻 准教授 博士 (工学)
 *3 三重大学大学院工学研究科建築専攻 教授 工学博士

*1 Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ.
 *2 Assoc. Prof, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.
 *3 Prof, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

傾斜せん断試験によるジオポリマーモルタルとコンクリートの付着特性に関する基礎的研究

Fundamental Study on Adhesion Characteristics of Geopolymer and Concrete by Slant Shear Test

A : 材料施工	1 : 材料施工		正会員	○伊藤 彰利*	ITO Akitoshi
ジオポリマー	コンクリート	付着特性	同	ポンマーハサイ パラミ*	PHOMMAHAXAY Palamy
傾斜せん断試験	フライアッシュ	補修材料	同	畑中 重光**	HATANAKA Shigemitsu

1. はじめに

セメントクリンカを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ溶液を用いて硬化した¹⁾ ジオポリマーは、産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグの有効活用、CO₂の排出量を低減出来ることから、低炭素・資源循環型社会実現のためのセメント代替材料として、土木分野および建築分野における構造物への利用が期待されている。しかし、現在その用途や活用方法は模索中の段階である。

本研究では、ジオポリマーが耐酸性、耐火性、耐候性、鉄筋との付着に優れるという特徴を有している点、また使用する材料、調合次第で強度、可使用時間、フローが多様に変化する点を踏まえて、本研究ではコンクリート構造物の補修材料としての活用を検討する。そのため、研究の第一段階としてジオポリマーとコンクリートとの付着について調べることで、傾斜せん断試験を行う。

補修材の施工にあたっては、用いる材料や施工環境に配慮しなければならない。例えば、有機系であれば、紫外線、温度管理、湿潤面での接着不良²⁾、コンクリートとの熱膨張係数、引張強度などの違い、また無機系（ポリマーセメント系）の場合には、セメントの水和生成物としてのCa(OH)₂結晶やC-S-Hゲルが耐酸性、耐火性に劣ることや、打設面が湿潤な状態で施工するとドライアウトが発生する場合があることなどである。³⁾そこで、本研究ではコンクリートの湿潤面、または乾燥面にジオポリマーを施工したときの付着性状についても同時に検討する。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

(1) 要因と水準

表1に実験の要因と水準を、図1に供試体の形状および寸法を示す。母材となるコンクリートの圧縮強度を30N/mm²とし、補修材としてコンクリートと同強度のジオポリマーモルタル（以下、GP）と補修用無収縮モルタル

表1 要因と水準

	圧縮強度 (N/mm ²)	ドライアウト	打ち継ぎ 角度 (°)
コンクリート	30	—	—
ジオポリマーモルタル (GP)	30	無、有	30, 45, 60
補修用無収縮モルタル (RM)	60	無	
補修用無収縮モルタル (RM)	30	無、有	

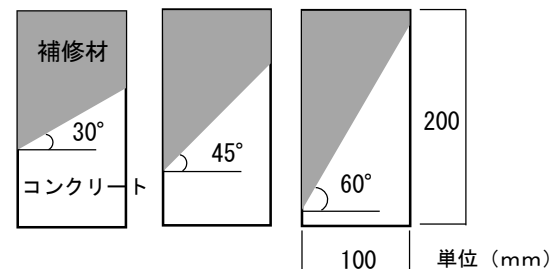


図1 供試体の形状・寸法

表2 GP使用材料

種類	名称	記号	密度 (g/cm ³)
粉体	フライアッシュⅡ種	FA	2.26
	高炉スラグ微粉末	BS	2.91
溶液	水ガラス2号	WG	1.45
	水酸化ナトリウム水溶液	NH	1.35
細骨材	6号珪砂	S	2.68

ル（以下、RM）、さらに強度が高い60N/mm²のGPの3水準とした。

表中のドライアウトは、補修材の打込み面が平滑面となるように、コンクリートを打ち込む際に打継ぎ部となる面をビニルテープで表面を覆い（脱型時にビニルテープは除去）、さらに打継ぎ部が乾燥した状態で補修材を打ち込んだもののことである。ドライアウトでない状態とは、補修材を打込む前に、打継ぎ部を表面で濡らした状態のことである。

打継ぎ面の傾斜角度は30、45、60°の3水準とした。

* 三重大学大学院工学研究科建築学専攻

** 三重大学大学院工学研究科建築学専攻

Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ.

Prof. Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

表3 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

F _c (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュ性状		
			W	C	S	G	SP	SL (cm)	Air (%)	Tc (°C)
24	53.8	45.6	178	331	799	966	3.3	16.5	5.5	22

※ F_c: 設計基準強度, W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材比, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材,
SP: 高性能 AE 減水剤, SL: スランプ, Air: 空気量, Tc: 温度

表4 GP モルタルの調合

F (N/mm ²)	W/P (%)	bs/p (%)	fa/p (%)	単位量 (kg/m ³)				砂 (S)	フロー値 (mm)
				活性フィラー (P)		溶液 (W)			
				FA	BS	水ガラス	NaOH		
30	0.6	0.1	0.9	449	64	216	92	1436	239
60	0.6	0.3	0.7	360	155	217	92	1442	246

※ F: 設計基準強度, W/P: 溶液粉体比 (質量比), bs/p: 高炉スラグ置換率 (容積比),
fa/p: フライアッシュ置換率 (容積比), FA: フライアッシュ, BS: 高炉スラグ, S: 細骨材

表5 補修用無収縮モルタルの調合

F (N/mm ²)	W/B	S/B	単位量 (kg/m ³)			フロー値 (mm)
			W	B	S	
30	0.4	2.5	213	532	1329	127.4

※ F: 設計強度, W/B: 水結合材比, S/C: 砂結合材比,
W: 水, B: プレミックス無収縮モルタル粉体, S: 細骨材

(2) 調合

表2にGPに用いた材料を示す。GPの材料および調合方法は、日本コンクリート工学会「建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会」の共通試験¹⁾を参考にした。表3にコンクリート、表4、5にGP、RMの調合を示す。

2.2 供試体の作製方法

写真1に供試体の作製状況を示す。傾斜せん断試験に用いた供試体の寸法は、幅100mm、長さ100mm、高さ200mmで、鋼製型枠に角度を30、45、60°となるように、発泡スチロール製の材料で半分に分け、まず片側にコンクリートを打ち込んだ(写真1-A)。

次にコンクリートの材齢7日目の時点で脱型し、発泡スチロール製材料を除去した後、型枠に再び供試体を設置し(写真1-B)、残りの半分に補修材(GP、RM)を打ち込んだ(写真1-C)。

打込み後の養生は、コンクリート、補修材共に定期的に水湿しをしながら、ビニルシートで密閉し、封緘養生とした。補修材の材齢が28日目(コンクリートの材齢35日)に傾斜せん断試験を行った(写真1-D)。

2.3 実験方法

(1) 圧縮強度試験

使用したコンクリート、補修用のモルタル(GP、RM)

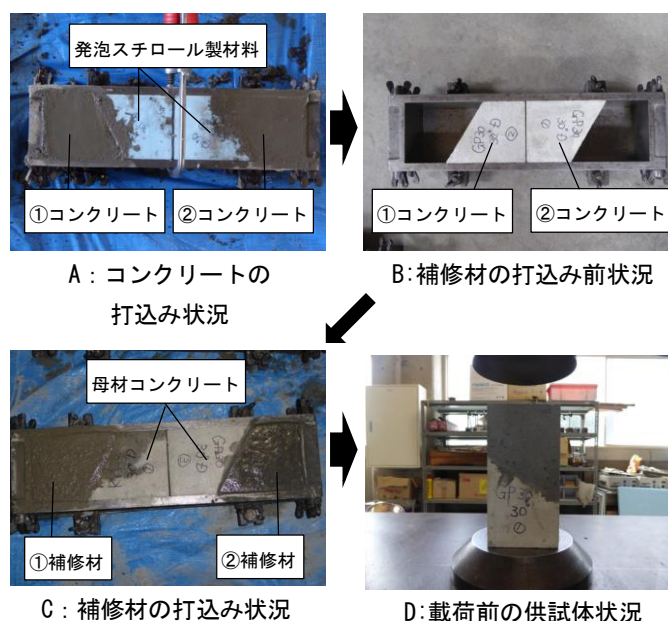


写真1 供試体の作製状況

の材料特性(圧縮強度、引張強度、ヤング係数)を把握するため、円柱供試体を作製し、傾斜せん断試験と同じ材齢で圧縮試験および割裂引張試験を行った。圧縮供試体は端面を研磨し、载荷には万能試験機を用いた。

(2) 傾斜せん断試験

傾斜せん断試験では、既往の研究^{4) 5)}を参考に、補修材料の違いと打継ぎ部の表面処理の程度がせん断強度に与える影響を評価するため、材料特性、傾斜角度、表面処理程度が異なる打継ぎ部を有する角柱供試体を作製した。なお比較のための、打継ぎのないコンクリートのみの供試体(健全)の圧縮強度も測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 使用材料の特性

表6に各使用材料の特性、図2に圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係を示す。GP30はコンクリートと同程度の強度で、ヤング係数が小さい。GP60はコンクリートより強度が大きい、ヤング係数は同程度となっている。RMは同程度の強度でヤング係数が大きいことが分かる。

3.2 傾斜せん断試験結果

図3に傾斜せん断試験の結果を示す。図中には、各供試体の平均強度が示してあり、母材コンクリート(健全)は、31.4N/mm²であった。補修した供試体はそれぞれ左から傾斜角30°、45°、60°の順で、Dはドライアウトを示している。

(1) 使用材料による影響

GP60の傾斜せん断試験結果を抜き出し、図4に示す。図3、4より、GP60のみ全ての傾斜角においてコンクリートと比較的に近い強度である30N/mm²程度の値を示していることが分かる。

表7に、傾斜角60°での各材料による破壊状況の違いを示す。GP60は、母材と一体化していると思われる破壊を示し、その他の材料は、付着界面で分離していることが分かる。

また、GP30Dは破壊形式が3種類あり(表7②)、母材と一体化していると思われる破壊(左)、付着界面が部分的に剥離し破壊した場合(中)、および付着界面で完全に分離した(右)である。GP30Dの付着界面で完全に分離した破壊は他の材料と比べて界面が凹凸で大きく、母材との食いつきが良いことが分かる。

(2) ドライアウトの有無による影響

図5にGP、図6にRM供試体について、ドライアウトの有無が付着強度に及ぼす影響を示す。傾斜角30°では、GP、RM共にドライアウトの有無は影響無く、圧縮強度は30N/mm²前後である。さらに破壊状況も、全て母材と一体化していると思われる破壊を示した。(表8)

表6 各使用材料の性状

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
コンクリート	30.4	2.9	22.1
GP30	33.4	2.9	15.2
GP60	56.8	4.1	18.9
RM	32.0	3.7	28.0

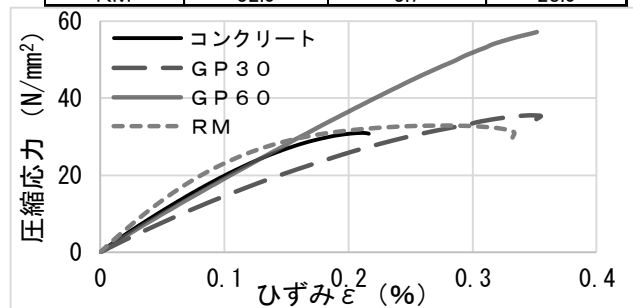


図2 各材料の応力-ひずみ関係

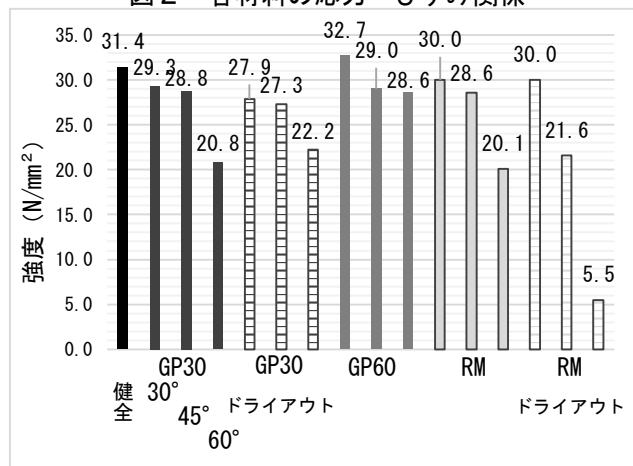


図3 傾斜せん断試験結果

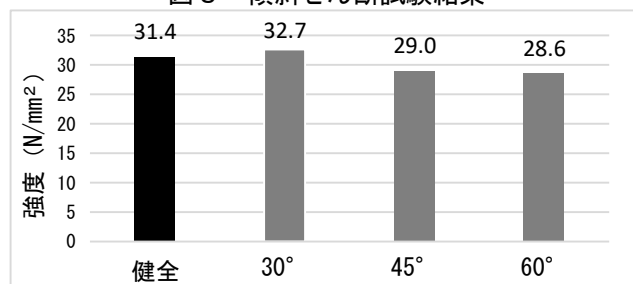


図4 GP60の試験結果

表7 傾斜角60°での材料による破壊状況の違い

① ドライアウト有	② ドライアウト無			③GP60	④ ドライアウト有	⑤ ドライアウト無
GP30					RM30	

図5によれば、GPの場合、どの傾斜角においても、ドライアウトの有無による強度の差が少ないことから、ドライアウトの影響は受けていないことが分かる。一方、図6によれば、RMでは傾斜角45°の時点で、ドライアウト有りが28.6N/mm²に対して、無しが21.6N/mm²と強度が低下している。さらに、傾斜角60°では、ドライアウト有りと無しで4倍近く強度が異なっている。このことから、セメント系モルタルは、明らかにドライアウトの影響を受けていることが確認できた。

表9に傾斜角45°での破壊状況による違いが示してある。RM30Dは他の材料に比べて強度が低く、付着界面で剥離している。RM30, GP30, GP30Dと同程度の強度であるが、RM30は付着界面で剥離したのに対し、GPの2種類は母材と一体化した破壊を示した。これらより、GPは無収縮モルタルに比べてコンクリートへの食いつきが良いことが分かる。

4. まとめ

本実験により、ジオポリマーとコンクリートの付着に関して以下の知見が得られた。

- 1) コンクリートより強度が高く、ヤング係数が同程度のジオポリマーは、コンクリートとほぼ一体化したと見なせる付着性状を示すものが多かった。
- 2) ジオポリマーは無収縮モルタルと比べてドライアウトの影響を受けにくい。
- 3) 傾斜せん断試験の破壊性状から判断して、ジオポリマーは無収縮モルタルと同等以上の付着力を有すると考えられる。

5. 今後の課題

今回、GPとの比較を無機系のモルタルのみで行った。今後、有機系の補修材など別の材料との比較を行う必要がある。また、傾斜せん断試験での単純な強度の比較を行ったが、別の付着試験による確認も行う必要がある。

謝辞

本研究に際し、三島直生先生（三重大学准教授）、坪内徹朗氏（三重大学大学院生）のご助力を得た。また、本研究費の一部は科学研究費基盤研究B（研究代表者：一宮一夫・大分高専教授）によった。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
- 2) 日本材料工学会：アクリル樹脂を用いたコンクリートひび割れ補修材に関する基礎的研究，Vol.56, No.12, pp.1183-1188, 2007.12
- 3) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編]，2012
- 4) Tanakorn Phoo-ngernkham, Vanchai Sata, Sakonwan Hanjitsuwan,

表8 傾斜角30°での破壊状況



表9 傾斜角45°での破壊状況

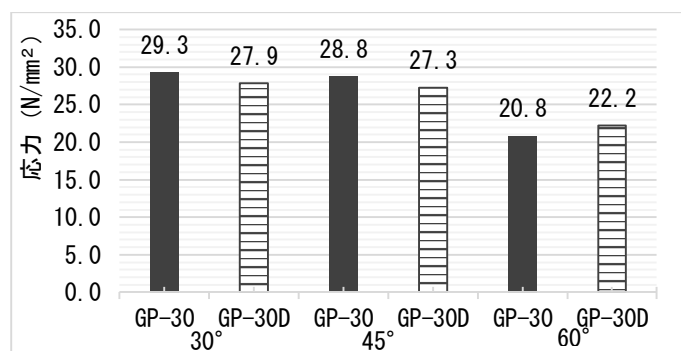
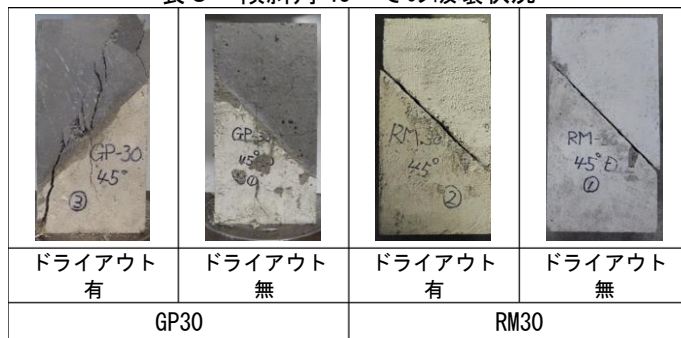


図5 GPのドライアウトの有無による比較

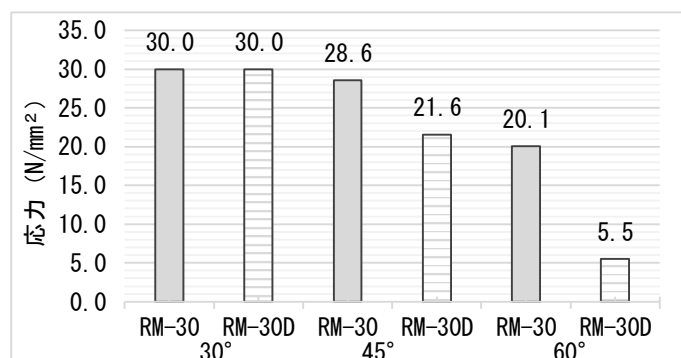


図6 RMのドライアウトの有無による比較

Charoenchai Ridtirud, Shigemitsu Hatanaka, Prinya Chindaprasirt: High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, Construction and Building Materials, pp.482-488, 2015
5) 金子佳生, 三橋博三: ひずみ局所化領域におけるコンクリートのせん断軟化特性に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.573, 145-152, 2003.11

ジオポリマーモルタルを用いて断面修復したRC曲げ部材の力学的挙動に関する実験的研究

Experimental Study on Flexural Behavior of RC Beams Repaired with Geopolymer Mortar

B: 構造	2: 構造		正会員	○ポンマハーサイ パラミ*	PHOMMAHAXAY Palamy
RC 梁	断面修復	無収縮モルタル	同	伊藤 彰利*	ITO Akitoshi
ジオポリマーモルタル		曲げ試験	同	畑中 重光**	HATANAKA Shigemitsu

1. はじめに

一般に断面修復工法に用いられる材料は、ポリマーセメント系やエポキシ樹脂系のモルタルが多い¹⁾。しかし、このような補修材料にはいくつかの問題点が挙げられる。エポキシ樹脂系の場合は、紫外線などに弱く耐候性が劣ること、引張強度、熱膨張係数及び弾性係数などの性質がコンクリートとは相違することが挙げられる。一方、ポリマーセメント系の場合は、セメントの水和生成物としてのCa(OH)₂結晶やC-S-Hゲルは耐酸性や耐火性などが劣ることなどが挙げられる^{2) 3)}。

ジオポリマー(GP)は、セメントをまったく使用しないため、セメントの代替材料として用いれば製造過程における二酸化炭素の排出量の低減が期待できる。GPは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの活性フィラーとアルカリ溶液(活性剤)の混合で生成した縮重合体である。既往の研究によると、GPは普通コンクリートと同等なレベルまで強度発現が可能で、可使用時間や養生時間が短く、コンクリートおよび鉄筋との付着性がよく、また耐火性や耐酸性が優れるなどの特徴があるといえる^{3) 4)}。GPに関しては、まだ基礎的な品質や建設用材料としての性質・性能を解明にする段階にあるが、土木分野および建築分野における構造物への利用が期待できる。特に構造物の補修工事において有効な活用が期待できると考えられる。

そこで本研究では、コンクリート構造物の補修材料としてジオポリマーの実用性についての検討をすることを目的とし、その第一段階として、ジオポリマーを補修材料として使用したRC部材の曲げ変形挙動およびその破壊特性を実験的に明らかにすることとした。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1に本実験の要因水準および各試験体の詳細を示す。要因としては、断面修復材料の種類および補修界面の処理の違いを取り上げた。断面修復材料は、母体コンクリートの強度と同等レベルの無収縮モルタル(以下、

NSM)とGPモルタル(以下、GPM)、そして母体コンクリートの強度より約2倍大きい強度を有するGPMの3種類とした。

また、補修界面の処理の違いによる影響も検討するため、付着が良好な場合と不良な場合を取り上げた。なお、付着が良好な状態とは、界面が細かな凸凹状で、補修する前に十分に水分の供給を行った状態である。また、不良の場合とは、打設の段階で界面を平滑に仕上げ、水分の供給を行わずに補修を行った状態である。

2.2 試験体概要

梁試験体の形状、寸法及び配筋の状況を図-1に示す。今回の実験に使用したすべての梁試験体は、全長1700mm、幅120mm、高さ200mm、そして等曲げモーメント区間を400mmとした。引張側の主筋にはD16を2本、圧縮側の主筋にはD10を2本、そしてせん断破壊を防ぐためのせん断補強筋にはD6を間隔80mmで配筋した。すべての梁試験体は、最終破壊形式を曲げ破壊となるように設計した。補修を設けた箇所は、梁中央の圧縮縁とした。補修部分の寸法は、深さがかぶり厚さに相当する30mm、幅は梁幅と同様で120mm、長さは300mmとした。また、補修箇所の形状は台形とした。

表-1 実験の要因水準および試験体の詳細

No	名称	状態		
		補修	補修材料	付着状況
1	N	健全	-	-
2	GPM30	あり	30N/mm ² のGPモルタル	良好(粗面+ 湿潤状態)
3	GPM60		60N/mm ² のGPモルタル	
4	NSM30		30N/mm ² の無収縮モルタル	
5	GPM30-B		30N/mm ² のGPモルタル	不良(平滑面+ ドライアウト)
6	NSM30-B		30N/mm ² の無収縮モルタル	

表-2 無収縮モルタルの調査

F (N/mm ²)	W/B (%)	S/B (%)	単位量 (kg/m ³)			フロー値 (mm)
			W	B	S	
30	0.4	2.5	213	532	1329	127.4

[註] F: 設計強度, W/B: 水結合材比, S/B: 砂結合材比, W: 水,

B: プレミックス無収縮モルタル粉体, S: 細骨材

* 三重大学大学院工学研究科建築専攻 大学院生

* Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ.

** 三重大学大学院工学研究科建築専攻 教授 工学博士

** Prof. Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

表-3 コンクリートの調合およびフレッシュの性状

Fc (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュ性状		
			W	C	S	G	SP	SL (cm)	Air (%)	TC (°C)
24	53.8	45.6	178	331	799	966	3.3	16.5	5.5	22

【註】 Fc: 設計基準強度, W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材比, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材,
SP: 高性能 AE 減水剤, SL: スランプ, Air: 空気量, Tc: 温度

表-4 GP モルタルの調合

F (N/mm ²)	W/P (%)	bs/p (%)	fa/p (%)	単位量 (kg/m ³)				フロー値 (mm)	
				活性フィラー (P)		溶液 (W)			
				FA	BS	水ガラス	NaOH		
30	0.6	0.1	0.9	449	64	216	92	1436	239
60	0.6	0.3	0.7	360	155	217	92	1442	246

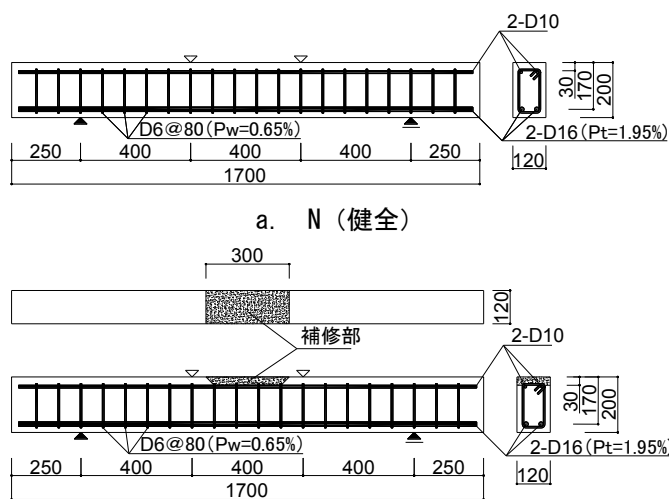
【註】 F: 設計強度, W/P: 溶液粉体比 (質量比), bs/p: 高炉スラグ置換率 (容積比), fa/p: フライアッシュ置換率 (容積比),
FA: フライアッシュ, BS: 高炉スラグ, S: 細骨材

表-5 使用鉄筋の特性

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D6 (SD345)	370	1.74×10^5
D10 (SD345)	336	2.1×10^5
D16 (SD345)	345	2.1×10^5

表-6 各使用材料の性状

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
コンクリート	30.4	2.9	22.1
GP30モルタル	33.4	2.9	15.2
GP60モルタル	56.8	4.1	18.9
無収縮モルタル	32.0	3.7	28.0



b. GPM30, GPM60, NSM30, GPM30-B および NSM30-B
図-1 試験体の形状および配筋

2.3 調合と使用材料

表-2~表-4 には無収縮モルタル, コンクリートおよび GP モルタルの調合をそれぞれ示す。また, 表-5 に鉄筋の特性を, 表-6 には各使用材料の特性を, 図-2 には圧縮試験より求められた応力-ひずみ関係を示す。同一強度のコンクリートに比べ, ジオポリマーのヤング係数が小さいことが分かる。

2.4 試験方法

図-3 に曲げ試験の概要図を示す。曲げ試験において, 荷重には万能試験機を用い, スパン 1200mm, 等曲げモーメント区間 400mm の 3 等分点荷重とする。なお, 荷重方法は荷重速度 0.4kN/s の単調漸増荷重とし, 最大耐力に到達して明らかな耐力低下が生じるまで荷重を継続す

る。また, 曲げひび割れが発生するまでの初期段階における荷重の増加量は, 最大荷重の 1/50 (約 2.5kN に相当) 程度とする。その後は, 荷重の増加量を最大荷重の 1/25 (約 5kN) 程度とし, 各荷重段階においてひび割れ発生状況や進展, 及び破壊性状を記録する。

梁中央部のたわみ量の測定は, 梁試験体のスパン中央部に設置したレーザー変位計と両支点に設置した高感度変位計により求める。中央断面のひずみ分布は, ワイヤーストレインゲージを図-4 のように貼り付けて測定する。

3 実験結果及び考察

3.1 ひび割れ発生状況および破壊性状

図-5 に実験終了時の破壊状況を示す。各梁試験体は, 梁下縁に曲げひび割れが発生し, 荷重の増加とともに圧

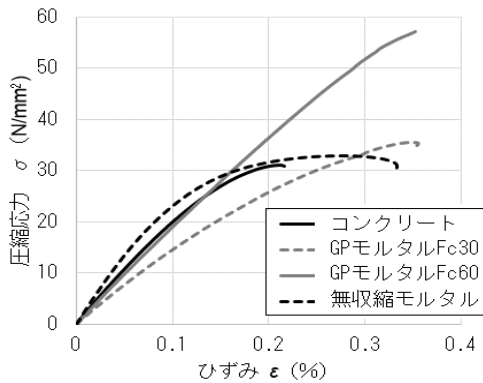


図-2 各材料の応力-ひずみ関係

縮側に進展し、圧縮縁中央のコンクリートあるいは補修箇所が圧壊し、耐力が低下して終局破壊に至るといった典型的な曲げ破壊をした。

健全試験体 N は、荷重 20kN のときに最初の曲げひび割れの発生が確認できた。それに対し、NSM30 試験体は、約 17.5kN のときにひび割れが発生した。荷重の増加とともに、ひび割れの進展は確認できたが、降伏前において補修箇所あるいは母材コンクリートとの界面でのひび割れや破壊はまだ見られなかった。梁全体が曲げ降伏に達した後、梁中央変位が約 10mm になったところで補修箇所付近のコンクリートと補修界面にひび割れが発生し、曲げ変形とともにひび割れ幅が増大して補修界面が剥がれ、曲げ荷重と付着の良好な部分による拘束で補修箇所の破壊が生じた。

NSM30-B 試験体の場合は、降伏前は NSM30 と類似した破壊状況がみられたが、降伏後たわみが約 8mm の時に補修界面と補修モルタルにひび割れが発生し、急速に進展した。付着界面の処理が悪いため、補修界面全体が剥がれ、曲げ荷重の作用で上に押し出される状態となり、補修下部のコンクリートが圧縮破壊をするとともに終局に到達した。

GPM30 と GPM30-B 試験体は、健全の場合と比較して、最初のひび割れ発生が若干低い荷重で確認できた。GPM30 の場合は 15kN で、GPM30-B は約 12.5kN のときであった。降伏後、両者とも小さいたわみ値のときに補修界面でのひび割れの発生が確認できたが、GPM30-B の場合のほうが顕著であった。最終的には、GPM30 の場合、片側の支点側に荷重が偏り、母体から補修箇所が剥がれたが、もう片方は付着がまだ少し良好な状態にあるため、補修箇所の中央付近でモルタルが破壊した。GPM30-B の場合は、補修界面全体にそって発生したひび割れで母体から補修箇所が剥がれて外側に押し出される状態となり、最終的に GP モルタルに斜めひび割れが生じて破壊した。

GPM60 試験体は、荷重が約 15kN のときに最初のひび

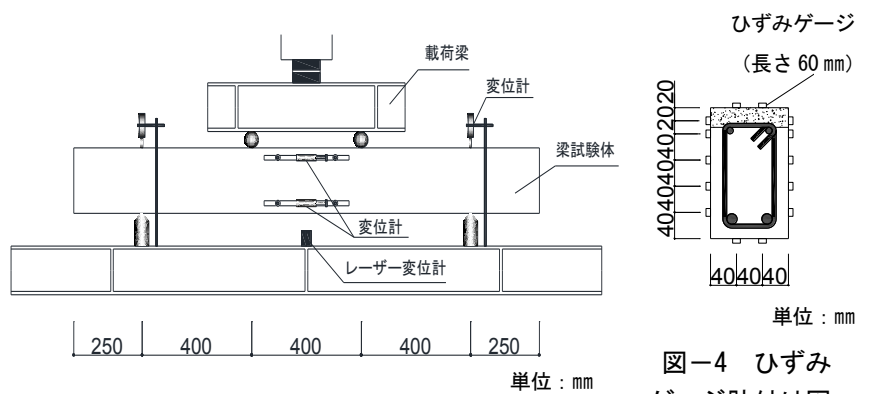


図-3 曲げ試験概要図

図-4 ひずみゲージ貼付け図

割れが確認でき、荷重とともにひび割れが進展していったが、補修部分の強度が大きいため等曲げ区間の変形が小さくせん断スパンで発生したひび割れの進展の方が顕著であった。たわみが約 14mm のときに、補修界面でのひび割れと補修部分の破壊が確認できた。

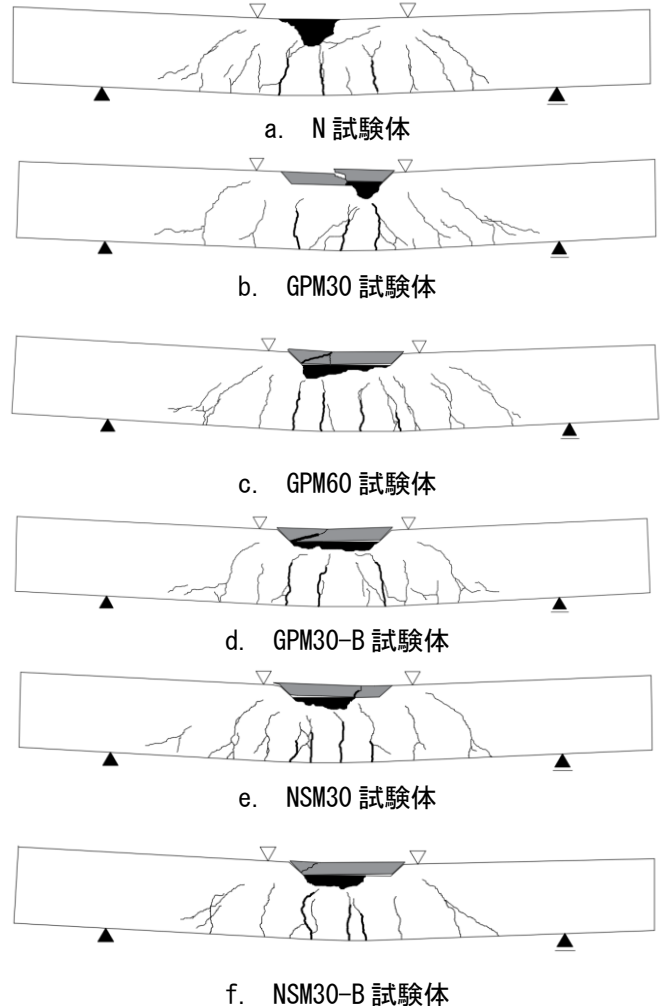


図-5 ひび割れおよび破壊状況 (曲げ試験終了時)

3.2 曲げ耐力

図-6 にすべての梁試験体の荷重-たわみ関係を示す。

GP モルタルで断面修復した場合、強度レベルを問わず、健全の状態および無収縮モルタルで断面修復したものと比較して、降伏荷重および最大荷重が 10%程度低い結果となった。GPM30 と GPM30-B の荷重-たわみ関係はほぼ同様な曲線が得られた。両者とも降伏後、徐々に耐力が低下し、荷重が約 90kN 前後で一定となって変形だけが進展した。一方で、RC 梁のコンクリート強度より約 2 倍強度が大きいジオポリマーで補修した GPM60 の場合は、健全な状態と同等レベルで降伏したが、約 13mm たわんだところで耐力が 90kN 前後まで急低下した。

RC 梁のコンクリート強度と同強度の無収縮モルタルで補修した場合の NSM30 と NSM30-B は健全な状態とほぼ同等な降伏荷重および最大荷重の結果を得たが、たわみが約 10mm 前後の時点で、ある荷重まで 10%ほど耐力が低下し、その後は横ばい状態となった。これは、無収縮モルタルの変形能力が乏しく、ひび割れが入るとすぐに破壊に至ることや、補修界面での付着強度の不足などが原因だと考えられる。

図-7 に RC 梁の中央部断面のモーメント-曲率関係を示す。実験値は、耐力が最大となるときまで示した。なお、図中には解析結果も併示した。解析では、平面保持の成立、コンクリートの引張応力の無視、母材コンクリートと補修モルタルおよび鉄筋との付着は完全と仮定し、コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ曲線をバイリニアモデル（コンクリートの圧壊時ひずみは 0.35%）に単純化した。実験および曲げ解析の曲げモーメント-曲率関係によれば、特に降伏に至るまでの剛性はよく一致している。

5 まとめ

ジオポリマーモルタルを RC 梁の断面修復に用いたところ、以下のような知見が得られた。

- 1) ヤング係数が母材コンクリートに近い高強度 (Fc60) のジオポリマーを用いた RC 梁の場合は、耐力の回復が良い傾向にあった。
- 2) いずれの補修材料を使用した場合においても付着界面処理の違いによる影響が確認できた。
- 3) 付着界面を良好とした試験体においても付着破壊が生じ、急激な耐力の低下の原因となったと考えられた。破壊メカニズムについて、詳細な検討が必要である。

【謝辞】

本研究に際し、三島直生先生（三重大学准教授）、和藤浩氏（三重大学技術専門員）、坪内徹郎氏（三重大学大学院生）のご助力を得た。また、本研究費の一部は科学研究費基盤研究 B（研究代表者：一宮一夫先生・大分高専教授）による。付記して謝意を示す。

【参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編]，2012
- 2) 北田達也，李柱国：コンクリートのジオポリマー系ひび割れ補修材に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2059-2064，2017
- 3) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
- 4) 一宮一夫，津郷俊二，原田耕司，池田攻：ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.575-580，2011
- 5) 吉田己理，小玉克巳，佐藤真一，渡辺裕一：ポリマーセメントモルタルで補修した RC 梁の曲げ性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.1，pp.801-806，1995
- 6) 彭丰，森川英典，小林秀恵：断面修復を考慮した RC はりの連続繊維シート補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1489-1494，2007

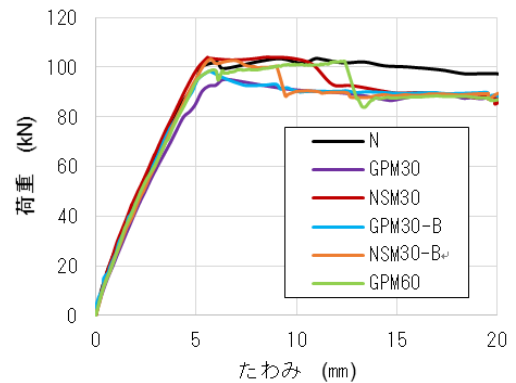


図-6 荷重-たわみ関係

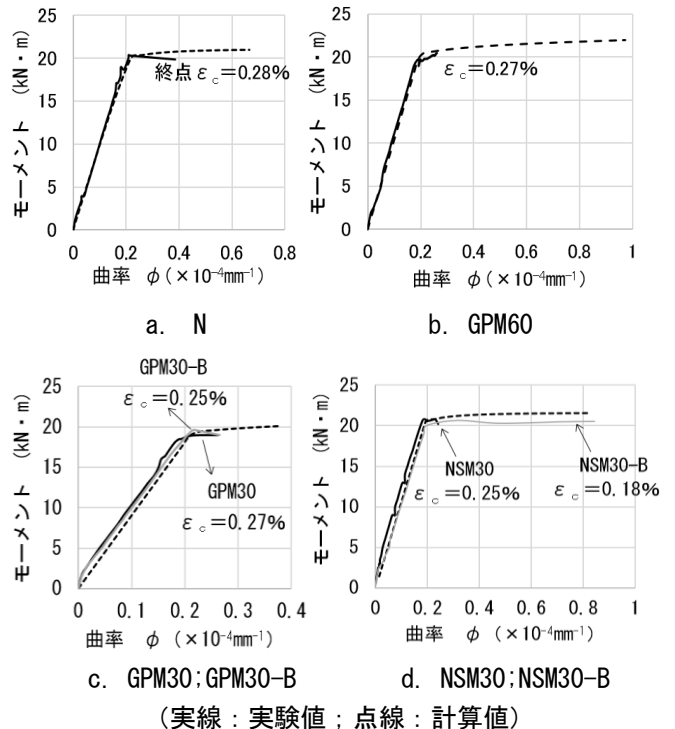


図-7 スパン中央部のモーメント-曲率関係

論文 シリカフェームを添加したフライアッシュベースのジオポリマーペーストに関する基礎的実験

伊藤 彰利*1・ポンマーハサイ パラミ*2・前川 明弘*3・畑中 重光*4

要旨: 本研究では、超微粒子であるシリカフェームの微細なひび割れへの充填効果に期待し、これを用いたジオポリマーペーストをひび割れ補修材として活用することを目的としている。本報では、実験の初期段階として、シリカフェーム、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末を粉体として用い、その比率を変化させ、ジオポリマーペーストの練混ぜの可否、フロー値、圧縮強度への影響について確認した。実験の結果、粉体に占めるシリカフェームの割合が増加した場合には、圧縮強度の低下やフロー値が減少する傾向となり、また調査によっては練混ぜが困難となるものや、体積膨張が生じるものがあることを明らかにした。

キーワード: ジオポリマー、シリカフェーム、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、圧縮強度、フロー値

1. はじめに

セメントクリンカを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ溶液を用いて硬化させたジオポリマー¹⁾は、産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末の有効活用、CO₂の排出量を低減出来ることから、低炭素・資源型社会実現のためのセメント代替材料として、土木分野および建築分野における構造物への利用が期待されている。しかし、その用途や活用方法は模索段階である。

現在、ひび割れ補修材は有機系補修材料であるエポキシ樹脂が付着やひび割れ追従性能などが良いことから、多く活用されているが、紫外線による劣化や耐火性に劣る点、施工時の温度管理や湿潤面での接着不良²⁾³⁾、またコンクリートとの熱膨張係数、引張強度が異なるなどの問題がある。一方、無機系の材料であるジオポリマー（以下、GP）は耐久性に優れ、コンクリートと同程度の材料特性が得られ、さらにコンクリートおよび鉄筋との付着が良いという特徴がある。

本研究では、粒径の細かさが注入深さに関係することから⁴⁾、超微粒子であるシリカフェーム（以下、SF）の微細なひび割れへの充填効果を期待し、ひび割れ注入材としてのGPの活用を模索するための初期段階としての基礎的な実験を行った。

SFを添加したGPの製造では、水ガラスの代わりにSFを加える「ケイ素粉体添加その場溶解法」が多く用いられているが、SF添加によって可使時間が延長でき⁵⁾、高炉スラグ粉末（以下、BS）を多用して凝結が早くなり練り混ぜられなくなる場合にも、SFの添加によって練混ぜが可能となる⁶⁾ ことなどが報告されている。また、硫酸

表-1 使用材料

種別	略号	材料名	密度 (g/cm ³)
粉体 (P)	FA	フライアッシュII種 (JIS A 6201)	2.29
	BS	高炉スラグ微粉末4000 (JIS A 6206)	2.91
	SF	シリカフェーム (JIS A 6207)	2.2
溶液 (W)	WG2	水ガラス2号 原液	1.45
	NH	水酸化ナトリウム水溶液(10mol/L)	1.35

表-2 実験の要因と水準

No.	供試体の名称	W/P *2	粉体に占める各材料の割合 (%) *2			NH/WG2 *2
			FA	BS	SF	
1	FA100-BS0-SF0	0.5	100	0	0	0.5
2	FA75-BS0-SF25		75	0	25	
3	FA50-BS0-SF50		50	0	50	
4	FA0-BS0-SF100	0	0	100		
5	FA80-BS20-SF0	0.5	80	20	0	
6	FA60-BS20-SF20		60	20	20	
7	FA40-BS20-SF40		40	20	40	
8	FA70-BS30-SF0		70	30	0	
9	FA50-BS30-SF20		50	30	20	
10	FA35-BS30-SF35		35	30	35	

*1 W/P=0.5 で練混ぜが不可能であり、溶液を加えて練混ぜた値

*2 質量比で調査計算を行った

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*3 三重県工業研究所 ものづくり研究課 博士 (工学) (正会員)

*4 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

塩に対して抵抗性が高く、硫酸イオンの浸入遅延作用が期待されている⁷⁾などの特徴がある。そこで本実験では、SFを活性フィラーとして添加した場合に練混ぜが可能かどうかの確認を行い、GPペーストの圧縮強度およびフロー値に及ぼすSFの添加による影響を調べた。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1に使用材料、表-2に本実験の要因と水準を、図-1に粉体に占めるフライアッシュ（以下、FA）、BS、およびSFの割合を三角グラフで示す。本実験では、溶液と粉体の質量比（以下、W/P）を0.5とし、溶液比は水ガラス2号（WG2）：水酸化ナトリウム水溶液（NH）=2：1で一定とし、粉体の比率のみを変化させた。但し、練混ぜが出来なかった調査は、粉体の明らかな乾燥部分が無くなりペースト化するまで溶液を加えて実験を行った。図-2に、W/P=0.5での練混ぜの可否と、練混ぜが不可であった際に溶液を加えたことにより変更したW/Pの値を示す。溶液を加えたのはBSを添加していない供試体でいずれもSFの置換率が大きい範囲である。No.3はSF置換率50%であり、W/P=0.6で練混ぜが可能となり、No.4はSF100%の供試体であり、W/P=0.8で練混ぜ可能となった。

2.2 使用材料および調合

活性フィラーの蛍光X線元素分析法（XRF）による分析結果を表-3に、本実験で使用したジオポリマーの調合表を表-4に示す。FAはJISII種を用い、Al₂O₃がおおよそ25%、SiO₂がおおよそ60%で構成されており、BSはCaOがおおよそ43%で、次にSiO₂が34%、Al₂O₃が15%であった。SFは約98%がSiO₂であった。SiはFA、BS、SFのすべてに、Al₂O₃はFA、BSに含まれており、CaOについてはBSが主な供給源となる。

アルカリ溶液には、水ガラス2号の原液（以下、WG2）、および10mol/Lの水酸化ナトリウム水溶液（以下、NH）を使用した。

2.3 試験方法

(1) 練混ぜ方法

溶液は前日にWG2とNHを質量比で2：1となるように混ぜ、20°C、60%R.H.の養生室で保管したものをを用いた。

粉体はハンドスコープで粉体のみを空練りした後、溶液を追加し、モルタル用ハンドミキサーを用い60秒間練り混ぜ、30秒間掻き落としをした後、再び120秒間練り混ぜた。なお本実験では1パッチの練混ぜ量を2Lで行った。

硬化前のフレッシュ性状を確認するために、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に基づいてフロー試験を行った。また、材齢1、7、28日において圧縮強度試験を各調合3本ずつ行えるよう、φ50×100mmの円柱供試体型枠に打ち込んだ。

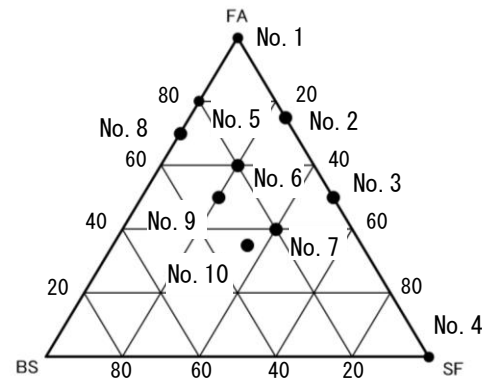


図-1 粉体に占める各材料の割合

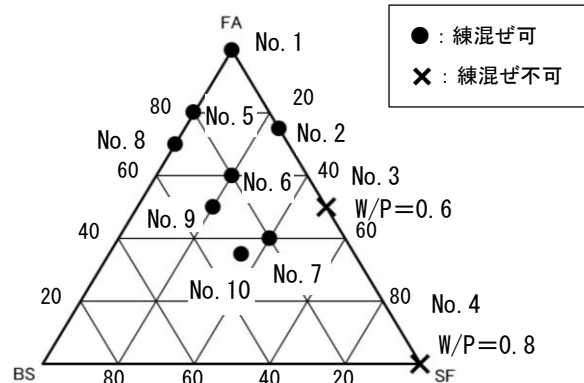


図-2 W/P=0.5での練混ぜの可否

表-3 活性フィラーの化学組成（質量%）

	FA	BS	SF
Al ₂ O ₃	23.64	14.94	0.23
SiO ₂	60.49	34.04	97.75
CaO	2.90	42.72	0.23
Fe ₂ O ₃	4.68	0.35	0.10
K ₂ O	1.21	0.26	0.86
MgO	0.53	5.81	0.22
Na ₂ O	0.49	0.26	0.09
Ig.loss	3.05	0.00	0.28
合計	96.99	98.38	99.76

表-4 調合表

No.	W/P	単位量(g/L)				
		FA	BS	SF	NH	WG2
1	0.5	1266	0	0	211	422
2		950	0	317	211	422
3	0.6	582	0	582	233	466
4	0.8	0	0	1000	267	533
5	0.5	1037	259	0	216	433
6		778	259	259	216	433
7		519	216	519	216	433
8		918	393	0	219	438
9		656	394	262	219	438
10		459	394	459	219	438

(2) 養生方法

打込み後、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留めて封かん養生とし、以下のような温湿度条件下で養生を行った。

材齢1日は60°Cで27時間の加温養生とし、材齢7、28日は20°C、60%R.H.の環境で養生を行った。

また、膨張が発生した供試体は、膨張した部分をコンクリートカッターで切断、または研磨機で削り、円柱形になるように整形し、研磨機で端面を平滑にした。

3. 実験結果および考察

3.1 供試体の性状

(1) 単位容積質量およびフロー値

各材齢での単位容積質量の平均値とフロー値を表-5に、使用した粉体のFA、BS、SFの構成によるフロー値の比較を図-3に、膨張の有無を図-4に、GP1L当たり添加したSFの質量(g/L)とフロー値の関係を図-5に、GP1L当たり添加したSFの質量(g/L)と単位容積質量の関係を図-6に示す。

単位容積質量は、供試体質量を直径および高さから求めた体積で割る(除する)ことにより算出した値である。図-3より、SFの置換率が高いほど、フロー値が低くなる傾向が見られた。また図-5より、SFの添加量が多くなる

と、フロー値が減少していることが分かる。これはコンクリートでも見られるが、SFの比表面積が20~22(m²/g)と大きいため使用量を増やすと、水と接触する部分が多くなりスランブ値が低下する⁸⁾⁹⁾現象と同様、GPペース

表-5 各材齢での平均単位容積質量の平均値とフロー値

No.	材齢1日 加温養生 単位容積質量の平均値 (g/cm ³)	材齢7日 封かん養生 単位容積質量の平均値 (g/cm ³)	材齢28日 封かん養生 単位容積質量の平均値 (g/cm ³)	フロー値
1	1.83	-※	1.87	274
2	1.61	1.70	1.67	227
3	1.25	-※	1.44	190
4	0.98	1.23	1.05	165
5	1.86	1.91	1.90	272
6	1.81	1.79	1.83	254
7	1.72	1.74	1.74	195
8	1.91	1.94	1.93	246
9	1.88	1.92	1.95	246
10	1.84	1.88	1.86	207

※「-」は固化しておらず、脱型が不可な状態であった。

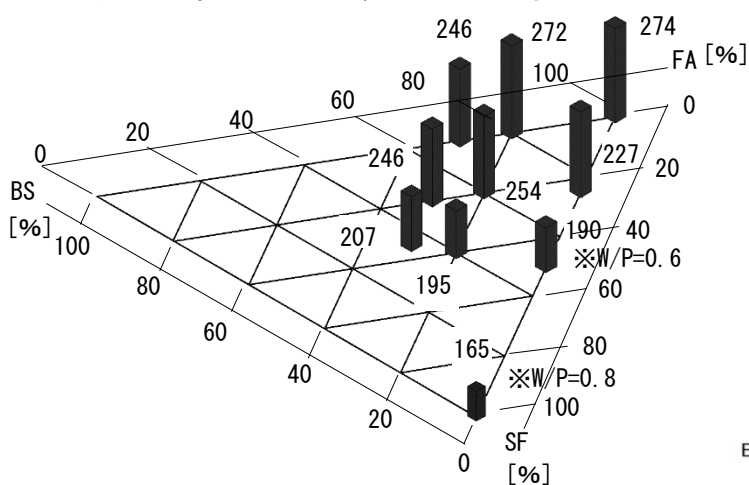


図-3 粉体 (FA・BS・SF) の構成比によるフロー値の比較

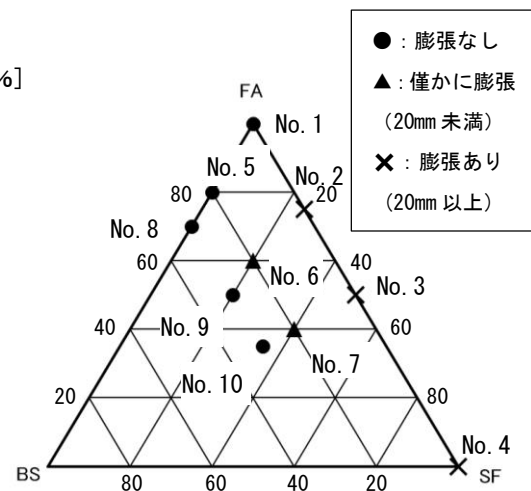


図-4 膨張の有無

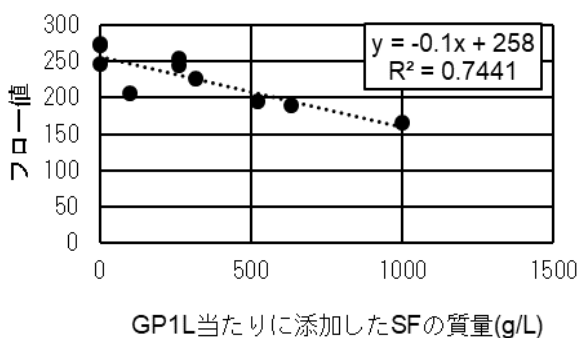


図-5 SF量とフロー値の関係

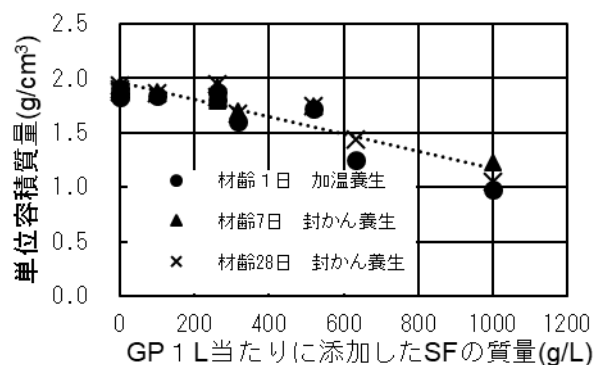


図-6 SF量と単位容積質量の関係

表-6 養生後の供試体の形状

養生条件	膨張なし	膨張あり				
	上図No. 5 下図N. 10	No. 2	No. 3	No. 4	No. 6	No. 7
加温養生						
封かん養生						

トでも比表面積が大きいことが原因であると考えられる。図-4より、膨張した供試体はSFを添加した供試体であり、かつBSの置換率が0%、20%のものであることが分かる。また図-6より、SFの添加量が多いほど単位容積質量が減少しているこれは膨張した部分を取り除いていることも一因である。また単位容積質量が小さいということは、何らかの反応により内部で発泡し膨張したことが考えられる。

(2) 養生後の供試体の形状

表-6に養生後の供試体の形状を示す。膨張していない供試体は代表的な1種類のみを示した。

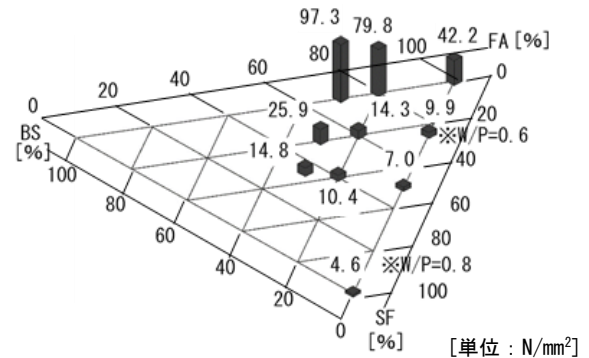
加温養生の供試体を見ると、No.2, 3, 4がBS置換率0%のものであり、明らかに膨張していることが分かる。供試体No.6, 7がBS置換率20%のもので、僅かではあるが上部の中央が膨らんでいる。BSが入っていない供試体No.2~4は特に膨張量が大きく、またSFが多くなるにつれて膨張量が増えていることが、表-6からも確認出来る。

また封かん養生では、加温養生ほどの膨張ではないが、BS置換率0%のNo.2~4の供試体で膨張が確認された。No.6では膨張が確認されず、No.7ではごく僅かな膨張が見られた。膨張の傾向は加温養生と同様に、BSが少ないほど、またSFが多いほど、膨張量は大きくなっている。

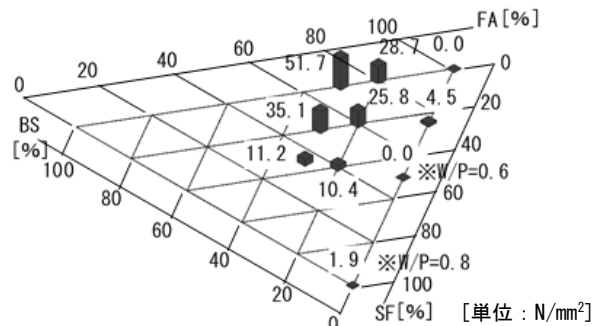
3.2 圧縮強度試験

図-7(a)に材齢1日(加温養生)、図(b)に材齢7日(封かん養生)、そして図(c)に材齢28日(封かん養生)の圧縮強度試験の結果をそれぞれ示す。

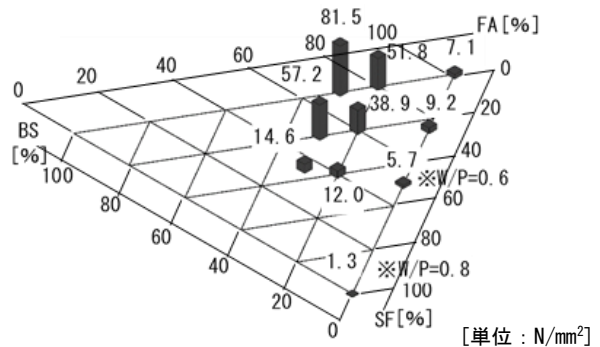
共通して、粉体に含まれるBSの比率が高いほど圧縮強度は高く、SFの比率が高いほど圧縮強度は低い傾向を示している。これらの理由として、BSを使用した条件にお



(a) 材齢1日(加温養生)



(b) 材齢7日(封かん養生)



(c) 材齢28日(封かん養生)

図-7 各材齢での圧縮強度

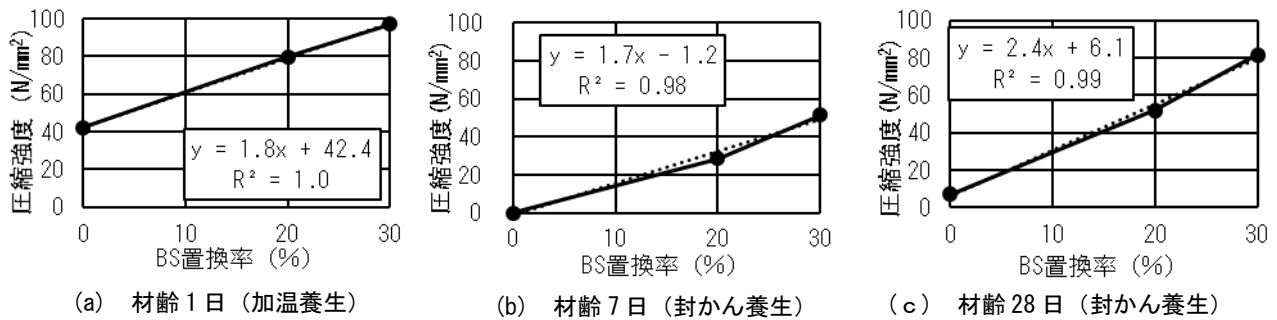


図-8 SF置換率0%の場合における圧縮強度-B S置換率の関係

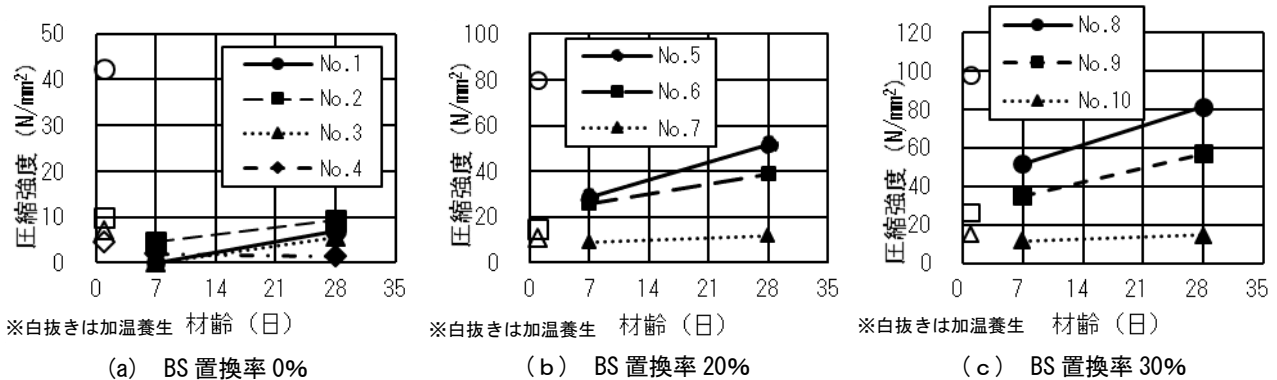


図-9 BS置換率を変化させた場合における圧縮強度-材齢の関係

いては、SFの添加によりカルシウム含有量が(相対的に)減少するためCASHの生成が抑えられたことや、本実験の条件ではSFが良好に反応しなかったなどの可能性が考えられる。

図(c)より、封かん養生を行った供試体の材齢28日の段階で、圧縮強度が30N/mm²を超えたのは、SF置換率が20%以下で、かつBS置換率が20%以上の範囲であった。No.9のように、SFを添加しても強度が50N/mm²を超えるものもあることから、NASHやCASHが良好に生成するように使用材料を調整すれば、さらに強度が出る可能性があるとも考えられる。

図-8に、SF置換率が0%の時、つまりFAとBSベースのGPペーストのBS置換率と圧縮強度の関係を示す。同図によれば、BS置換率30%までの範囲ではあるものの、BS置換率が多くなる程、圧縮強度が増加すること¹⁰⁾が確認できた。またこの範囲では、図(a)に示した材齢1日加温養生の圧縮強度の値が図(b)、(c)に示した封かん養生の値よりも高く、FAとBSをベースとしたGPには加温養生が効果的であることも確認できた。

(1) 材齢および加温養生による影響

図-9にBS置換率0, 20, 30%に変化させた場合の材齢と圧縮強度との関係を示す。同図によれば、概ね材齢1日加温養生の時の圧縮強度が、材齢28日の時の封かん養生の圧縮強度に近い値を示している。しかし、供試体No.6およびNo.9では、材齢1日加温養生の時の強度から材齢7日、28日の封かん養生の間で強度が増加していることから、調合次第では、SFを添加すると加温養生による圧縮強度

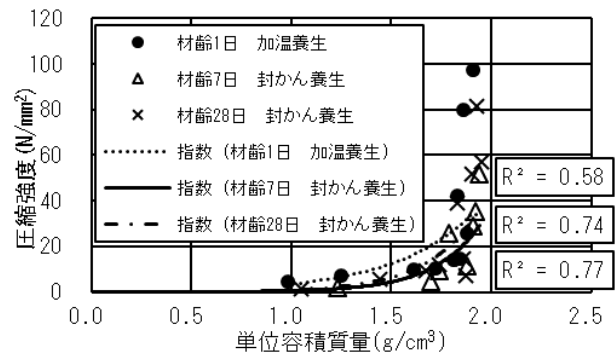


図-10 圧縮強度-単位容積質量の関係

増進の効果が無くなるものがあることが分かった。

(2) 単位容積質量と圧縮強度との関係

図-10に、単位容積質量と圧縮強度の関係を示す。同図によれば、単位容積質量が大きくなるほど圧縮強度が高くなる傾向を示した。このことにより、SFを過剰に添加すると何らかの反応による発泡・膨張が生じ、単位容積質量が低くなるとともに、圧縮強度が低下すると考えられる。

4. まとめ

本実験では、フライアッシュベースのジオポリマー(GP)ペーストにシリカフェームを添加した場合、シリカフェームがフロー値および圧縮強度に与える影響を調べた。本実験のまとめを以下に示す。

1) シリカフェームの添加量を増やすと、比表面積が大きいため接触する溶液の量が多くなり、GPペーストのフロ

一値が減少する傾向が見られた。

2) シリカフェュームの添加量を増やすと、GPペーストが膨張する傾向が見られた。また、膨張に伴う単位容積質量の減少により、圧縮強度が低下する場合がある。

3) シリカフェュームを添加したGPは、調合次第では加温養生による圧縮強度の増加が見込めず、むしろ膨張量の増加に伴う、強度低下を引き起こす傾向が見られた。

4) シリカフェュームを添加した場合でも、高炉スラグ微粉末の添加量によっては材齢28日養生室封かん養生で、50N/mm²が得られた。

5. 今後の課題

本実験の範囲で、シリカフェュームの添加により強度が低下したことには以下のことが考えられる。

1) シリカフェュームの添加によりカルシウム含有量が相対的に減少し、CASHの生成が抑えられた。

2) シリカフェュームが、強度増進への寄与が小さい極めて反応性の低い状態になっている。

3) 上記の1)および2)の理由が混在している。

以上の考察を踏まえ、今後は1)に対してカルシウムを多く含む、例えば高炉スラグ微粉末やカルシウム高含有フライアッシュなどにより、カルシウムを補填する。2)に対しては活性度の高い別の活性フィラーを用いた実験を行うなどして検討したい。

さらにひび割れ注入材として必要な諸特性（粘度、可長時間、膨張率、ひび割れ注入深さ）などについても実験を進める予定である。

【謝辞】

本研究に際し、三島直生先生（三重大学准教授）、坪内徹朗氏（三重大学大学院生）、橋本雄喜氏（三重大学学部生）のご助力を得た。また本研究費の一部は科学研究費基盤研究(B)17H03291（研究代表者：一宮一夫・大分高専教授）によった。付記して謝意を表す。

参考文献

1) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017

2) 井上真澄，Saphouong khamhou，児島孝之：アクリル樹脂を用いたコンクリートひび割れ補修材に関する基礎的研究，材料，Vol.56，No.12，pp.1183-1188，2007.12

3) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術‘12 [基礎編]，pp.247-253，2012

4) 佐藤晋哉，臼杵匠，伊代田岳史：簡易的なひび割れ注入工法に用いる各種注入材料の補修効果の検討，第40回土木学会関東支部技術研究発表会，No.5，p.22，2013

5) 佐藤隆恒，大木信洋，東原実，上原元樹：石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2023-2028，2013

6) 上原元樹：セメントを用いない低炭素型新材料であるジオポリマーの開発，鉄道総研月例発表会要旨，pp.1-4，2016

7) 合田寛基，原田耕司，津郷俊二，日比野誠：フライアッシュⅡ種を用いたジオポリマーの材料特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1993-1998，2015

8) 長滝重義，大即信明，久田真，水野和彦：シリカフェュームの品質とその評価に関する研究，土木学会論文集，Vol.28，No.520，pp.87-98，1995.8

9) 松藤泰典：資源の有効利用とコンクリート/第6回 シリカフェュームを用いたコンクリート，コンクリート工学，Vol.34，No.5，pp.70-75，1996.5

10) 市川敬悟，三島直生，前川明弘，畑中重光：ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1957-1958，2015

論文 ジオポリマーモルタルを用いて断面修復した RC 梁の曲げ挙動に関する実験的研究

ボンマハーサイ パラミ*1・伊藤 彰利*2・畑中 重光*3

要旨：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書にもあるように、ジオポリマーは無機系材料であるとともに紫外線による劣化を抑えることが可能な他、耐火性や耐酸性が優れ、RC 構造の補修工事における有効活用が期待できると考えられる。本研究ではジオポリマーモルタルを RC 梁の断面修復に使用し、曲げ試験により供試体の曲げ挙動を検討した。その結果、普通強度のジオポリマーモルタルで圧縮側の鉄筋の下まで断面修復した場合およびヤング係数の値がコンクリートのそれと近い高強度のジオポリマーモルタルで補修した場合には、曲げ耐力の回復が良い傾向にあった。

キーワード：RC 梁，断面修復，無収縮モルタル，ジオポリマーモルタル，曲げ試験

1. はじめに

一般に断面修復工法に用いられる材料は、ポリマーセメント系やエポキシ樹脂系のモルタルが多い¹⁾。しかし、このような補修材料にはいくつかの問題点が挙げられる。エポキシ樹脂系の場合は、紫外線などに弱く耐候性が劣ること、引張強度、熱膨張係数及び弾性係数などの性質がコンクリートとは相違することが挙げられる。一方、ポリマーセメント系の場合は、セメントの水和生成物としての $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 結晶や C-S-H ゲルは耐酸性や耐火性などが劣ることなどが挙げられる^{2) 3)}。

ジオポリマー (GP) は、セメントをまったく使用しないため、セメントの代替材料として用いれば製造過程における二酸化炭素の排出量の低減が期待できる。GPは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの活性フィラーとアルカリ活性剤の混合で生成した縮重合体である。既往の研究によると、GPは価格がセメントの2倍程になるが、普通コンクリートと同等なレベルまで強度発現が可能で、凝結時間や養生時間が短く、コンクリートおよび鉄筋との付着性がよく、また耐火性や耐酸性が優れるなどの特徴があるといえる^{3) 4)}。GPに関しては、まだ基礎的な品質や建設用材料としての性質・性能を解明にする段階にあるが、土木分野および建築分野における構造物への利用が期待できる。特に価格面や耐久性の面で構造物の補修工事において有効な活用が期待できると考えられる。

そこで本研究では、コンクリート構造物の補修材料としてのジオポリマーの実用性について検討することを目的とし、その第一段階として、RC 梁の断面修復にジオポリマーを使用した場合の曲げ変形挙動および破壊特性を実験的に調べることにした。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1に本実験の要因水準および各試験体の詳細を示す。要因としては、補修材料の種類、補修深さおよび補修界面の処理の違いを取り上げた。補修材料は、母体コンクリートの強度と同等レベルの無収縮モルタル (以下、NSM) とGPモルタル (以下、GPM)，そして母体コンクリートの強度より約2倍大きい強度を有するGPMの3種類とした。

また、補修界面の処理の違いが補修材の付着性状に与える影響と補修界面の位置による影響も検討するため、付着が良好な場合と不良な場合および補修深さ2種類を取り上げた。なお、付着が良好な状態とは、界面が細かな凸凹状で、補修する前に十分に水分の供給を行った状態である。一方で不良な場合とは、打設の段階で界面を平滑に仕上げ、水分の供給を行わずに補修を行った状態である。付着の良否が及ぼす影響をより明快に捉えるため、実務上は現実性にかけるが、ここでは補修界面が平滑に仕上げられている場合を極端な水準として取り上げた。

表-1 実験の要因水準および試験体の詳細

No	名称	詳細			
		状態	補修材料 (数字は目標強度)	付着状況	
1	N	健全	-	-	
2	GPM30	補修あり	深さ 30mm	30N/mm ² のGPモルタル	良好 (粗面+ 湿潤状態)
3	GPM60			60N/mm ² のGPモルタル	
4	NSM30		30N/mm ² の無収縮モルタル		
5	GPM3060		30N/mm ² のGPモルタル		
6	NSM3060		深さ 60mm	30N/mm ² の無収縮モルタル	不良 (平滑面+ ドライアウト)
7	GPM30-B		深さ 30mm	30N/mm ² のGPモルタル	
8	NSM30-B			30N/mm ² の無収縮モルタル	

*1 三重大学 工学研究科システム工学専攻 (学生会員)

*2 三重大学 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*3 三重大学 三重大学大学院工学研究科建築専攻 教授 工学博士 (正会員)

2.2 試験体概要

梁試験体の形状、寸法及び配筋の状況を図-1に示す。今回の実験に使用したすべての梁試験体は、全長 1700 mm、幅 120mm、高さ 200 mm、そして等曲げモーメント区間を 400 mm とした。引張側の主筋には D16 を 2 本、圧縮側の主筋には D10 を 2 本、そしてせん断破壊を防ぐためのせん断補強筋には D6 を間隔 80 mm で配筋した。全梁試験体は、最終破壊形式を曲げ破壊となるように設計した。力を負担する重要な部位に断面欠損が発生したことを想定し、その一例として補修を設けた箇所は、梁中央の圧縮縁とした。補修部分の寸法は、深さがかぶり厚さに相当する 60mm (GPM3060 と NSM3060) と 30mm (前者以外の試験体)、幅は梁幅と同様で 120mm、長さは 300mm とした。また、補修箇所の形状は台形とした。

2.3 調合と使用材料

表-2～表-4 にコンクリート、GP モルタルおよび無収縮モルタルの調合をそれぞれ示す。また、表-5 にジオポリマーモルタルに使用した材料とその特性を、表-6 に鉄筋の特性を示す。

表-7 に各使用材料の特性を、図-2 に圧縮試験より求められた応力-ひずみ関係を示す。同一強度のコンクリートに比べ、ジオポリマーモルタルのヤング係数が小さいことが分かる。

2.4 試験方法

図-3 に曲げ試験の概要図を示す。曲げ試験において、荷重には万能試験機を用い、スパン 1200mm、等曲げモーメント区間 400mm の 3 等分点荷重とした。なお、荷重方法は荷重速度 0.4kN/s の単調漸増荷重とし、最大

耐力に到達して明らかな耐力低下が生じるまで荷重を継続する。また、曲げひび割れが発生するまでの初期段階における荷重の増加量は、最大荷重の 1/50 (約 2.5kN に相当) 程度とした。その後は、荷重の増加量を最大荷重の 1/25 (約 5kN) 程度とし、各荷重段階においてひび割れ発生状況や進展、及び破壊性状を記録した。

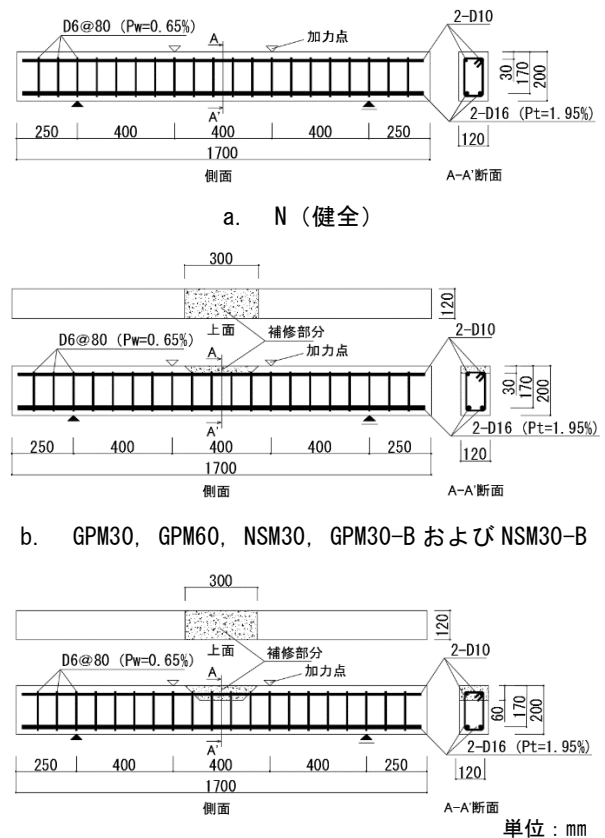


図-1 試験体の形状および配筋

表-2 コンクリートの調合およびフレッシュの性状

Fc (N/mm ²)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュ性状		
			W	C	S	G	SP	SL (cm)	Air (%)	TC (°C)
24	53.8	45.6	178	331	799	966	3.3	16.5	5.5	22

[註] Fc: 設計基準強度, W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材比, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材,

SP: 高性能 AE 減水剤, SL: スランプ, Air: 空気量, Tc: 温度

表-3 GP モルタルの調合

F (N/mm ²)	W/P	bs/p	fa/p	単位量 (kg/m ³)					フロー値 (mm)
				活性フィラー (P)		溶液 (W)		S	
				FA	BS	水ガラス	NaOH		
30	0.6	0.1	0.9	449	64	216	92	1436	239
60	0.6	0.3	0.7	360	155	217	92	1442	246

[註] F: 設計強度, W/P: 溶液粉体比 (質量比), bs/p: 高炉スラグ置換率 (容積比), fa/p: フライアッシュ置換率 (容積比)

梁中央部のたわみ量の測定は、梁試験体のスパン中央部に設置したレーザー変位計と両支점에設置した高感度変位計により求めた。中央断面のひずみ分布は、ワイヤーストレインゲージを図-4のように貼り付けて測定した。

3 実験結果及び考察

3.1 ひび割れ発生状況および破壊性状

図-5に実験終了時の破壊状況を示す。図中に黒く塗りつぶした部分は圧壊により大きく損傷した部分を示す。各梁試験体は、梁下縁に曲げひび割れが発生し、荷重の増加とともに圧縮側に進展し、圧縮縁中央のコンクリートあるいは補修箇所が圧壊し、耐力が低下して終局破壊に至るといった典型的な曲げ破壊を呈した。

健全試験体 N は、荷重約 20kN のときに最初の曲げひび割れの発生が確認できた。それに対し、NSM30 試験体は、約 17.5kN のときに曲げひび割れが発生した。荷重の増加とともに、曲げひび割れの進展は確認でき

表-4 無収縮モルタルの調合

F (N/mm ²)	W/B	S/B	単体量 (kg/m ³)			フロー値 (mm)
			W	B	S	
30	0.4	2.5	213	532	1329	127.4

[註] F：設計強度，W/B：水結合材比，S/B：砂結合材比，W：水，
B：プレミックス無収縮モルタル粉末，S：細骨材

表-5 ジオポリマーモルタルの使用材料

種類	名称	略号	密度 (g/cm ³)
活性フィラー	フライアッシュ II種	FA	2.26
	高炉スラグ微粉末	BS	2.91
溶液	水ガラス2号	WG	1.45
	水酸化ナトリウム水溶液	NH	1.35
細骨材	屋町川産砂	S	2.59

表-6 使用鉄筋の特性

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D6 (SD345)	370	1.74 × 10 ⁵
D10 (SD345)	336	2.1 × 10 ⁵
D16 (SD345)	345	2.1 × 10 ⁵

表-7 各使用材料の性状

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
コンクリート	30.4	2.9	22.1
GP30モルタル	33.4	2.9	15.2
GP60モルタル	56.8	4.1	18.9
無収縮モルタル	32.0	3.7	28.0

前において補修箇所あるいは母材コンクリートとの界だが、降伏前において補修箇所あるいは母材コンクリートとの界面でのひび割れや破壊はまだ見られなかった。梁全体が曲げ降伏に達した後、梁中央変位が約 10mm たわんだところで補修箇所付近のコンクリートと補修界面に剥離が発生し、曲げ変形とともに剥離幅が増大して補修界面が剥がれ、付着の良好な部分によって拘束を受けながら補修モルタルが大きく 2 つに折れて破壊した。

NSM30-B 試験体の場合は、降伏前は NSM30 と類似した挙動がみられたが、降伏後はたわみが約 8mm の時に補修界面での剥離と補修モルタルにひび割れが発生し、急速に進展した。付着界面の処理が悪いことと圧縮鉄筋の座屈により、補修界面全体が剥がれ、曲げ変形の作用で上に押し出される状態となり、補修下部のコンクリートが圧縮破壊して終局に到達した。

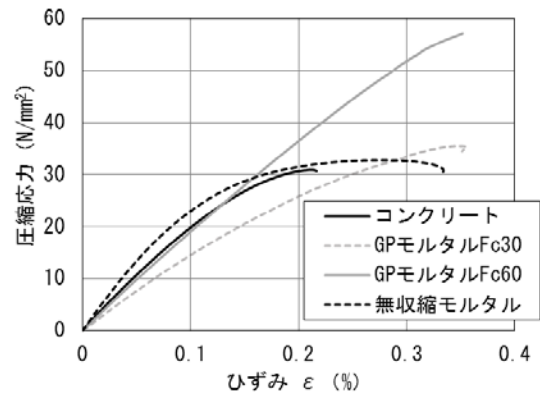


図-2 各材料の応力-ひずみ関係

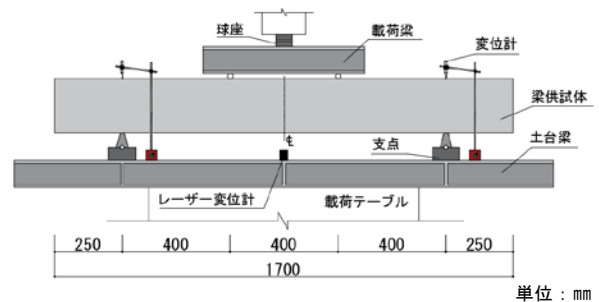


図-3 曲げ試験概要図

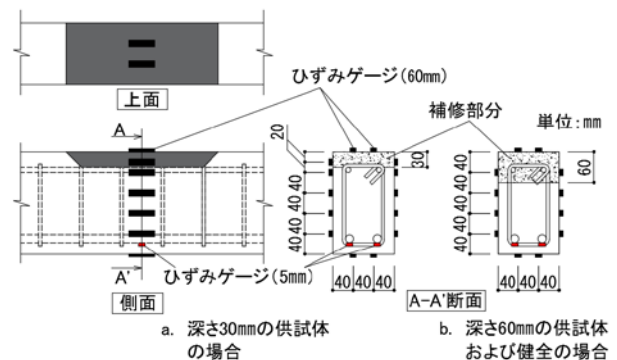


図-4 ひずみゲージの貼付け図

GPM30 と GPM30-B 試験体は、健全試験体 N の場合と比較して、最初の曲げひび割れ発生が若干低い荷重で確認された。GPM30 の場合は 15kN、GPM30-B では約 12.5kN のときであった。降伏後、両者とも小さいたわみ値のときに補修界面での剥離の発生が確認できたが、GPM30-B の場合の方が顕著であった。最終的には、GPM30 の場合、片側の支点側に荷重が偏り、母体から補修箇所が剥がれたが、もう片方は付着がまだ少し良好な状態にあるため、補修箇所の中央付近でモルタルが破壊した。GPM30-B の場合は、補修界面全体に沿って発生した剥離で母体から補修箇所が剥がれて外側に押し出される状態となり、最終的に GP モルタルに斜めひび割れが生じて破壊した。ジオポリマーの場合は、母材コンクリートとの付着界面が平滑な状態においてもドライアウトの影響を受けにくい傾向があることは伊藤らが行われた傾斜せん断試験によるジオポリマーモルタルとコンクリートとの付着特性に関する基礎的実験により報告されているが、今回の実験範囲では付着界面がちょうど圧縮鉄筋の位置にあるため、ドライアウトの影響に加え、その鉄筋の座屈による影響が付着界面の剥がれる原因のひとつであると考えられる。

GPM60 試験体は、荷重が約 15kN のときに最初の曲げひび割れが確認でき、荷重とともにそのひび割れが進展していったが、曲げ降伏後補修部分の強度が大きいため等曲げ区間の変形が小さく、せん断スパンで発生したひび割れの進展の方が顕著であった。たわみが約 14mm のときに、補修界面でのひび割れと補修部分の破壊が確認できた。

圧縮縁から 60mm の深い部分まで補修を施した GPM3060 と NSM3060 では、ほぼ同様な破壊性状が得られた。降伏後、両者ともに補修部分付近のコンクリートの破壊や傾斜界面の剥がれが確認できたが、補修界面の深い部分の付着がまだ良好な状態にあったため、曲げ変形が進行し、その後に補修モルタル部分に亀裂が入って破壊に至った。

3.2 曲げ耐力

表-8 に各梁試験体の曲げ試験結果を、図-6 および図-7 に各梁試験体の荷重-たわみ関係を示す。

GP モルタルで断面修復した場合、強度レベルを問わず、健全の状態および無収縮モルタルで断面修復したものと比較して、降伏荷重および最大荷重が若干低い結果となった。また、荷重の増加とともに曲げ剛性が徐々に低下していく傾向がみられた。

GPM30 と GPM30-B の荷重-たわみ関係としてはほぼ同様な曲線が得られた。両者とも降伏荷重(最大荷重でもある)に達した後、徐々に耐力が低下し、荷重が約 90kN 前後で一定となって変形だけが進展した。一方で、

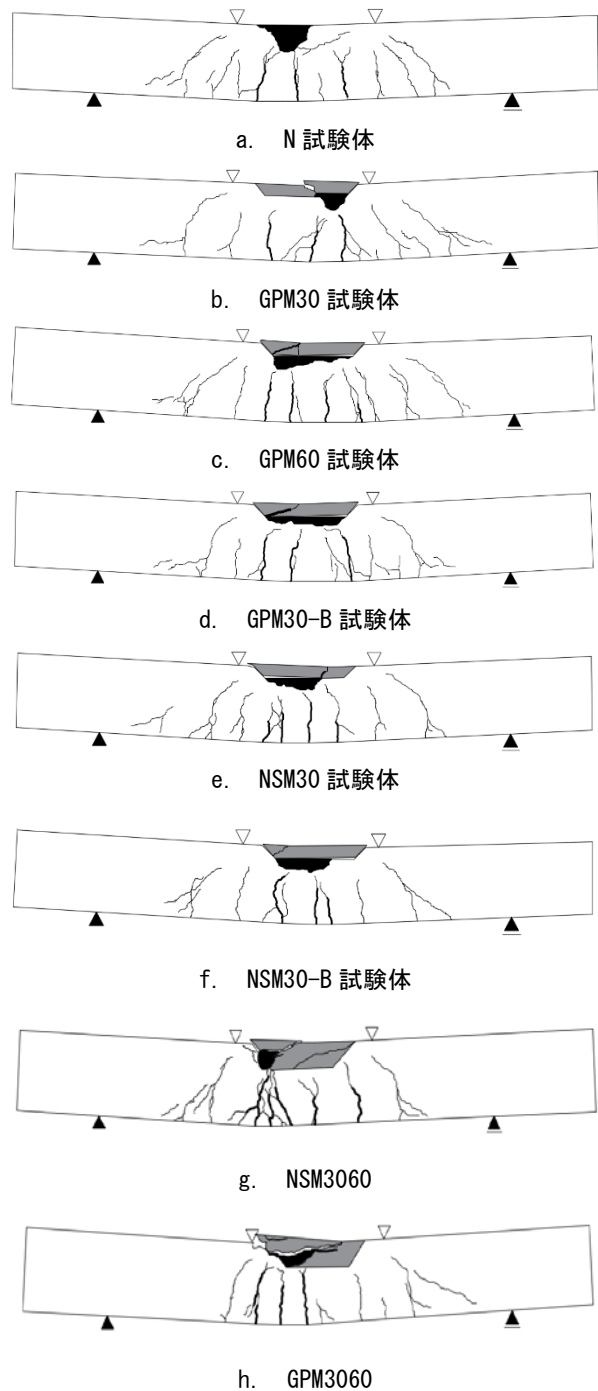


図-5 ひび割れおよび破壊状況(曲げ試験終了時)

表-8 実験結果

No	試験体	ひび割れ発生荷重 (kN)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
1	N	19.70	100.01	103.52
2	GPM30	15.08	92.45	95.09
3	GPM60	15.06	98.59	102.41
4	NSM30	17.12	103.98	103.98
5	GPM30 - B	12.55	98.56	101.94
6	NSM30 - B	15.08	103.22	103.22
7	GP3060	15.09	98.32	98.32
8	NSM3060	17.57	104.39	106.85

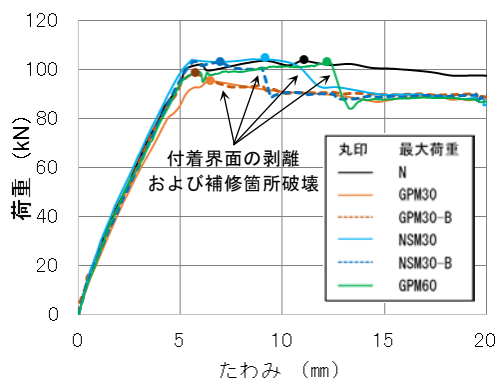


図-6 荷重-たわみ (GP モルタルの強度の違いと付着界面状況の違いの比較)

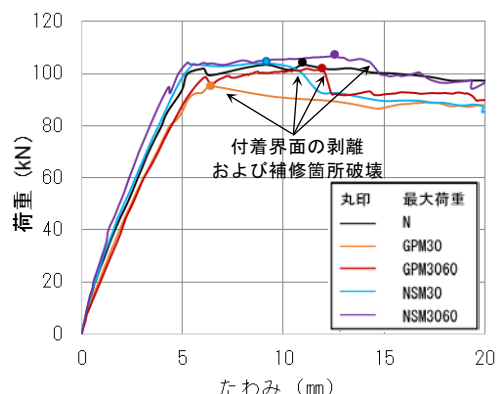
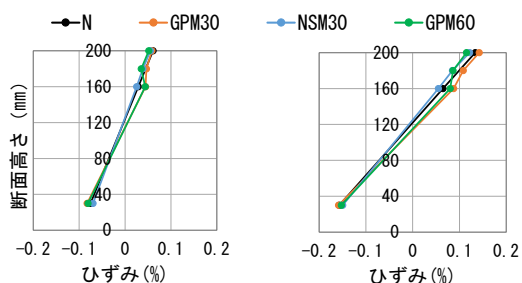


図-7 荷重-たわみ (補修深さの違いの比較)



45kN のとき 90kN のとき
図-8 中央断面のひずみ分布 (一例)

RC 梁のコンクリート強度より約 2 倍強度が大きいジオポリマーで補修した GPM60 の場合は、荷重が健全な状態と同等レベルで降伏したが、約 13mm たわんだところで耐力が約 100kN から 90kN 前後まで急低下した。図-8 に示している梁中央断面のひずみ分布によると、ヤング係数の低いジオポリマーを使用した試験体の場合、健全試験体やヤング係数の大きい無収縮モルタルを使用した試験体の場合より中立軸が若干低い位置にあるとともに、ひずみ分布が直線になっていない。すなわち、ジオポリマーの使用に加え、補修部分と母材コンクリートの間の付着が徐々に破壊し部材断面が一体化して変形しないことで、曲げモーメント(曲げ耐力)がやや低い結果になったこといえる。

RC 梁のコンクリートと同強度の無収縮モルタルで補修した場合の NSM30 と NSM30-B では、健全の状態とほぼ同等な降伏荷重および最大荷重の結果を得たが、たわみが約 10mm 前後で耐力が低下し、その後は横ばい状態となった。この現象は NSM30 に比較して NSM30-B の方が先に起きた。急激な耐力低下を起こした理由としては、まず補修界面の剥離が生じ、曲げ変形の増大とともに補修モルタルが局所的に破壊したことが要因かと考えられる。

また、圧縮側の鉄筋の下部分まで補修を施した試験体については、GPM3060 の場合は健全試験体と比較して、降伏荷重や最大荷重が若干低い結果となったが、降伏後から圧縮縁の補修モルタルが破壊するまで耐力の増加が確認できた。しかし、補修モルタルが破壊した時点での耐力の低下現象が急激であった。

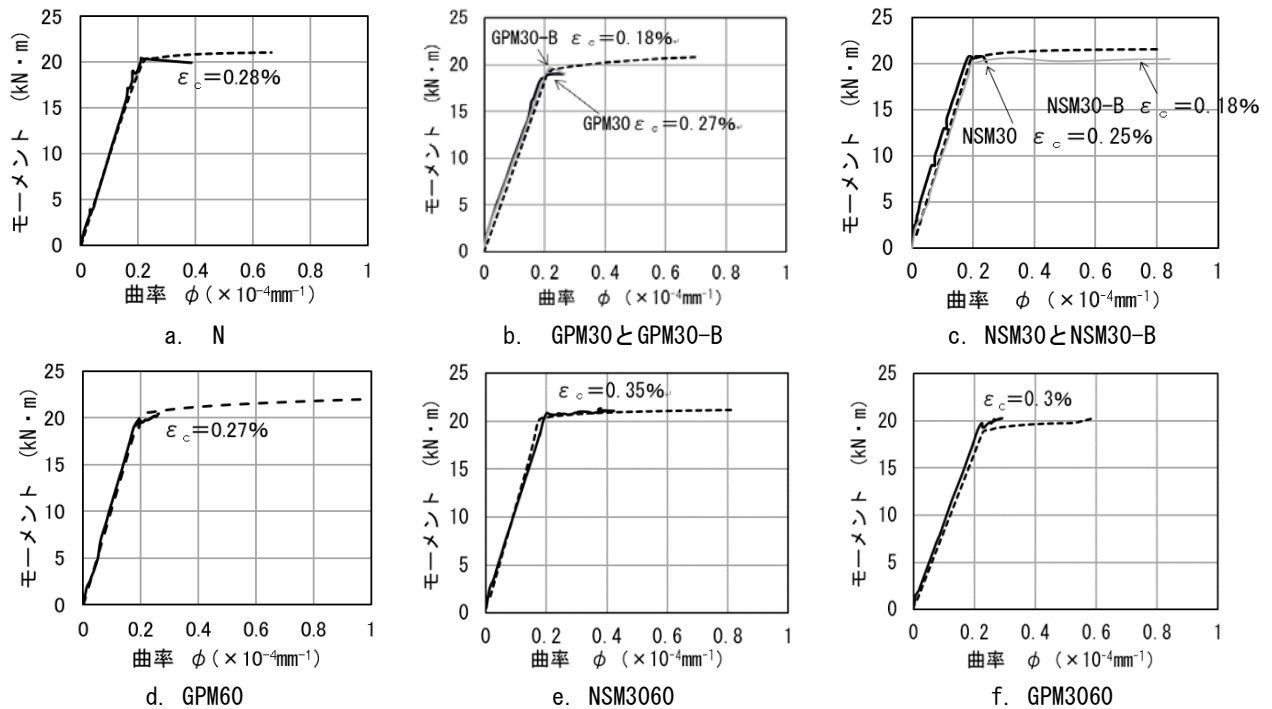
それに対し、NSM3060 では健全な状態の結果より降伏荷重および最大荷重が若干大きく、補修モルタル破壊後の耐力低下も健全試験体と同様に緩やかであった。

図-9 に RC 梁の中央部のモーメント-曲率関係を示す。実験値は、耐力が最大となるときまでとし、解析結果も併示した。解析では、平面保持の成立、コンクリートの引張応力の無視、母材コンクリートと補修モルタルおよび鉄筋との付着が完全と仮定したうえで、コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ曲線をバイリニアモデル(コンクリートの圧壊時ひずみは 0.35%)に単純化した。同図より、実験結果と解析結果では、降伏後の曲率の伸びに大きな差が見られるものの、降伏前の初期剛性の部分はほぼ一致している。

5 まとめ

曲げ破壊する RC 梁の断面修復にジオポリマーモルタルを用いる場合について実験的に検討した。本実験の範囲では以下のような知見が得られた。

- 1) ジオポリマーモルタルは同等強度のコンクリートや無収縮モルタルに比べ、ヤング係数が低いため、断面修復後の RC 梁の曲げ剛性が低下する傾向が確認された。
- 2) ジオポリマーモルタルで断面修復した場合、補修深さを圧縮縁から 60cm の深さまでとした場合およびヤング係数がコンクリートに近い高強度 (F_c60) のものとした場合は、曲げ耐力の回復が良好な傾向にあった。
- 3) 付着処理の違い(補修界面の粗度と補修直前の水分供給状態)による影響について、ジオポリマーモルタルで補修した場合も無収縮モルタルを用いた場合と同様に、界面が平滑でドライアウトさせた場合



(実線：実験値；点線：計算値)

図-9 梁中央断面における曲げモーメント-曲率関係

には付着不良が生じた。

- 4) 補修界面を圧縮鉄筋の位置にある場合、付着状況が良好であっても、荷重の増大とともに座屈する鉄筋の影響で付着界面における破壊が起き、耐力の急激な低下の原因になる可能性がある。また、補修界面を鉄筋の下まで補修した場合は付着界面での破壊を抑制できることを確認した。

[謝辞]

本研究に際し、三島直生先生(三重大学准教授)、和藤浩氏(三重大学技術専門員)、坪内徹郎氏(三重大学大学院生)のご助力を得た。また、本研究費の一部は科学研究費基盤研究(B)17H03291(研究代表者：一宮一夫先生・大分高専教授)によった。付記して謝意を表す。

[参考文献]

1) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 [基礎編], 2012
 2) 北田達也, 李柱国: コンクリートのジオポリマー系ひび割れ補修材に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2059-2064, 2017
 3) 日本コンクリート工学会: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017
 4) ポンマハーサイパラミ, 伊藤彰利, 三島直生, 畑中重光: 初期欠陥が生じた鉄筋コンクリート梁の断面修復後の力学挙動に関する基礎的実験, 日本建

築学会大会学術講演梗概集, pp.17-18, 2017

5) 一宮一夫, 津郷俊二, 原田耕司, 池田攻: ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.575-580, 2011.7
 6) 吉田己理, 小玉克巳, 佐藤真一, 渡辺裕一: ポリマーセメントモルタルで補修した RC 梁の曲げ性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.801-806, 1995
 7) 彭丰, 森川英典, 小林秀惠: 断面修復を考慮した RC はりの連続繊維シート補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1489-1494, 2007
 8) Tanakorn Phoo-ngernkham, Vanchai Sata, Sakonwan Hanjitsuwan, Charoenchai Ridtirud, Shigemitsu Hatanaka, Prinya Chindaprasirt: High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material, Construction and Building Materials, 98, pp.482-488, 2015
 9) 新井泰, 有賀貴志, 平野勝識, 渡辺忠朋: 断面欠損が生じたRCはりの補修効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1525-1530, 2006
 10) 中村光, 付李: コンクリート部材内部ひび割れ進展抑制による鉄筋座屈の抑制と変形性能向上に関する研究, 中部セメントコンクリート工学論文集, 第30号, pp.43-44, 2017

シリカフェームを添加したジオポリマーペーストに関する基礎的研究
(その1 実験概要およびフレッシュ性状について)

正会員 ○ ポンマーハサイ パラミ*1 同 前川 明弘*3
同 伊藤 彰利*2 同 畑中 重光*4

ジオポリマー シリカフェーム フライアッシュ
高炉スラグ微粉末 フロー値

1. はじめに

ジオポリマー(GP)とは、セメントクリンカを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料(活性フィラー)とアルカリ溶液を用いた硬化体である。GPは、産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末の有効活用ができ、セメント製造過程におけるCO₂の排出量を低減できることから、低炭素・資源型社会実現のためのセメント代替材料として、土木・建築分野における構造物への利用が期待され、様々な用途開発が進められている。

ひび割れ補修材に関しては、有機系補修材料であるエポキシ樹脂が付着やひび割れ追従性能などに優れていることから、多く活用されているが、紫外線による劣化や耐火性に劣る、施工時の温度管理や湿潤面での接着不良²⁾、またコンクリートとの熱膨張係数、ヤング係数が異なるなどの問題がある。一方、無機系の材料であるGPは耐久性に優れ、コンクリートと同程度の材料特性が得られ、さらにコンクリートおよび鉄筋との付着が良いという特徴¹⁾がある。

本研究では、粒径の細かさが注入深さに関係すると考えられる³⁾ことから、超微粒子であるシリカフェーム(以下、SF)の微細ひび割れへの充填効果に期待し、ひび割れ注入材としてGPを活用するための基礎的な実験を行った。

SFを添加したGPの製造では、水ガラスの代わりにSFを加える「ケイ素粉体添加その場溶解法」が多く用いられている。SFの添加は可使時間を延長できるため⁴⁾、高炉スラグ粉末(以下、BS)を多用して凝結が早くなった場合においても、その練混ぜが可能となる⁵⁾ことなどが報告されている。また、硫酸塩に対する抵抗性が高く、硫酸イオンの浸入遅延作用が期待されている⁶⁾。そこで本実験では、SFを活性フィラーとして添加した場合における練混ぜの可否についての確認を行うとともに、GPペーストの圧縮強度およびフロー値に及ぼすSFの添加による影響を調べた。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

表-1に使用材料を、表-2に活性フィラーの蛍光X線分析(XRF)による結果を、表-3に本実験で使用したジオポリマーの調合表を示す。図-1に粉体に占めるフライアッシュ(以下、FA)、BS、およびSFの割合を三角グラフで示す。本実験では、溶液と粉体の質量比(以下、W/P)を0.5とし、溶液比は水ガラス2号原液(WG2):水酸化ナトリウム10mol/L水溶液(NH) =

2:1で一定とし、粉体の比率のみを変化させた。但し、練混ぜが出来なかった調合は、粉体の明らかな乾燥部分が無くなりペースト化するまで溶液を加えて実験を行った。図-2に、W/P=0.5での練混ぜの可否と、練混ぜが不可であった際に溶液を加えたことにより変更したW/Pの値を示す。No.3とNo.15の場合はW/P=0.6で、No.4とNo.14の場合はW/P=0.8で練混ぜ可能となった。

2.2 使用材料および調合

FAにはJISII種を用い、表-2に示したようにAl₂O₃がおよそ25%、SiO₂がおよそ60%で構成されており、BSはCaOがおよそ43%で、次にSiO₂が34%、Al₂O₃が15%であった。SFは約98%がSiO₂であった。SiはFA、BS、SFのすべてに、Al₂O₃はFA、BS

表-1 使用材料

種別	略号	材料名	密度 (g/cm ³)
粉体 (P)	FA	フライアッシュII種 (JIS A 6201)	2.29
	BS	高炉スラグ微粉末4000 (JIS A6206)	2.91
	SF	シリカフェーム (JIS A 6207)	2.2
溶液 (W)	WG2	水ガラス2号 原液	1.45
	NH	水酸化ナトリウム水溶液 (10mol/L)	1.35

表-2 活性フィラーの化学組成(質量%)

化学成分	FA	BS	SF
Al ₂ O ₃	23.64	14.94	0.23
SiO ₂	60.49	34.04	97.75
CaO	2.9	42.72	0.23
Fe ₂ O ₃	4.68	0.35	0.1
K ₂ O	1.21	0.26	0.86
MgO	0.53	5.81	0.22
Na ₂ O	0.49	0.26	0.09
Ig. loss	3.05	0	0.28
合計	96.99	98.38	99.76

表-3 調合表

No.	W/P	単位量(g/L)					
		FA	BS	SF	NH	WG2	
1	0.5	1266	0	0	211	422	
2		950	0	317	211	422	
3	0.6	582	0	582	233	466	
4	0.8	0	0	1000	267	533	
5		1037	259	0	216	433	
6	0.5	778	259	259	216	433	
7		519	216	519	216	433	
8		918	393	0	219	438	
9		656	394	262	219	438	
10		459	394	459	219	438	
11		266	532	532	221	443	
12		672	672	0	224	448	
13		272	817	272	227	454	
14		0.8	0	260	1039	346	693
15		0.6	0	614	614	246	492

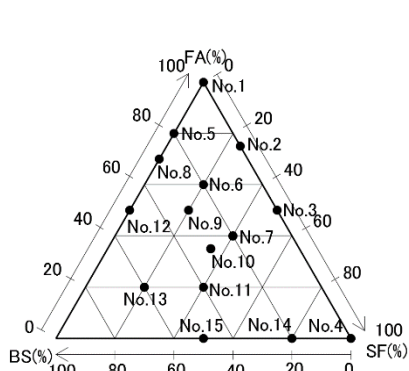


図-1 粉体に占める各材料の割合

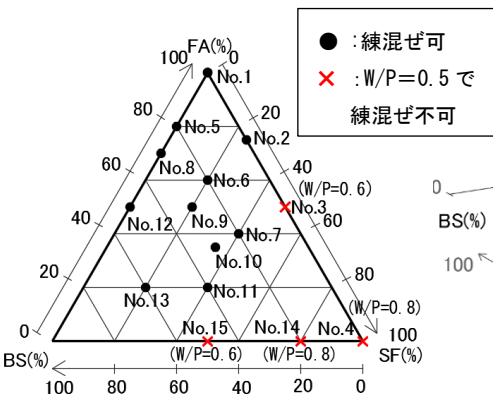


図-2 W/P=0.5での練混ぜ可否

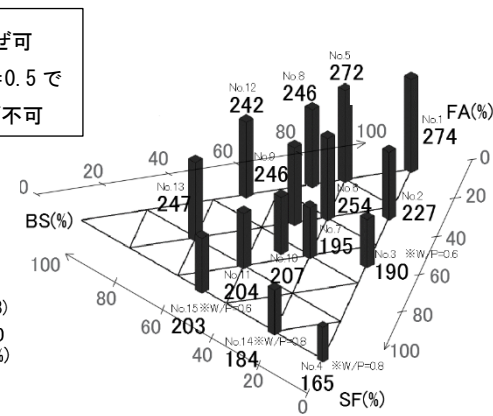


図-3 フロー試験の結果

に含まれており、CaOについてはBSが主な供給源となる。

2.3 練混ぜおよびフロー試験の方法

(1) 練混ぜ

溶液は、実験前日にWG2とNHを質量比で2:1となるように混合し、20℃、60%R.H.の養生室で静置したものを用いた。

粉体はハンドスコップで粉体のみを空練りした後、溶液を追加し、モルタル用ハンドミキサーを用い60秒間練り混ぜ、30秒間掻き落としをした後、再び120秒間練り混ぜた。なお本実験では1バッチの練混ぜ量を2Lとした。

(2) フロー試験

硬化前のフレッシュ性状を確認するために、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に基づき、フロー試験を行った。

3. フレッシュ性状およびフロー試験の結果

使用した粉体であるFA、BS、SFの構成比ごとのフロー値の比較を図-3に、GP1Lあたりに添加したSFの質量(g/L)とフロー値の関係を図-4に示す。

図-3より、SFの置換率が高いほど、また図-4より、SFの添加量が多くなると、フロー値が比例的に減少していることが確認できた。SFを用いたコンクリートの場合には、比表面積が20~22(m²/g)と大きいSFの使用量を増やすと、水との接触面積が増加するため、流動性が低下する^{7,8)}。本実験のGPペーストの場合においても、コンクリートと同様に比表面積が大きいSFの使用が流動性低下の原因であると考えられる。

4. まとめ

本実験では、フライアッシュベースのジオポリマー(GP)ペーストにシリカフェームを添加した場合について、シリカフェームがフロー値および圧縮強度に与える影響を調べた。その結果、シリカフェームの添加量を増やすと、それらが有する大きな比表面積の影響を受け、GPペーストのフロー値が比例的に減少する傾向となることが確認された。

[参考文献]

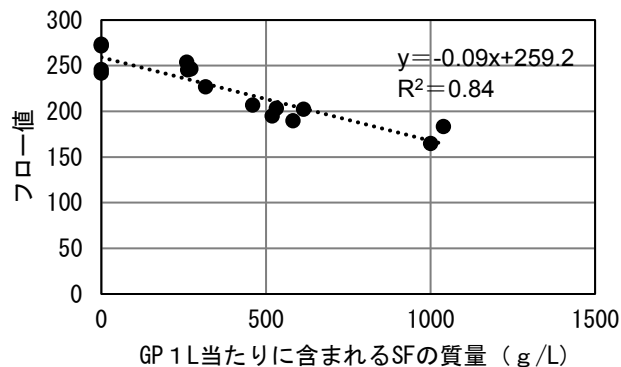


図-4 SF量とフロー値の関係

- 1) 日本コンクリート工学会:建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017
- 2) 日本コンクリート工学会:コンクリート診断技術'12 [基礎編], pp.247-253, 2012
- 3) 佐藤晋哉, 白杵匠, 伊代田岳史:簡易的なひび割れ注入工法に用いる各種注入材料の補修効果の検討, 第40回土木学会関東支部技術研究発表会, No.5, p.22, 2013
- 4) 佐藤隆恒, 大木信洋, 東原実, 上原元樹:石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.2023-2028, 2013
- 5) 上原元樹:セメントを用いない低炭素型新材料であるジオポリマーの開発, 鉄道総研月例発表会要旨, pp.1-4, 2016
- 6) 合田寛基, 原田耕司, 津郷俊二, 日比野誠:フライアッシュII種を用いたジオポリマーの材料特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1993-1998, 2015
- 7) 長滝重義, 大即信明, 久田真, 水野和彦:シリカフェームの品質とその評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol.28, No.520, pp.87-98, 1995.8
- 8) 松藤泰典:資源の有効利用とコンクリート/第6回 シリカフェームを用いたコンクリート, コンクリート工学, Vol.34, No.5, pp.70-75, 1996.5

*1 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生 工修
 *2 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生
 *3 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 教授 工学博士
 *4 三重県工業研究所 博士(工学)

*1 Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., M. Eng.
 *2 Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ.
 *3 Prof. Div. of Arch., Graduate School of Eng. Mie Univ., Dr. Eng.
 *4 Mie Prefecture Industrial Research Institute, Dr. Eng.

シリカフュームを添加したジオポリマーペーストに関する基礎的研究
(その2 圧縮強度への影響)

正会員 ○ 伊藤 彰利*1 同 前川 明弘*3
同 ポンマーハサイ パラミ*2 同 畑中 重光*4

ジオポリマー シリカフューム フライアッシュ
高炉スラグ微粉末 圧縮強度 膨張性

1. はじめに

その1では、シリカフューム (以下, SF), フライアッシュ (以下, FA), および高炉スラグ微粉末 (以下, BS) の粉体の比率を変化させ、練混ぜ可能な範囲とSFがジオポリマーペースト (以下, GP) のフレッシュ性状に与える影響について調べた。その2では、SFを添加したことによる硬化後の供試体の状況と圧縮強度に与える影響についてまとめる。

2. 供試体の作製

使用材料、粉体の比率、調合、供試体の作製方法は、その1に記載した通りである。

圧縮強度試験の材齢は1, 7, 28日とし、練混ぜ後、GPペーストをφ50×100mmの円柱供試体型枠 (各調合3本)、に打ち込んだ。

供試体の養生方法は、打込み後、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留めて封かん養生とし、以下の温湿度条件下で養生を行った。材齢1日の供試体は60°Cで27時間の加温養生とし、材齢7, 28日の供試体については20°C, 60%R.H.の環境下で養生を行った。

また、一部の供試体には膨張が確認され、それらについては膨張した上面をコンクリートカッターで切断、または研磨機で削り、円柱形となるように整形した。また、圧縮試験前に全ての供試体の端面を研磨機で平滑にした。

3. 実験結果

3.1 養生後における供試体の形状

表-1に養生後の供試体の形状を示す。ここで、膨張していない供試体については代表的な1種類のみを示した。同表より、SFの置換率が大きい、NO.3, 4, 14が特に膨張部分が大きい事が確認できた。

図-1にSiO₂量が単位容積質量に与える影響を示す。同図より、SiO₂量が増えると単位容積質量が低下する傾向となることが明らかとなった。これらの結果より、SFを添加することで、SiO₂量が増えると供試体が膨張するため、単位容積質量が低下したと考えられる。膨張の傾向はBSが少なく、SFが多い場合に、膨張量が大きくなる。

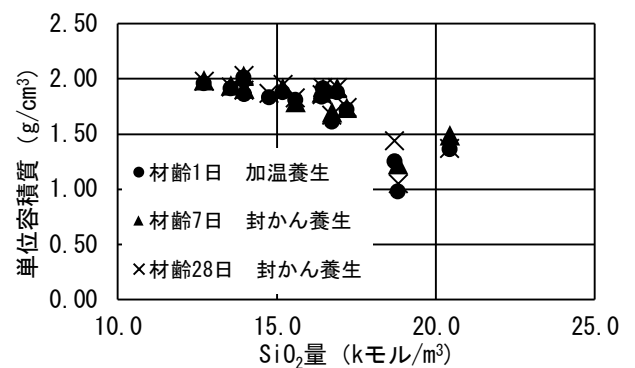


図-1 SiO₂量が単位容積質量に与える影響

表-1 養生後の供試体の形状

養生条件	膨張なし	膨張あり					
	上図No. 5 下図N. 10	No. 2	No. 3	No. 4	No. 6	No. 7	No. 14
加温養生							
封かん養生							

3.2 圧縮強度試験結果

図-2(a)に材齢1日(加温養生), 図-2(b)に材齢7日(封緘養生), そして図-2(c)に材齢28日(封緘養生)の圧縮強度試験の結果をそれぞれ示す。

同図では, 粉体に含まれるBSの比率が高いほど圧縮強度が高く, SFの比率が高いほど圧縮強度は低い傾向を示した。これらの理由として, BSを使用した条件では, SFの添加によりBS含有量が相対的に減少するため, CASHの生成が抑えられたことや, 本実験の条件ではSFが良好に反応しなかったことなどの可能性が考えられる。

図(c)より, 材齢28日目FAが80%以下, BSとSFの比が1:1の範囲で圧縮強度が30N/mm²を超える事が確認された。No.9, No.11, No.13, およびNo.15ではSFの置換率が20~50%においても圧縮強度が30N/mm²を超えていた事から, 粉体の大半がSF, またはSFとFAの調合においては, SiO₂の量が過剰であったか, SiO₂に対するカルシウム含有量が不足していたことなどが考えられる。

一般的に, FAベースのGPは, 初期段階に加温養生する事で概ね長期材齢の強度と一致するとの報告がある。¹⁾しかしながら, 図(a)において, No.6やNo.15のように圧縮強度が15N/mm²前後のものが, 図(c)では, 40N/mm²近くまで増加していた事から, SFを添加したGPは加温養生による強度増進の影響は受けにくいと考えられる。

図-3に, 圧縮強度と単位容積質量との関係を示す。同図では, 単位容積質量が大きくなるほど圧縮強度が高くなる傾向を示した。これはSFを過剰に添加することで何らかの反応による発泡・膨張が生じ, 単位容積質量が低くなるとともに, 圧縮強度も低下したものと考えられる。

4. まとめ

本実験では, ジオポリマー(GP)ペーストにシリカフュームを添加した場合におけるシリカフュームが圧縮強度におよぼす影響を調べた。得られた結果を以下に示す。

- 1) シリカフュームの添加量を増加させると, GPペーストが膨張する傾向が見られた。また, 膨張に伴う単位容積質量の減少により, 圧縮強度が低下する場合がある。
- 2) シリカフュームを添加したGPは, 調合にもよるが, 一般に加温養生による圧縮強度の増加が見込めない。
- 3) シリカフュームを添加した場合でも, 高炉スラグ微粉末を添加することにより, 圧縮強度30N/mm²以上が得られた。

参考文献

- 1) 坪内徹朗, 三島直生, 畑中重光, 前川明弘, 小池良洋: ジオポリマーの使用に適した石炭灰の迅速判定手法に関する一考察, 日本建築学会東海支部研究報告書, Vol.56, pp.85-88, 2018.2

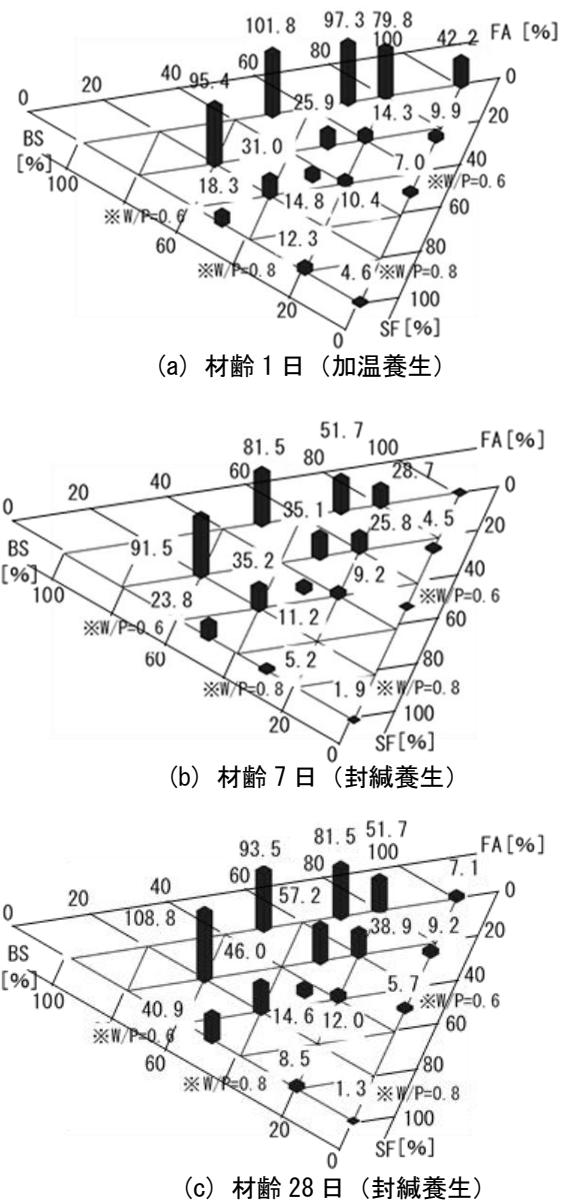


図-2 各材齢での圧縮強度試験

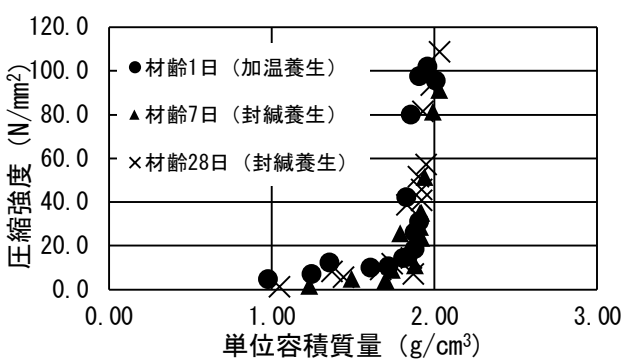


図-3 圧縮強度—単位容積質量 関係

*1 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生 工修
 *2 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生
 *3 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 教授 工学博士
 *4 三重県工業研究所 博士(工学)
 *1 Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ. M. Eng.
 *2 Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ.
 *3 Prof. Div. of Arch., Graduate School of Eng. Mie Univ., Dr. Eng.
 *4 Mie Prefecture Industrial Research Institute, Dr. Eng.

Fundamental Experiments Study on Fluidity and Compressive Strength of Geopolymer Paste with Varied Powder Ratio

Akitoshi Ito

Department of Architecture,
Graduate School of Engineering,
Mie University,
1577 Kurimamachiya-cho,
Tsu City, Mie Prefecture,
514-8507, Japan
e-mail:
417M404@m.mie-u.ac.jp

Palamy Phommahaxay

Department of Architecture,
Graduate School of Engineering,
Mie University,

Shigemitsu Hatanaka

Professor, Department of
Architecture, Graduate School
of Engineering, Mie University,

ABSTRACT

This study aims to improve Geopolymer (GP), by investigating how the quality would vary with different kinds of powder added at the initial stage of research. GP has gained attention as a new and environment-friendly material that can be cured without adding cement, which emits CO₂ in the manufacturing process. Alternative materials are industrial byproducts such as fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (BS). However, practical use of GP compounded with other materials is still in exploratory phase. Therefore, this study attempted to contribute to the practical use of GP. The fine particles silica fume (SF) were added as main powder to FA and BS, since in past research, only a small amount of SF had been tested. The results showed us clear distributions of flow and compressive strength of GP, and variations with different ratios of FA, BS and SF powder. It was found that fluidity decrease by adding SF and compressive strength improved by adding BS.

1. Introduction

Creating cement-free materials to prevent disastrous global warming has been a crucial issue in the area of construction and civil engineering. In fact, the temperature reached 30°C in the Arctic Circle, exceeding 40°C and 50°C in some areas of Japan and The United States, respectively. WMO analyzed that a series of abnormal weather, including Western Japan's heavy rain disaster was caused by the long-term trend of global warming due to the increase of atmospheric greenhouse gases.

Regardless of the concern, the production of Portland cement, one of the main constituents of concrete materials, contributes to 4% of the total CO₂ emission in Japan. As the rise in temperature progresses, measures against global warming are to be taken. [1] Environmental protection policies urge researchers to develop new environmentally-friendly materials for substitution.

Geopolymer(GP) is a new material which, unlike other concrete materials, hardens without cement. It is gaining attention as an environmentally-friendly material, since industrial byproducts, such as the fly ash (FA) and the ground granulated blast furnace slag (BS) can be utilized for its production. Therefore, the application of GP has two advantages; the reduction of the CO₂ emission and the efficient use of resources.

However, there are several challenges for facilitating

GP production. For instance, the hardening mechanism of GP differs from that of cement. Cement hardens due to hydration reaction, while GP does not. Moreover, GP's properties change with the materials comprising it. Therefore, the method of material utilization is still in the investigation phase, since the reaction mechanism of GP has not been precisely understood. [2]

Regardless of the above challenges, there are studies making important contributions to GP's practical use. For example, Ichikawa's study, that used FA and BS as the main additional powders as other studies had done, found that BS contributes to an increase in strength of GP. The results also indicated that the setting time becomes shorter. Besides, the relationship of strength and setting time showed that a mixed solution of sodium hydroxide and water glass is suitable for the solution.

Based on the above findings, this study aims to further develop GP as a crack repair material, by using Silica Fume (SF) as a main powder. SF is an ultrafine particle material, whose particle size is from 0.1 to 0.2μm in diameter, while common inorganic materials such as cement, FA, BS are approximately 10μm. It is expected that producing GP with SF as the main powder can contribute good injection properties. [5]

In spite of the good potential of SF, it has been hardly added in previous GP research or only in small portion (e.g. 20 % or less) was added. [6][7]. It is necessary to

investigate the basic characteristics of GP using SF as the main powder, before being able to study its characteristics as a crack repairing material.

Therefore, this experiment prepared GP with SF, FA, and BS respectively, and the proportions of powders were changed, for the purpose of grasping the fundamental characteristics of GP using SF.

The results of experiments according to fluidity, compressive strength and the overall condition of the cured bodies will be reported.

2. Outline of experiment

2.1 Materials

Table 1 shows the materials used in the experiment. Table 2 shows the chemical composition ratios of powders by X-ray fluorescence analysis (XRF).

2.2 Mix proportion of the experiment

Fig 1. shows the proportion of Fly ash (FA), Ground granulated blast furnace slag (BS) and Silica fume (SF) in the powder according to a triangular graph.

In this experiment, the mass ratio (W/P) of the solution and the powder was 0.5, and the solution ratio was constant at Water glass No.2 (WG2): Sodium hydroxide solution (NH) = 2: 1, and only the proportion of the powder was altered.

However, when it was not possible to perform the proper mixing, we kept adding the chemical solution until the dry powder turned to the paste as well.

2.3 Method of making specimens

As for the chemical solution of WG2 and NH with a mix ratio of 2:1 was prepared one day before the experiment and was stored in the curing room with 20°C. and 60% relative humidity (R. H.).

The mixing was performed in the following steps. First, only the powder in dry condition was mixed with a hand scoop, Second, the solution was added, and the mixture was mixed for another 60 seconds using a mortar hand mixer. After scraping off for 30 seconds, it was mixed again for 120. Lastly, a flow test was carried out and the cast into a mold was performed.

After pouring, we covered the top of the form work with a vinyl sheet, fastened it with rubber bands and performed curing, in the following conditions.

Specimens of 1day age were subjected to heat curing at 60°C for 27hours, and specimens of 7 and 28days age were cured at 20°C. degrees and 60% R. H.

Three specimens of each ages, were polished using a machine so that their top faces became smooth. They were then subjected to compression tests, carried out in a universal testing machine.

In the case of the swelled specimens, the swelled part was cut with a concrete cutter and polished using a machine until forming a cylindrical shape.

Table 1 Materials

	Code	Material	Density (g/cm ³)
Powder (P)	FA	Fly ash JIS IIclass	2.29
	BS	Ground granulated Blast furnace slag	2.9
	SF	Silica fume	2.3
Solution (W)	WG2	Water glass No.2	1.45
	NH	Sodium hydroxide solution (10mol/L)	1.35

Table 2 Chemical composition of powder (Weight%)

	FA	BS	SF
Al ₂ O ₃	23.64	14.94	0.23
SiO ₂	60.49	34.04	97.75
CaO	2.90	42.72	0.23
Fe ₂ O ₃	4.68	0.35	0.10
K ₂ O	1.21	0.26	0.86
MgO	0.53	5.81	0.22
Na ₂ O	0.49	0.26	0.09
Ig.loss	4.03	0.25	0.28

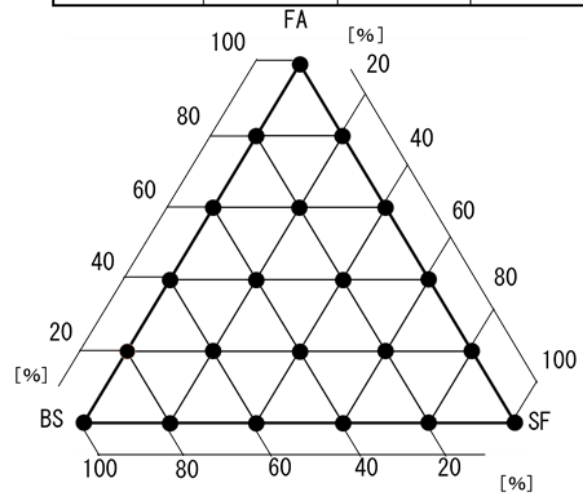


Fig 1. Percentage of each material in powder

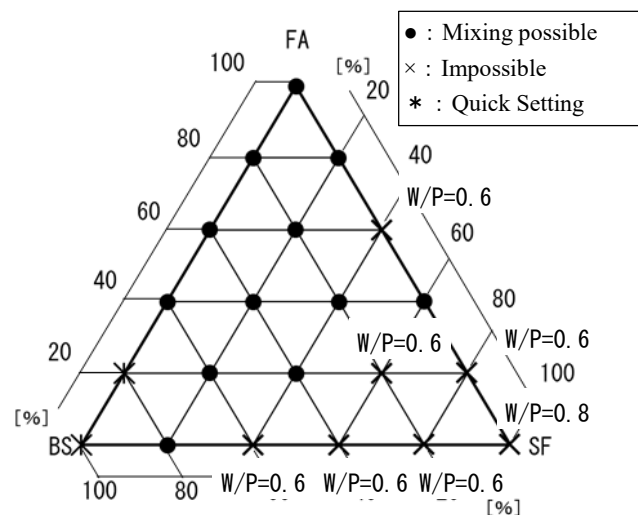








Fig 2. Possibility of mixing

Table 3 Expansion of SF-BS series (FA replacement rate:0%)

SF (BS) rate	100 (0)	80 (20)	60 (40)	40 (60)	20 (80)	0 (100)
						
Expansion	○	○	○			

3. Results and Consideration

3.1 Fresh properties and Flow value

Fig 2. shows whether or not mixing is applicable when $W/P=0.5$. In the case where mixing is not applicable, the value of W/P is changed according to the indicated value of the solution. Fig 3. shows the results of the flow test.

When the proportion of SF in the powder is high, the flow value decreases, and if it is excessively added, mixing tends to be difficult. Similarly for concrete, if the amount of SF added is increased, the slump value tends to decrease. This is due to an increase in the contact area with the solution caused by SF having a large specific surface area of $2.0\sim 2.3(g/cm^3)$, and it is thought that the same phenomenon occurs also in the GP paste.

In addition, for quick curing cases of BS100% and BS80% FA20% specimens, some of them were not filled enough and cavities were formed.

3.2 Shape of specimen after curing

Table 3. shows the expansion rate of the SF-BS series (FA replacement: 0%). In this series, swelling occurred when the replacement rate for SF was 60% or higher, and the expansion rate tended to increase with the rise of the SF substitution rate. It is thought that a gas was formed due to the addition of SF, which caused foaming and swelling in specimens.

Fig 4. Shows the influence of SF replacement rate on density. As the SF replacement rate increased, the density tended to decrease. Also, since the BS-SF series were denser comparing to the FA-SF series, it is thought that the structure of BS-SF became denser due to the formation of CASH by Ca and the latent hydraulic property.

3.3 Compressive strength test

Fig 5. shows the results of the compressive strength test performed on specimens of 28 days of age (sealed curing). It was confirmed that the compressive strength tended to rise with higher ratios of BS powder,

Fig 6.(a) and (b) show the relationship between compressive strength and BS replacement rate in SF-BS series (FA0%) and the FA-BS series (SF0%) respectively.

When the BS replacement rate was high, the quick

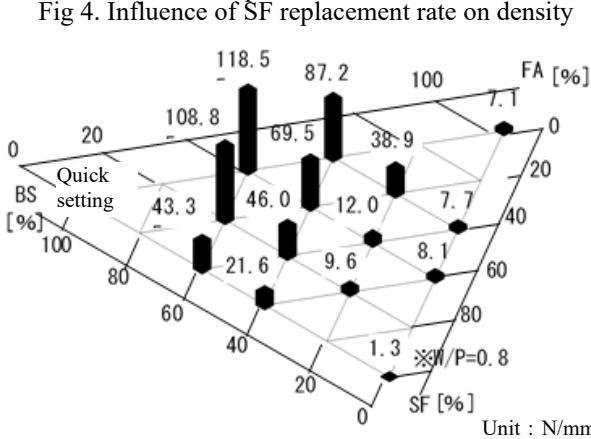
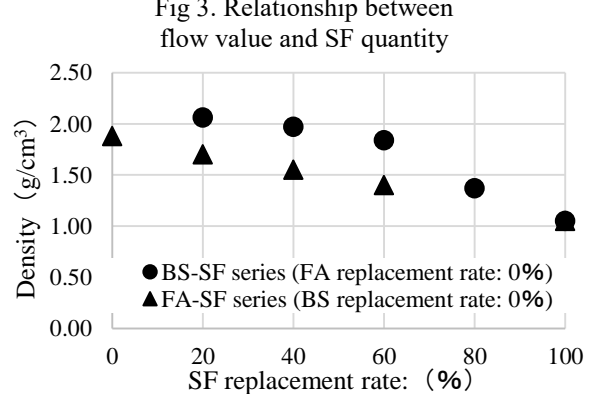
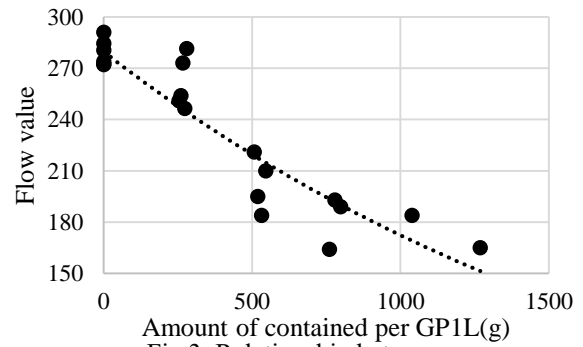
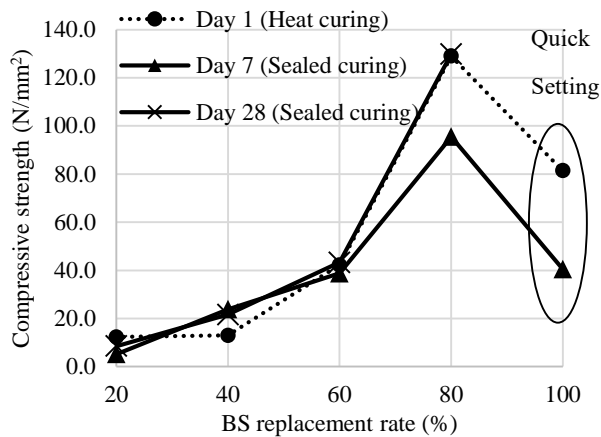
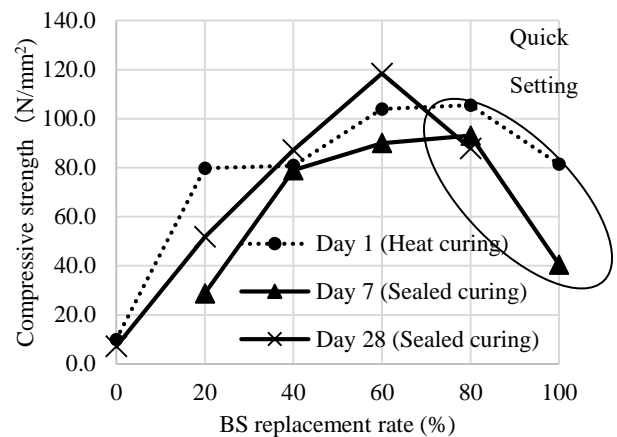


Fig 5. Material age 28 days (Sealed curing) Compressive Strength

setting and hardening during the placing occurred, and unfilled parts were formed resulting in the compressive strength decrease. In the FA series, the strength increased in the case of the low replacement rate of BS, whereas the low replacement rate of BS did not contribute to a rise of



(a) SF-BS series (FA:0%)



(b) FA-BS series (SF:0%)

Fig 6. Relationship between compressive strength and BS replacement ratio

strength in SF-BS series. However, in the SF series, when the BS replacement rate was high, the quick setting did not occur and the strength sharply increased.

4. Conclusions

This study conducted experiments to investigate the fluidity and compressive strength of Geopolymer paste(GP) by testing different ratios of Silica fume(SF), Fly ash(FA) and Ground granulated blast furnace slag(BS) additions. The results are shown below.

- 1) The flow rate of GP paste decreases due to the influence of the specific surface area of SF. When the proportion is large, mixing becomes difficult.
- 2) When the amount of SF to be added is increased, GP tends to swell.
- 3) The compressive strength of GP increases with the rise of the additional amount of BS. However, if the proportion rate of BS is high, the setting time becomes shorter and the mixing tends to be difficult.
- 4) In these experiments it was confirmed that the setting time of the SF - BS series was longer than that of the FA - BS series. Therefore, and it can be said that SF contributes to the setting delay, although further investigations should be conducted.

The findings obtained in this experiment are expected to contribute to the effective utilization of Geopolymer as a crack repairing material in the construction field. The realization will have important outcomes, including reusing industrial byproducts and lowering CO₂ emissions.

We do hope that this area of research contributes to preventing global warming.

References

- [1] Nippon Slag Association (2018). Measure against global warming and blast furnace cement. [Online]. Available: <http://www.slg.jp/activity/ondanka.html> (in Japanese)
- [2] Japan Concrete Institute: The Research Committee

Report on Application of Geopolymer Technology to the Construction Field, 2017.9 (in Japanese)

- [3] Ichikawa, K. et al.: Fundamental Study on Setting Characteristics and Compressive Strength Development of Geopolymer Paste, Proceedings of Japan Concrete Institute, Vol.37, No.1, pp.1957-1962, 2015 (in Japanese)
- [4] Ichikawa, K. et al.: Fundamental Study on Flow of Geopolymer Paste, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting (Transactions of AIJ), pp.33-34, 2015.9 (in Japanese)
- [5] Kato, T. et al: Fundamental Studies on Inorganic Material for Crack Injecting, Proceedings of Japan Concrete Institute, pp.1263-1268, 1990 (in Japanese)
- [6] Sato, T. et al: Properties such as pH, and geopolymer materials prepared with various kinds of mix-proportion and the preparation methods, Proceedings of Japan concrete Institute, Vol.38, No.1, pp.2325-2330, 2016 (in Japanese)
- [7] Sato, T. et al: Characteristics of the gepolymer materials using the alkaline silicate solution of the low alkali / water ratio and the high silicon / alkali ratio, proceedings of Japan Concrete Institute, Vol.39, No.1, pp.2035-2040, 2017 (in Japanese)



ITO Akitoshi
Sep. 01, 1994.
M2
Architecture
Concrete, Geopolymer
Clean an environment for future

ABSTRACT

Experimental Study on Fluidity and Compressive Strength of Geopolymer Paste with Varied Powder Ratios

Akitoshi Ito¹, Palamy Phommahaxay² and Shigemitsu Hatanaka³

¹Department of Engineering, Mie-University, Mie, Japan
(E-mail: 417m404@m.mie-u.ac.jp)

²Department of Engineering, Mie-University, Mie, Japan
(E-mail: 417DE51@m.mie-u.ac.jp)

³Department of Engineering, Mie-University, Mie, Japan
(E-mail: hatanaka@arch.mie-u.ac.jp)

Keywords: Geopolymer, Silica fume, Fly ash, Ground granulated blast furnace slag, Fluidity, Compressive strength

1. INTRODUCTION

This study aims to improve Geopolymer (GP), by investigating how the quality would be varied with different kinds of powder to be added at the initial stage.

In recent years, abnormal weather has occurred frequently around the world due to the influence of global warming. Reduction of carbon dioxide (CO₂) is required in various fields.

GP has gained attention as a new and environment friendly material that can be cured without adding cement emitting CO₂ in the manufacturing process. Also, GP uses industrial byproducts such as fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (BS) as a powder. The

GP hardens with the powders mainly composed of aluminum silicate and alkaline solution. GP is an aluminum based binder, while cement binds with calcium. Therefore, GP is superior in durability, in particular, resistance to sulfuric acid is high. Also, GP has strength equal to or higher than that of concrete. In recent years, research to put practical for GP has begun.

In this research, ultimate particle material is used for powder and the ultimate goal is to utilize GP as crack repairing material.

In this experiment, as an initial stage of the study, the targets are to use silica fume (SF) (particle size: 0.1 ~ 0.2 μm) which has not been used as the main powder until now as GP powder and check whether it can be mixed, hardened or necessary strength can be obtained.

2. EXPERIMENT

In this experiment, we study the applicable range when using SF.

2.1 Materials and Mix proportions

FA, BS, and SF were used as the powders and an aqueous solution of sodium hydroxide and an aqueous solution of sodium silicate were used as the alkaline solution. The type of solution and the ratios to powder are made constant. In the proportion of GPs, the type of solution and the ratio to powders were made constant, changed only the proportion of powders.

2.2 Results

Fig.1 shows the experimental results and applicable range.

Quick setting occurred in the range where the addition rate of BS is high (dotted line: BS addition rate: about 100% or 90%), placing of GP is difficult.

In the range where the addition ratio of SF is high (dot-dash line), since the specific surface area of SF is large, the contact area with the solution increases and it became difficult to mix.

The double line in Fig.1 shows the range of compressive strength of 30 N/mm² or less. It was confirmed that compressive strength was improved by BS.

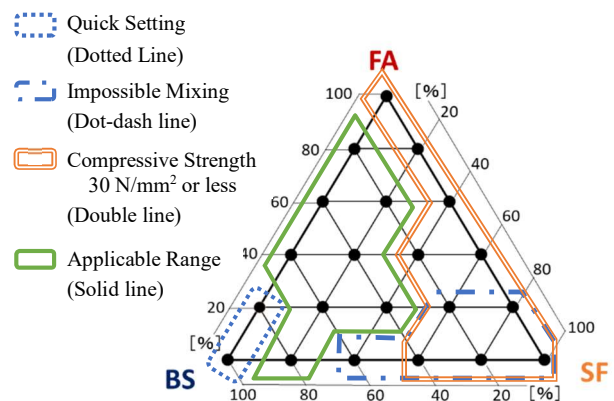


Fig.1 Experimental results and applicable range

3. CONCLUSIONS

This study conducted experiments to investigate the fluidity and compressive strength of Geopolymer paste (GP) in cases, the powder ratio of Silica fume (SF), Fly ash (FA) and Ground granulated blast furnace slag (BS) was changed.

The solid line in Fig.1 shows a range excluding abnormal setting, difficulty in mixing, and compressive strength of 30 N/mm² or less.

With this range as an applicable range, we will conduct experiments on crack injection performance in the future.

シリカフェームを添加したジオポリマーペーストのフロー値・圧縮強度に関する基礎的研究

Experimental Study on Flow Value and Compressive Strength of
Geopolymer Paste with Varied Powder Ratio

A: 材料施工 1: 材料施工 正会員 ○伊藤 彰利* ITO Akitoshi
 ジオポリマー 流動性 圧縮強度 同 ポンマーハサイ パラミ* PHOMMAHAXAY Palamy
 フライアッシュ 高炉スラグ微粉末 シリカフェーム 同 畑中 重光** HATANAKA Shigemitsu

1. はじめに

セメントクリンカを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ溶液を用いて硬化させたジオポリマー¹⁾は、産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末の有効活用、CO₂の排出量を低減出来ることから、低炭素・資源型社会実現のためのセメント代替材料として、例えば補修材などで土木分野および建築分野における構造物への利用が期待されている。

現在、ひび割れ補修材は有機系補修材料であるエポキシ樹脂がコンクリートとの付着性、およびひび割れ追従性能などが良いことから、多く活用されているが、紫外線による劣化や耐火性に劣る点、施工時の温度管理や湿潤面での接着不良²⁾、またコンクリートとの熱膨張係数、引張強度が異なるなどの問題がある。

一方、無機系の材料であるジオポリマー（以下、GP）の特徴としては、①耐久性に優れる、②コンクリートと同程度の材料特性が得られる、③コンクリートおよび鉄筋との付着が良い⁴⁾、そして④耐硫酸性が高い⁶⁾という利点と、①材料によって生成される物質が異なる、②高アルカリ材料の使用、③粘性が高いなどの欠点が挙げられる。

そこで、本研究ではGPのひび割れ注入材料としての活用を最終目標とし、その初期段階として粒径の細かさが注入深さに関係することから⁷⁾、超微粒子であるシリカフェーム（以下、SF）を主要粉体として用い、練混ぜ可能な範囲、フロー値、および圧縮強度を調べ、SFを添加した場合の適用可能範囲を検討することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表1に使用材料を、表2に蛍光X線分析（XRF）によ

表1 使用材料

種別	略号	材料名	密度 (g/cm ³)
粉体 (P)	FA	フライアッシュII種 (JIS A 6201)	2.29
	BS	高炉スラグ微粉末4000 (JIS A 6206)	2.91
	SF	シリカフェーム (JIS A 6207)	2.2
溶液 (W)	WG2	水ガラス2号 原液	1.45
	NH	水酸化ナトリウム水溶液(10mol/L)	1.35

表2 活性フィラーの化学組成（質量%）

	FA	BS	SF
Al ₂ O ₃	23.64	14.94	0.23
SiO ₂	60.49	34.04	97.75
CaO	2.90	42.72	0.23
Fe ₂ O ₃	4.68	0.35	0.10
K ₂ O	1.21	0.26	0.86
MgO	0.53	5.81	0.22
Na ₂ O	0.49	0.26	0.09
lg.loss	3.05	0.00	0.28
合計	96.99	98.38	99.76

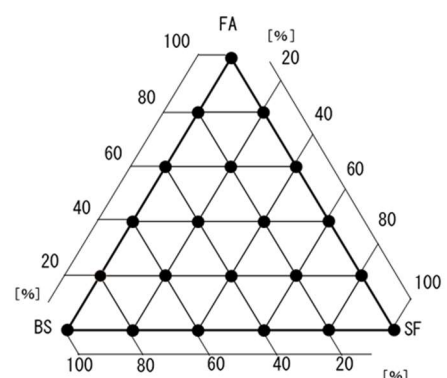


図1 粉体に占める各材料の割合

* 三重大学大学院工学研究科建築学専攻

** 三重大学大学院工学研究科建築学専攻

Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ.

Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

る粉体（活性フィラー）の化学成分比を示す。

粉体には、フライアッシュ（以下、FA）は JIS II 種を、高炉スラグ微粉末（以下、BS）は JIS 規格された 4000 ブレーンを、シリカフェームも JIS 規格されたものを使用した。アルカリ溶液は、水ガラス 2 号の原液（以下、WG2）、および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液（以下、NH）を使用した。

2.2 実験の要因と水準

図 1 に粉体に占める各材料の割合を三角グラフで示す。本実験では、溶液と粉体の質量比を 0.5 とし、溶液比は水ガラス 2 号 (WG2) : 水酸化ナトリウム水溶液 (NH) = 2:1 で一定とし、粉体の比率のみを変化させた。但し、練混ぜが出来なかった調合は、粉体の明らかな乾燥部分がなくなりペースト化するまで溶液を加えて実験を行った。

図 2 に、W/P=0.5 での練混ぜの可否と、練混ぜが不可であった際に溶液を加えたことにより変更した W/P の値を示す。また、BS の添加による瞬結の影響を受けたものも示す。

SF の置換率が高い範囲で、練混ぜが困難となった（図 2 中×で示される調合）。これは SF の比表面積が大きいため、溶液との接触量が増えたためであると考えられる。

2.3 試験方法

(1) 練混ぜ方法

溶液は前日に WG2 と NH を質量比で 2 : 1 となるように混ぜ、20°C、60% R.H. の養生室で保管したものをを用いた。

粉体はハンドスコップで粉体のみを空練りした後、溶液を追加し、モルタル用ハンドミキサーを用い 60 秒間練り混ぜ、30 秒間掻き落としをした後、再び 120 秒間練り混ぜた。なお本実験では 1 バッチの練混ぜ量を 2L で行った。

硬化前のフレッシュ性状を確認するために、JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」に基づいてフロー試験を行った。また、材齢 1, 7, 28 日において圧縮強度試験を各調合 3 本ずつ行えるよう、φ50×100mm の円柱供試体型枠に打ち込んだ。

(2) 養生方法

打込み後、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留めて封かん養生とし、以下のような温湿度条件下で養生を行った。

材齢 1 日は 60°C で 27 時間の加温養生とし、材齢 7, 28 日は 20°C、60% R.H. の環境で養生を行った。

また、膨張が発生した供試体は、膨張した部分をコンクリートカッターで切断、または研磨機で削り、円柱形

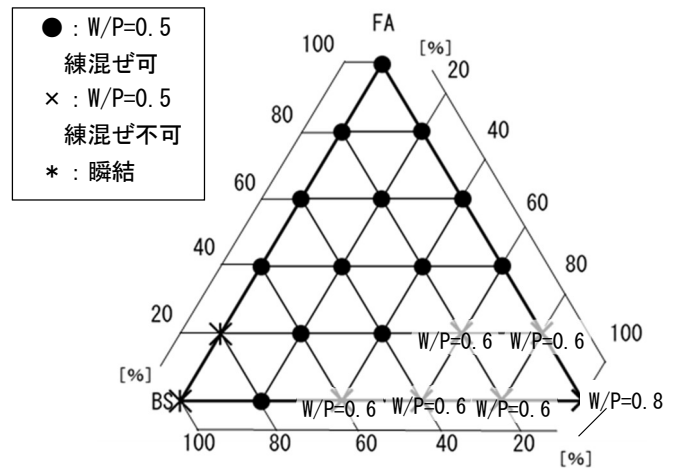


図 2 W/P=0.5 での練り混ぜの可否・瞬結

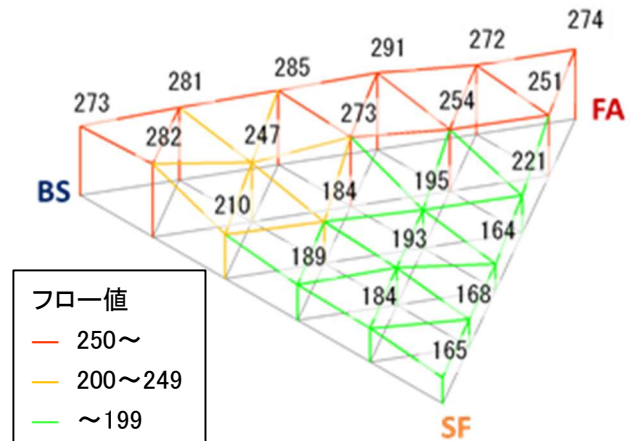


図 3 フロー試験結果



(a) BS100%

(b) BS80%・FA20%

写真 1 瞬結の影響を受けた供試体

になるように整形し、研磨機で端面を平滑にした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状およびフロー値

図 3 にフロー試験の結果を示す。粉体に占める SF の割合が大きいくほど、練り混ぜが困難となり、フロー値が低下する傾向が見られた。このことはコンクリートでも見られるが、SF の比表面積が 20~22 (m²/g) と大きいため

表 3 SF-BS 系 (FA 置換率 0%) の膨張の様子

BS (%) (SF 置換率%)	100 (0)	80 (20)	60 (40)	40 (60)	20 (80)	0 (100)
供試体の様子						
膨張の有無	無	無	無	有	有	有

使用量を増やすと、溶液と接触する部分が多くなりスランプ値が低下する現象が、GPペーストでも起きたと考えられる。

また、粉体がBS100%、およびBS80%・FA20%の供試体で、瞬結が確認された(写真1)。特にBS100%では打込んでいる途中で硬化し、未充填部ができ、圧縮強度試験を行う前に破損した。

3.2 養生後の供試体の形状・単位容積質量

表 3 に FA 置換率 0% の SF-BS 系の膨張の様子を示す。SF 置換率 60% 以上で膨張し、SF 置換率が増えるほど、膨張量が増える傾向が確認された。SF の添加により何らかの気体の発生が起り発泡、膨張したと考えられる。

図 4 に SF 置換率が単位容積質量に与える影響を示す。SF 置換率が増加すると単位容積質量が減少する傾向となった。また BS-SF 系は FA-SF 系に比べて、密度が高いことから、BS が有する Ca により C-A-S-H の生成や潜在水硬性により組織が緻密化したと考えられる。一方、FA-SF 系は膨張により単位容積質量が減少した。

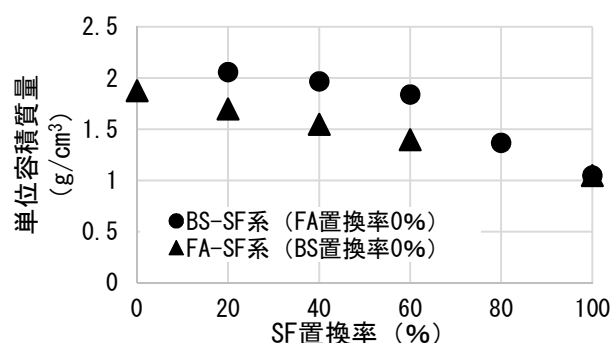


図 4 SF 置換率が単位容積質量に与える影響

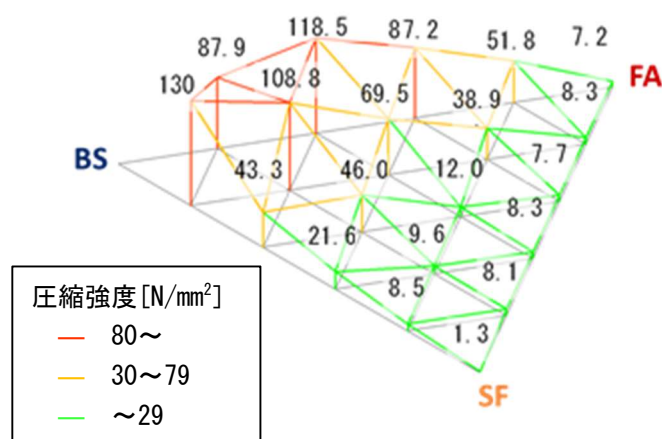


図 5 圧縮強度試験結果 材齢 28 日 (封緘養生)

3.3 圧縮強度試験結果

図 5 に材齢 28 日 (封緘養生) の圧縮強度試験の結果を示す。

粉体に含まれる BS の比率が高いほど圧縮強度は高くなる傾向が確認された。

図 6 に SF-BS 系 (FA0%), FA-BS 系 (SF0%) の圧縮強度と BS 置換率の関係を示す。

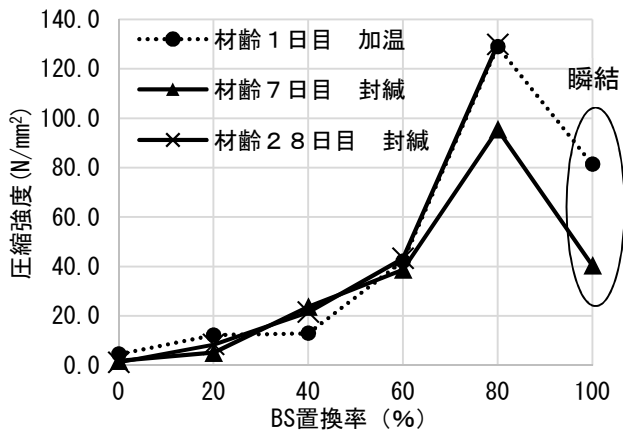
BS 置換率が高いと瞬結が起り、打込み途中で硬化したため、未充填部ができ、圧縮強度が低下した。

FA-BS 系では BS 置換率が低い段階で強度が増加したのに対して、SF-BS 系では BS 置換率が低い段階では強

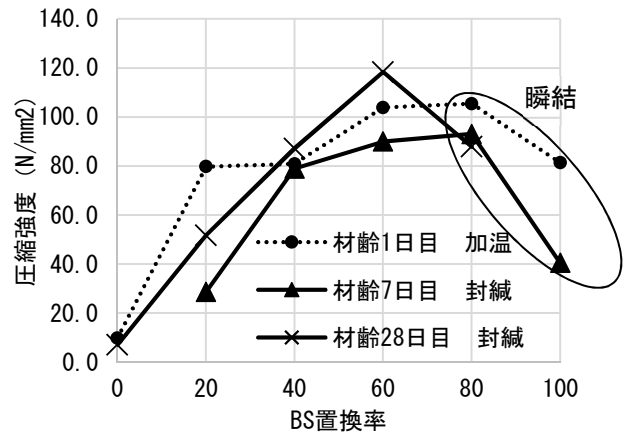
度が増加しない。しかし BS 置換率が高い範囲では SF-BS 系では瞬結が起らず、強度が急激に向上した。

3.4 適用可能範囲

本研究での条件下において、瞬結が起こったもの、圧縮強度が 30N/mm² を満たさなかったものを除いた範囲を、適用可能範囲とし、図 7 に示す。SF を適用する際は置換率 20% 前後が望ましく、BS の添加が必要となる。しかしこの範囲は今後、凝結時間や乾燥収縮率等の実験を行い、より狭い範囲になると考えられる。



(a) SF-BS系 (FA置換率0%)



(b) FA-BS系 (SF置換率0%)

図6 圧縮強度とBS置換率の関係

4. まとめ

本実験では、ジオポリマーのひび割れ補修材としての活用を最終目標とし、粉体に一般的に用いられているフライアッシュ (FA)、高炉スラグ微粉末 (BS) に対し、超微粒子であるシリカフューム (SF) で置換し、練混ぜの可否、フロー値、および圧縮強度についての実験を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) SFの添加量を増加させると、それらが有する大きな比表面積の影響を受け、GPペーストのフロー値が減少し、その割合が多いと練混ぜが困難になることが確認された。
- 2) BSの添加量を増加させるとGPの圧縮強度が増加するが、その割合が多いと凝結時間が短くなり、練混ぜが困難になる。
- 3) FA-BS系では瞬結が起こったが、SF-BS系では瞬結が起こらなかった。そのため、SFの添加により圧縮強度は減少するが、凝結遅延効果の可能性があると分かった。

今後、この適用可能範囲にひび割れ注入実験を行い、注入性状の確認を行う。さらに、より粒径が細かいフライアッシュ (JISI種)、および高炉スラグ微粉末 (6000・8000プレーン) に変更し、ひび割れ注入性に適した粉体・調合の選定を行う予定である。

【謝辞】

本実験に際し、本学学部4年生の五百蔵沙耶さんからご協力をいただきました。また、本研究費の一部は科学研究費基盤研究 (B) 17H03291 (研究代表者: 一宮一夫 大分高専教授) によった。付記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学会: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017

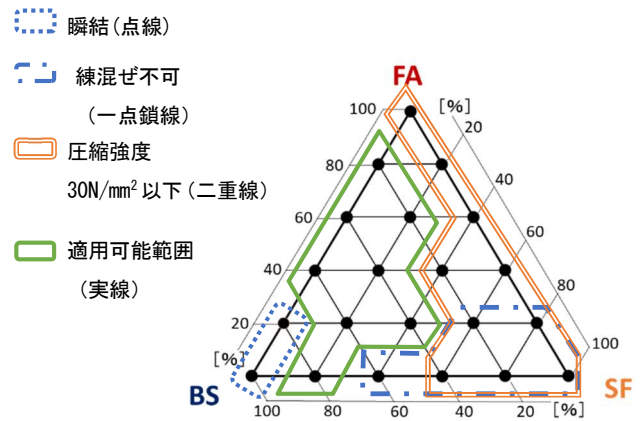


図7 実験結果まとめ・適用可能範囲

- 2) 井上真澄, Saphouvong khamhou, 児島孝之: アクリル樹脂を用いたコンクリートひび割れ補修材に関する基礎的研究, 材料, Vol.56, No.12, pp.1183-1188, 2007.12
- 3) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術 '12 [基礎編], pp.247-253, 2012
- 4) 伊藤彰利, ポンマーハサイパラミ, 畑中重光: 傾斜せん断試験によるジオポリマーモルタルとコンクリートの付着特性に関する基礎的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, Vol.56, pp.73-76, 2018.2
- 5) Sanjay PAREEK, 鹿島大雄, 丸山一平, 荒木慶一: 各種異なる母材及び鉄筋に対するジオポリマーモルタルの付着特性に関する基礎的研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1839-1844, 2018
- 6) 原田耕司, 一宮一夫, 津郷俊二, 池田攻: ジオポリマーモルタルの耐久性に関する基礎的研究, Vol.33, No.1, 2011
- 7) 合田寛基, 原田耕司, 津郷俊二, 日比野誠: フライアッシュII種を用いたジオポリマーの材料特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1993-1998, 2015

高炉スラグ微粉末の置換率がジオポリマーペーストのヤング係数に 及ぼす影響に関する基礎的実験

Experimental Study on Substitution Rate of Blast Furnace Slag on Elastic Modulus of Geopolymer Paste

A: 材料施工, 1: 材料施工

ジオポリマー (GP) 高炉スラグ微粉末
フライアッシュ 圧縮強度 ヤング係数

正会員

同

同

○ポンマハーサイ パラミ*

伊藤 彰利*

畑中 重光**

Palamy Phommahaxay

Akitoshi Ito

Shigemitsu Hatanaka

1. はじめに

コンクリートは、世界中に多用される建設材料の一つである。一般的にコンクリートで使用される結合材は普通ポルトランドセメントであるが、その製造工程において地球温暖化の一因とされるCO₂ガスを大量に排出することが問題視されている。その解決方法の一つとして、セメント使用量を削減するため、その代替としてフライアッシュや高炉スラグなどの産業副産物を有効に利用していくことが考えられる。

そこで、1988年にJoseph Davidovitsに提唱されたジオポリマー (GP) は、環境に優しい材料として様々な研究者から注目を集めた。GPとは、セメントクリンカを使用せず、産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末などに多く含まれているアルミナシリカ粉末とアルカリ水溶液との反応によって得られる非晶質の縮重合体 (ポリマー) である。

既往の研究¹⁾によると、GPは価格がセメントの2倍程になるが、普通コンクリートと同等なレベルまで強度発現が可能で、凝結時間や養生時間が短く、コンクリートおよび鉄筋との付着性がよく、また耐火性や耐酸性が優れるなどの特徴があるといえる。GPに関しては、まだ基礎的な品質や建設用材料としての性質・性能を解明にする段階にあるが、土木分野および建築分野における構造物への利用が期待できる。

しかし、GPの場合、同一強度のセメント硬化体に比べヤング係数が低くなることが多く報告されている¹⁾。南ら⁶⁾はGPコンクリートの圧縮強度と静弾性係数との間には相関性が認められ、一般的なセメント

系材料を用いた硬化体と同様に、圧縮強度を指標とした指数関数で表すことができると報告している。

フライアッシュのみを用いたGPは、凝結時間が遅く初期強度発現性に劣り、実用的な強度発現性を得るには加温養生が必要とされている。したがって、常温硬化型のGPとするために、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用する検討例が比較的多い¹⁾。市川ら³⁾によれば、高炉スラグ微粉末の添加量を大きくすると圧縮強度が比較的に増加する傾向がある。

本研究では、活性フィラーの一部として高炉スラグ微粉末の置換率を変化させたGPペースト硬化体の圧縮強度とヤング係数の関係について定量的に検討を行う。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

表-1に使用材料を、表-2に蛍光X線分析(XRF)による粉体の化学成分比を示す。

表-1 使用材料

種別	略号	材料名	密度 (g/cm ³)
粉体	FA	フライアッシュII種 (JIS A 6201)	2.29
	(P) BS	高炉スラグ微粉末4000 (JIS A 6206)	2.91
溶液	WG2	水ガラス2号 原液	1.45
	(W) NH	水酸化ナトリウム水溶液(10mol/L)	1.35

* 三重大学大学院工学研究科建築専攻 大学院生

** 三重大学大学院工学研究科建築専攻 教授 工学博士

* Graduate Student, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ.

** Prof, Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

表-2 活性フィラーの化学組成 (質量%)

	FA	BS
Al ₂ O ₃	23.64	14.94
SiO ₂	60.49	34.04
CaO	2.90	42.72
Fe ₂ O ₃	4.68	0.35
K ₂ O	1.21	0.26
MgO	0.53	5.81
Na ₂ O	0.49	0.26
Ig. loss	3.05	0.00
合計	96.99	98.38

表-3 セメントペーストの調合

W/C	モルタル単位量 (kg/m ³)	
	水 (W)	セメント (C)
0.5	612	1223

表-4 ジオポリマーペーストの調合

V _{BS} * (%)	W/P	単位量 (kg/m ³)				フロー値
		活性フィラー (P)		溶液 (W)		
		FA	BS	WG2	NH	
0	0.5	1200	0	400	200	-**
10		1066	153	406	203	295
20		936	301	412	206	-**
40		797	531	443	221	291
60		544	816	454	227	285
80		279	1116	465	232	281

[柱] *: V_{BS} = V_{BS}/V_P 高炉スラグ微粉末の置換率 (容積比)

** : 最大フロー値の300を超過したものを示す

W/P : 溶液粉体比 (質量比)

粉体としては、一般に GP の粉体として多く用いられている 4000 ブレーンの高炉スラグ微粉末 (以下, BS) およびフライアッシュ JIS II 種 (以下, FA) を使用した。使用溶液としては、水ガラス 2 号 (以下, WG2) および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液 (以下, NH) を使用した。

表-3に、比較用のセメントペーストの調合を、表-4に本実験で使用したジオポリマーの調合表を示す。溶液と粉体の質量比は0.5で一定とした。アルカリ溶液は、WG2:NH=2:1となるように混合したものを使用した。

2.2 供試体の作製方法

溶液は前日にWG2とNHを質量比で2:1となるように混ぜ、20℃、60% RHの養生室で保管したものを用いた。

練混ぜ方法としては、図-1に示しているように、最初にハンドスコップで粉体のみを空練りした後、溶液を追加し、モルタル用ハンドミキサーを用い60秒間練り混

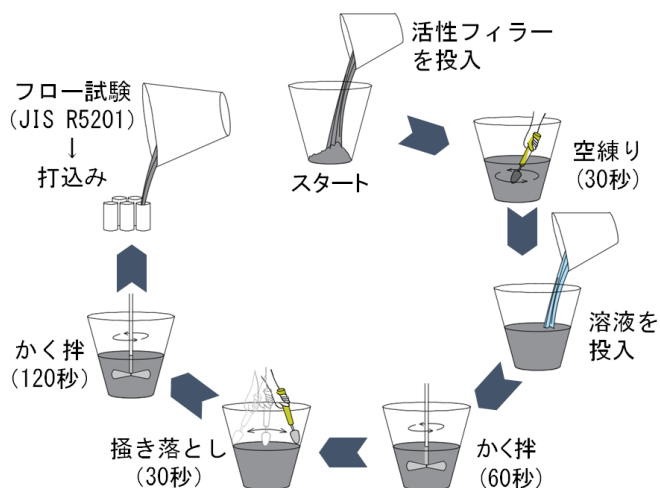


図-1 練混ぜ手順

ぜ、30秒間掻き落とした後、再び120秒間練り混ぜた。硬化前のフレッシュ性状を確認するために、JIS R5201「セメントの物理試験方法」に基づいてフロー試験を行った。その後、φ50×100mmの円柱供試体型枠に打ち込んだ。打込み後、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留め、材齢28日までは20℃、60%RHの環境で養生を行った。

2.3 試験方法

硬化後の供試体に対しては、研磨機により端面処理を行い、各調合につき3本ずつの供試体を用いて圧縮強度試験を行った。また、ヤング係数の測定に関しては、JIS A1149 に準拠して行った。

3 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-2 に圧縮試験結果を示す。なお、同図には過去のデータ (白丸) およびセメントの圧縮強度も併示してある。図より、高炉スラグ微粉末の置換率を増加するに従い、圧縮強度も増加する傾向がみられ、過去の実験結果と一致している。また、圧縮強度と高炉スラグ微粉末添加率の間に相関が認められ、以下の式 (1) のような線形式で近似することができるといえる。

$$F_c = 1.3V_{BS} + 31.8 \quad (1)$$

ここに、 F_c は GP ペーストの圧縮強度 (N/mm²)

V_{BS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

しかし、高炉スラグ微粉末 80% を置換したものについては、高い圧縮強度を得たものの、近似線より大きく外れている。これは、高炉スラグ微粉末の添加量が大きく、

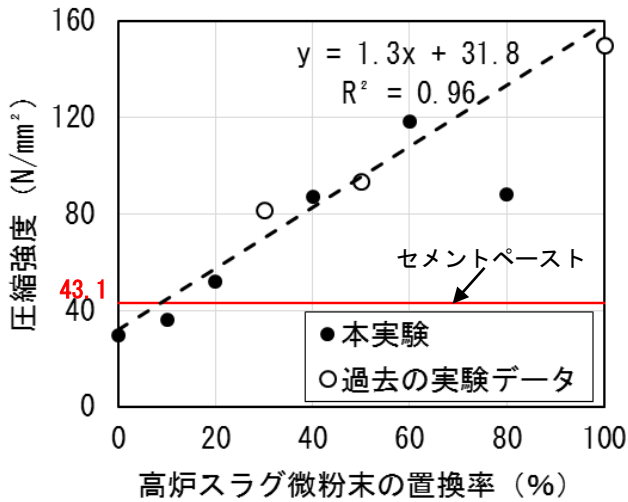


図-2 圧縮試験の結果

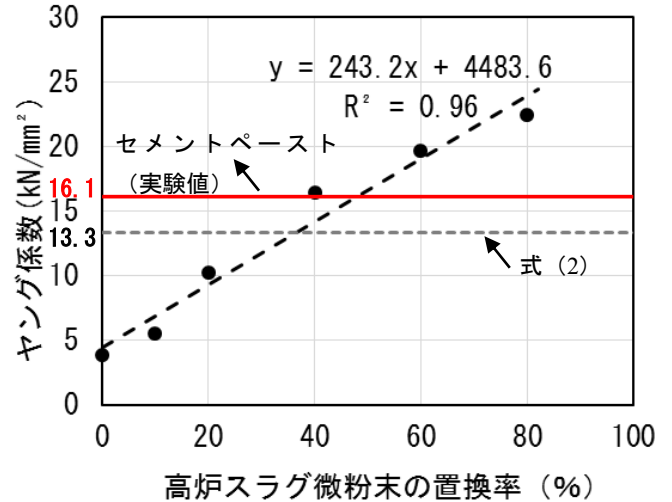


図-3 ヤング係数の結果

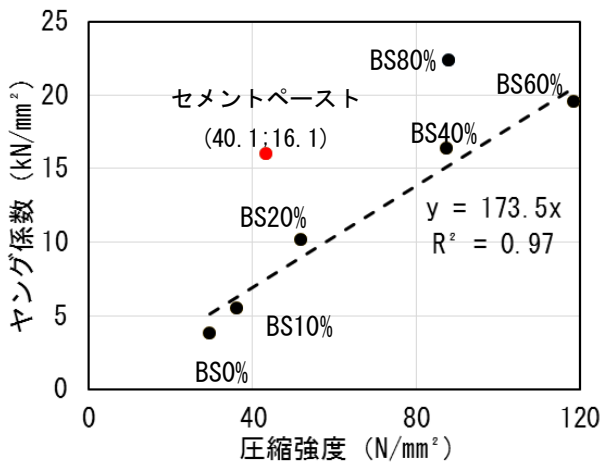


図-4 圧縮強度-ヤング係数の関係



写真-1 高炉スラグ微粉末置換率80%の脱型後の供試体

$$E_p = a + b \log(C/W) \quad (2)$$

ここに、 E_p はセメントペーストのヤング係数 (kN/mm²)

$$a = -3700 + 4200 \log(t)$$

$$b = 39500 - 2276 \log(t)$$

t は供試体の材齢(日)

C/W はセメント水比

瞬結が起こり (写真-1)、打込んでいる途中で硬化し、充填不良な部分があったため、予想した強度より低い結果が得られたと考えている。

また、同一溶液粉体比のセメントペーストと比較すると、高炉スラグ微粉末の置換率 20%以上の GP ペースト硬化体がセメントペースト硬化体の圧縮強度を上回った。

3.2 ヤング係数

図-3 にヤング係数の結果を示す。同図には、清原ら⁴⁾のセメントペーストの推定式 (式 (2)) による計算結果も示す。

図より、高炉スラグ微粉末の置換率が大きいほど増加する傾向がみられるが、同一溶液粉体比のセメントペースト硬化体と比較すると、置換率 40%で同等なヤング係数の値が得られ、置換率 40%以上のものはセメントを上回っている。

また、GP ペーストのヤング係数と高炉スラグ微粉末の置換率の間に相関が認められ、以下の式 (3) のような線形式で表すことができた。

$$E_p = 243.2 V_{BS} + 4483.6 \quad (3)$$

ここに、 E_p は GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

V_{BS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

今回のヤング係数の実験結果と川上らの推定式により算出した結果と比較すると、セメントの場合は計算値が実験値の約 80%でほぼ近い結果が得られるが、GP ペースト硬化体の場合は、同一溶液粉体比においても高炉スラグ微粉末の置換率によって圧縮強度とともにヤング係数

が異なるため、式 (2) と同様な推定は適切でないといえる。

3.3 圧縮強度とヤング係数の関係

図-4 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。南ら⁶⁾は、GP モルタルならびに GP コンクリートのいずれも、圧縮強度とヤング係数の関係は圧縮強度を指標とする指数関数で表しているのに対し、GP ペーストを対象とした本実験の範囲では、高炉スラグ微粉末の置換率 80% の場合を除いて、圧縮強度とヤング係数の関係を式 (4) のような線形関係で表すことができる。

$$E_c = 173.5F_c \quad (4)$$

ここに、 E_c は GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

F_c は GP ペーストの圧縮強度 (N/mm²)

4. まとめ

本実験では、GP ペースト硬化体の圧縮強度およびヤング係数と高炉スラグ微粉末の置換率の関係について実験的に検討し、セメントペースト硬化体との比較を行い、以下のような知見が得られた。

- (1) 高炉スラグ微粉末の置換率を大きくするにつれて、圧縮強度が大きくなることが、過去の実験と同様に確認できた。また、その関係を線形式で表した。

$$F_c = 1.3V_{BS} + 31.8$$

ここに、 F_c は GP ペーストの圧縮強度 (N/mm²)

V_{BS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

- (2) 高炉スラグ微粉末の置換率を大きくするにつれて、圧縮強度とともにヤング係数も増加する。その関係を線形式で表した。

$$E_p = 243.2 V_{BS} + 4483.6$$

ここに、 E_p は GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

V_{BS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

- (3) GP ペーストの場合でも圧縮強度とヤング係数の間

に相関が認められ、線形式で表すことができる。

[謝辞]

本実験に際し、本学学部 4 年生の五百蔵沙耶さんからご協力をいただきました。また、本研究費の一部は科学研究費基盤研究 (B) 17H03291 (研究代表者：一宮一夫 大分高専教授) によった。付記して謝意を表す。

[参考文献]

- 1) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
- 2) 一宮一夫，津郷俊二，原田耕司，池田攻：ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.575-580，2011.7
- 3) 市川敬悟：高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーの基礎物性に関する研究，三重大学平成 27 年修士論文
- 4) 清原千鶴，永松静也，佐藤嘉昭，上田賢司：コンクリートのヤング係数の推定式，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.601-606，1999
- 5) 河尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1943-1948，2011
- 6) 南浩輔，松林卓，舟橋政司：ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1987-1992，2013
- 7) 永井伴英，李柱国，高垣内仁志，菅彰：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとしたジオポリマーコンクリートの力学性能に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集，No.39，No.1，pp.2077-2082，2017
- 8) 伊藤彰利，Phommahaxay Palamy，前川明弘，畑中重光：シリカフェームを添加したフライアッシュベースのジオポリマーペーストに関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1875-1880，2018

論文 シリカフェームを用いたジオポリマーペーストのフロー値・圧縮強度に関する基礎的研究

伊藤 彰利*1・ポンマーハサイ パラミ*1・前川 明弘*2・畑中 重光*3

要旨：本研究では、超微粒子であるシリカフェームの微細なひび割れへの充填効果に期待し、ジオポリマーの補修材としての活用を目的としている。実験では、シリカフェーム、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末を粉体に用い、その比率を変化させ、ジオポリマーペーストの練混ぜの可否、フロー値、圧縮強度への影響を調べた。その結果、シリカフェームの添加により、体積膨張が生じることなどが確認できた。また、種類の異なるシリカフェームと高炉スラグ微粉末の粉体比を変化させ、練り混ぜの可否、フロー値、圧縮強度を調べた。その結果、シリカフェームの種類によって生じる、これらの諸性状の違いが明らかになった。

キーワード：ジオポリマー、シリカフェーム、フロー値、圧縮強度、膨張性

1. はじめに

セメントクリンカを使用せず、非晶質のケイ酸アルミニウムを主成分とした原料（活性フィラー）とアルカリ溶液を用いて硬化させたジオポリマー（以下、GP）は、産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末の有効活用、CO₂の排出量低減が期待出来る材料である。これらは、低炭素・資源型社会実現のためのセメント代替材料として、土木・建築分野における構造物への利用が検討されているが、その用途や活用方法は模索段階であるものが多い。

このような背景の中、本研究ではGPのひび割れ注入材料としての活用を最終目標とし、粒径の細かさが注入深さに関係することから²⁾、研究の初期段階として超微粒子であるシリカフェーム（以下、SF）が活性フィラーとしての適用性を有するかを確認するための基礎的な実験を行う。

既往の研究^{3)~12)}では、SFを添加したGPの製造は、水ガラスの代わりにSFを加える「ケイ素粉体添加その場溶解法」が多く用いられている。SF添加には、高炉スラグ粉末（以下、BS）を多用して、通常は凝結が早くな条件においても、可使時間の延長効果により練混ぜが可能となることや³⁾⁴⁾、硫酸塩に対する抵抗性が高く、硫酸イオンの浸入遅延作用が期待できる⁵⁾といった特徴がある。しかし、この用途ではSF置換率は約2~10%のものであり、主要な粉体として用いている研究はほとんど見られない。

著者らがこれまでに行った実験¹³⁾では、SFの添加量が多いとGP硬化体が膨張し、圧縮強度が低下した。そこで本実験では、実験1としてフライアッシュ（以下、FA）、BS、SFの粉体比を変化させ、フロー値と圧縮強

度の確認を行い、実験2として、新たに2種類のSFを用い、フロー値、圧縮強度（材齢1日加温養生）および膨張の確認を行った。

2. 実験概要

2.1 実験1

(1) 実験の要因と水準

表-1に使用材料、表-2に蛍光X線分析（XRF）による粉体の主な化学組成を示す。

本実験では、粉体にはFAのJIS II種を、JIS規定された高炉スラグ微粉末とシリカフェームを使用した。アルカリ

表-1 使用材料（実験1）

種別	略号	材料名	密度 (g/cm ³)
粉体 (P)	FA	フライアッシュII種 (JIS A 6201)	2.29
	BS	高炉スラグ微粉末4000 (JIS A 6206)	2.91
	SF 1	シリカフェーム (JIS A 6207)	2.2
溶液 (W)	WG2	水ガラス2号 原液	1.45
	NH	水酸化ナトリウム水溶液(10mol/L)	1.35

表-2 活性フィラーの化学組成 (%)（実験1）

	FA	BS	SF 1
Al ₂ O ₃	23.64	14.94	0.23
SiO ₂	60.49	34.04	97.75
CaO	2.90	42.72	0.23
Fe ₂ O ₃	4.68	0.35	0.10
K ₂ O	1.21	0.26	0.86
MgO	0.53	5.81	0.22
Na ₂ O	0.49	0.26	0.09
Ig.loss	3.05	—	0.28

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 三重県工業研究所 ものづくり研究課 博士 (工学) (正会員)

*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

溶液には、水ガラス2号の原液（以下、WG2）、および10mol/Lの水酸化ナトリウム水溶液（以下、NH）を使用した。

溶液と粉体の質量比（以下、W/P）を0.5とし、溶液比は水ガラス2号（WG2）：水酸化ナトリウム水溶液（NH）＝2：1で一定とし、粉体の比率のみを変化させた。但し、練混ぜが出来なかった調査は、粉体の明らかな乾燥部分が無くなりペースト化するまで溶液を加えて実験を行った。

図-2に、本実験で用いた粉体比を示す。図中に、W/P＝0.5で練混ぜが不可の調査については溶液を加えたことにより変更したW/Pの値を、凝結時間が短く打込み時に明らかな硬化が起こったものについては瞬結と記す。

(2) 練混ぜ方法

溶液は前日にWG2とNHを質量比で2：1となるよう混合し、20℃、60%R.H.の室内に24h以上、静置したものをを用いた。

粉体を空練りした後、溶液を混合し、モルタル用ハンドミキサーを用い60秒間練り混ぜた。その後、30秒間掻き落としを行い、さらに120秒間練り混ぜた。なお本実験では1バッチの練混ぜ量を2Lとし、ペーストはφ50×100mmの円柱供試体型枠に打ち込んだ。

(3) 養生方法

打込み後、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留めて封かん養生とし、以下のような温湿度条件下で養生を行った。

すなわち、材齢1日は60℃で27時間の加温養生とし、材齢7、28日は20℃、60%R.H.の環境で養生を行った。

また、膨張が発生した供試体は、膨張した部分をコンクリートカッターで切断、または研磨機で削り、円柱形になるように整形し、研磨機で端面を平滑にした。

(4) 試験方法

ペーストのフレッシュ性状を確認するために、JIS R 5201「セメントの物理試験法」に基づいてフロー試験を行った。またGP硬化体は、材齢1、7、28日において圧縮強度試験（各調査3本ずつ）を実施した。

2.2 実験2

(1) 実験の要因と水準

表-3に使用したSFの主な化学組成、表-4に実験の要因と水準を示す。

実験1でSFを添加した供試体に膨張が発生したため、実験2では、FAを用いず、新たに2種類のSF（SF 2、3）を用いて、フロー値と膨張の有無を確認した。SF 2は、SF 1と同じく金属シリコン製造時に排出されるSFで、別産地（中国）のものを、SF 3は電融ジルコニア製造時に排出される中国産のものを、それぞれBSとの粉体比を

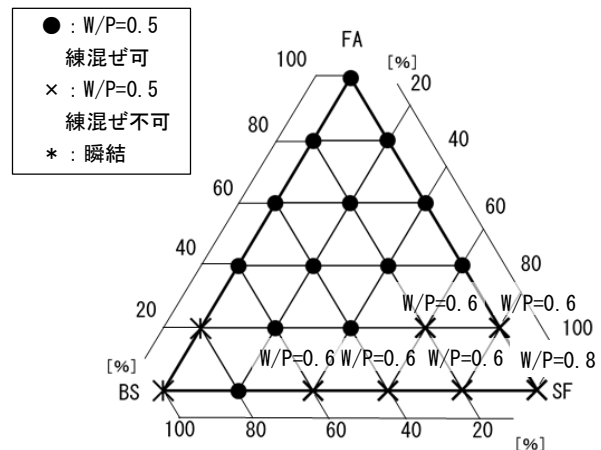


図-2 W/P=0.5での練混ぜの可否および瞬結の状況（実験1）

表-3 SFの化学組成（質量%）（実験2）

	SF 1	SF 2	SF 3
産地	ノルウェー	中国	中国
起源	金属シリコン	金属シリコン	電融ジルコニア
SiO ₂	97.75	93.15	96.5
Al ₂ O ₃	0.23	0.14	0.26
Fe ₂ O ₃	0.1	0.06	0.27
CaO	0.23	0.89	0.03
MgO	0.22	0.72	0.02
K ₂ O	0.86	2.28	0.1
Na ₂ O	0.09	0.37	0.01
ZrO ₂ +HfO ₂	-	-	2.34
Ig.loss	0.28	2.38	0.43

表-4 実験の要因と水準（実験2）

粉体比 (質量比)	SF:BS	100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, 0:100
溶液比	NH:WG2 = 1:2 (一定)	
溶液粉体比	W/P=0.5 (一定)	

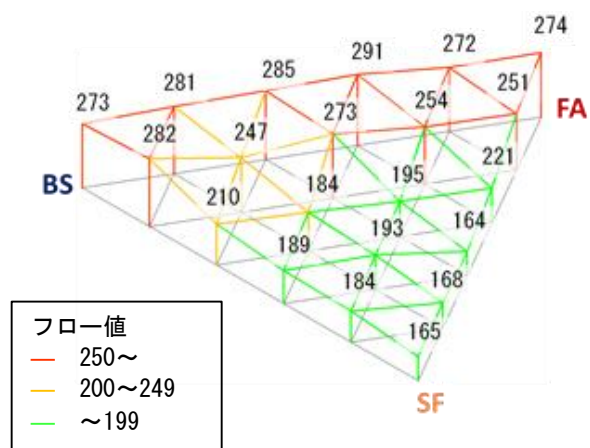








図-3 フロー試験結果（実験1）

表-5 SF-BS系 (FA置換率0%) の硬化体の様子 (膨張の有無) (実験1)

SF 1 (%) BS 置換率 (%)	0 (100)	20 (80)	40 (60)	60 (40)	80 (20)	100 (0)
硬化体の様子						
膨張の有無	無	無	無	有	有	有

変化させた。溶液の種類および溶液粉体比は実験1と同一とした。

(2) 供試体作製および試験方法

練混ぜ方法、養生方法は実験1と同一条件で行い、フロー値、材齢1日 (60°C, 27時間加温養生) における圧縮強度や膨張の状況などについて確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 実験1

(1) フロー値

図-3にフロー試験の結果を示す。

SFの置換率が高いほど、フロー値が低くなる傾向が見られた。これはコンクリートでも見られる、SFの比表面積が20~22 (m²/g) と大きいため使用量を増やすと、水と接触する部分が多くなりスランプ値が低下する¹⁴⁾ ¹⁵⁾ 現象と同様に、GPペーストでも比表面積が大きいことが原因であると考えられる。

(2) SFによる膨張の影響

表-5にSF-BS系 (FA置換率%) 供試体の膨張の様子を、図-4に膨張の有無を示す。

表-5より、SF置換率60% (BS40%) で膨張し、SF置換率が増えるごとに膨張量が増加していることが分かる。

図-4より、SF0% (FA-BS系) では膨張していないことから、SFの添加によって膨張したと考える。また、BSの高い範囲では膨張が見られなかった。

(3) 圧縮強度試験

図-5に、材齢28日 (封かん養生) の圧縮強度試験の結果を示す。BS100%は、瞬結の影響で打込みが困難であり、供試体に未充填部が存在し、研磨時にこれに起因する破壊が生じた。

また、粉体に含まれるBSの比率が高いほど圧縮強度は高く、SFの比率が高いほど圧縮強度は低い傾向を示した。これらの理由として、BSを使用した条件においては、SFの添加によりカルシウム含有量が (相対的に) 減少するためCASHなどの硬化体の生成が抑えられたことや、本

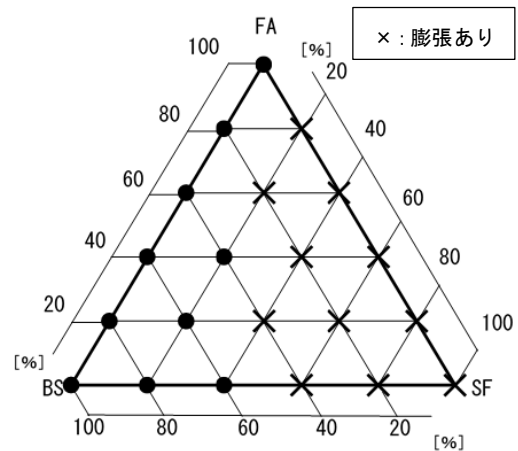


図-4 膨張の有無

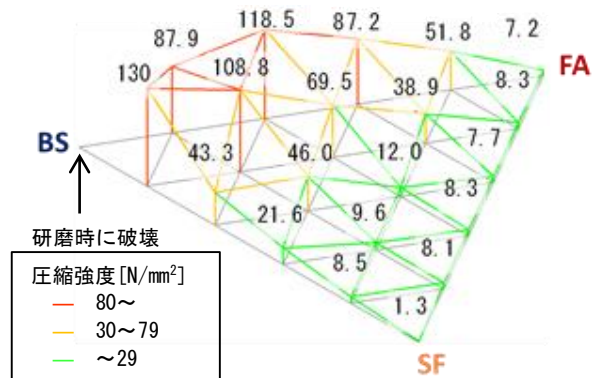


図-5 圧縮強度試験結果 (材齢28日 封緘養生)

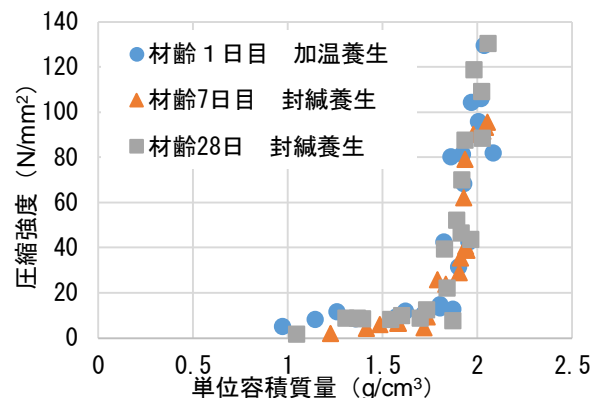


図-6 圧縮強度と単位容積質量の関係

実験の条件ではSFが良好に反応しなかったなどの可能性が考えられる。

(4) 圧縮強度と単位容積質量との関係

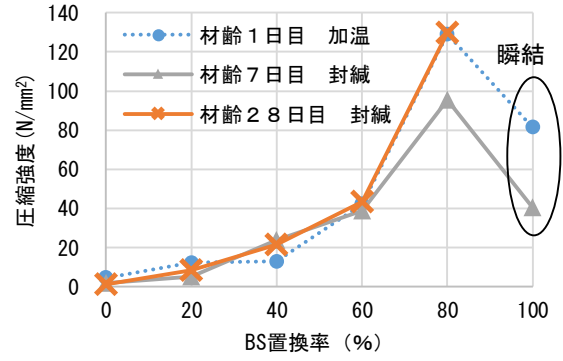
図-6に、圧縮強度と単位容積質量の関係を示す。同図によれば、単位容積質量に2倍程度の差が生じ、数値が大きくなるほど圧縮強度が高くなる傾向を示した。これは、SFの添加により何らかの反応による発泡が生じ供試体を膨張させたため、単位容積質量が低くなるとともに、圧縮強度が低下したと考えられる。

(5) 高炉スラグ微粉末による瞬結の影響

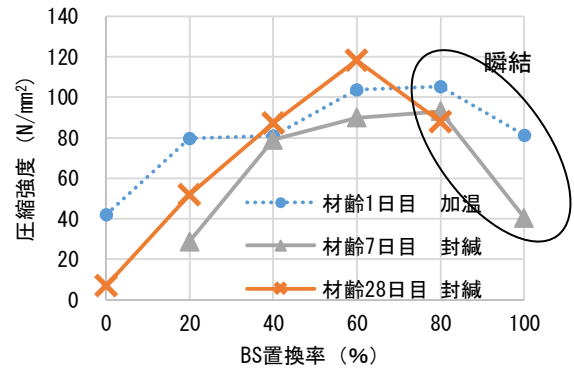
図-7 (a) に SF-BS 系 (FA 置換率 0%)、(b) に FA-BS 系 (SF 置換率 0%) の圧縮強度と BS 置換率との関係を示す。

SF-BS 系では BS 置換率が 20% のとき、養生方法に関わらず圧縮強度は 10N/mm² 程度と低く、80% で急激に上昇し、その圧縮強度は 100~130N/mm² 程度となった。一方、FA-BS 系では、BS 置換率が 20%、材齢 1 日加温養生において 80N/mm² 近く、材齢 28 日封緘養生であっても 50N/mm² 以上得られており、粉体の反応性に大きな違いがあることが確認出来た。

また、BS 置換率が高いと瞬結が発生し、既述した供試体の未充填部の発生が原因で圧縮強度の低下が生じた。但し、SF-BS 系と FA-BS 系、供試体作製条件などにより、圧縮強度の低下が生じる BS 置換率や強度低下の度合いが異なっており定量的な評価には至っていない。



(a) SF-BS 系 (FA 置換率 0%)



(b) FA-BS 系 (SF 置換率 0%)

図-7 圧縮強度と BS 置換率の関係

SF1はSF置換率60%以下の時、W/P=0.5で練混ぜが困難で溶液を足したが、SF2、SF3では溶液を追加することなく練混ぜを行うことができた。

3.2 実験2

(1) フレッシュ性状・膨張性

表-6 SF 2 および SF3 の硬化体の様子 (膨張の有無) (材齢 1 日 加温養生)

SF (%) (BS 置換率 %)	20 (80)	40 (60)	60 (40)	80 (20)	100 (0)
SF 2					
SF 3					

図-8に、フロー試験結果を示す。SF1はフロー値が小さいのに対し、SF2、SF3では高く、SFの種類によってGPペーストの流動性が異なることが分かった。

表-6に、材齢1日加温養生のSF2、SF3の膨張の様子を示す。SF1と同様、SF2、SF3を用いた硬化体でも膨張が確認された。しかし、SF置換率100%の条件における膨張量には違いがあり、特に電融ジルコニア製造時に排出されるSF3の膨張量は少ない結果となった。一方、金属シリコン製造時に排出されるSF1、SF2は膨張量が多かったが、SF置換率80%ではSF1と比べてSF2の膨張量は少ない結果となった。

以上のように、SFの種類によっても膨張量が大きく異なることが明らかとなった。

(2) 圧縮強度試験 (材齢1日加温養生)

図-9に、材齢1日加温養生の圧縮強度試験結果を示す。金属シリコンから排出されるSF1とSF2は得られた圧縮強度の数値が同程度となったが、BS置換率が80%の硬化体のみ、SF1がSF2を大幅に上回った。すなわち、SF1はBS置換率が80%で130N/mm²近くの圧縮強度を確認できた。また、電融ジルコニアから排出されるSF3はBS置換率20%で40N/mm²を超え、BS置換率80%では140N/mm²近くの圧縮強度となり、BS置換率に関わらずSF1、SF2の2倍以上の強度が得られた。

またSF種類に関わらず、BS置換率60%を超える高い範囲では圧縮強度50N/mm²を得ることが確認できた。

(3) 圧縮強度と単位容積質量の関係

図-10に、材齢1日加温養生時の圧縮強度と単位容積質量の関係を示す。

SFの種類に関わらず、単位容積質量が低下すると圧縮強度が低下している。これは、実験1と同様、SFとアルカリ溶液との反応で何らかの気体が発生し、供試体の膨張による圧縮強度の低下が生じたと考えられる。

現時点では、SFによるGPペーストの膨張の原因を明らかに出来ていないが、SFの粒子が超微細粒子(0.1~10μm)のために反応しやすい形態であること、金属シリコン、金属アルミ、炭素などの含有があればアルカリ溶液と反応し、水素ガスなどの気体が発生する可能性もあることなどが推察される。SF置換率が増加すると硬化反応前に大量の発泡が生じ、圧縮強度と単位容積質量の低下に結び付いたのではないかと考える。

4. まとめ

本実験では、フライアッシュ (FA)、高炉スラグ微粉末 (BS) およびシリカフェーム (SF) の粉体の比率がジオポリマー (GP) ペーストのフロー値および圧縮強度に与える影響を調べた。

また、SFの添加により膨張が確認されたため(実験1)、

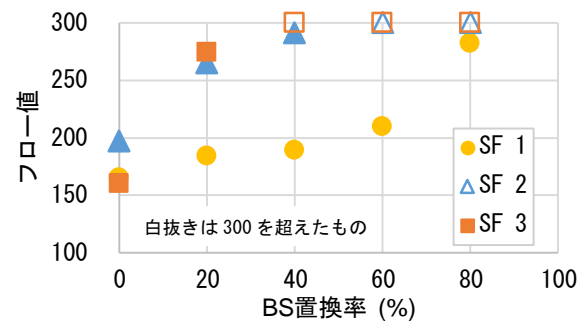


図-8 フロー試験結果 (実験2)

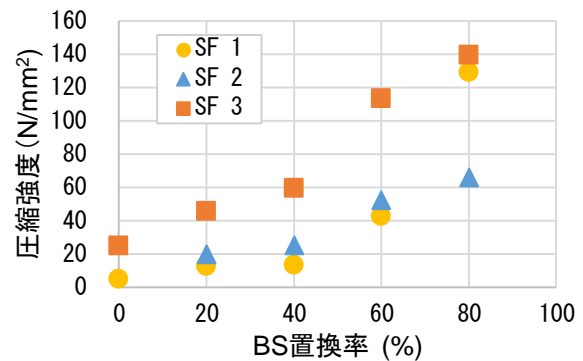


図-9 圧縮強度—BS置換率の関係
材齢1日 加温養生 (実験2)

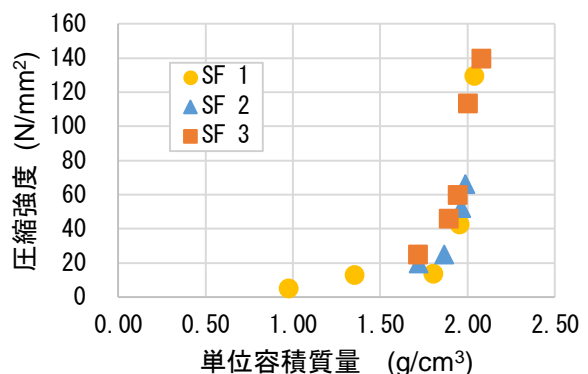


図-10 圧縮強度—単位容積質量の関係
材齢1日 加温養生 (実験2)

新たに異なる2種類のSFとBSの比率を変化させ、膨張の有無、フロー値と圧縮強度の確認を行った(実験2)。本実験のまとめを以下に示す。

- 1) シリカフェームの添加量を増やすと、比表面積が大きいため、GPペーストのフロー値が減少する傾向となる。
- 2) シリカフェームの添加量が増加すると、GPペーストが膨張する傾向となる。また、膨張に伴う単位容積質量の減少が生じ、圧縮強度が低下する。
- 3) 産地・起源(製造由来)の種類が異なるシリカフェームでも膨張が確認された。但し、種類によって、膨張量、流動性および圧縮強度が異なることが分かった。今後、異なる種類のシリカフェームについて、シリカフェームの粒径、pH、分散性、化学成分などの何が膨張

量に強く影響しているのかを調べる必要があると考える。

【謝辞】

本実験に際し、水野敏行氏（丸敏陶料所）、五百蔵沙耶氏（三重大学学部生）のご助力を得た。また本研究費の一部は科学研究費基盤研究(B)17H03291（研究代表者：一宮一夫・大分高専教授）によった。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書，2017
- 2) 飯坂武男，鷺見高典，梅原秀哲：無機系補修材料の注入性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.599/V-40，49-57，1998.8
- 3) 佐藤隆恒，大木信洋，東原実，上原元樹：石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.2023-2028，2013
- 4) 上原元樹：セメントを用いない低炭素型新材料であるジオポリマーの開発，鉄道総研月例発表会要旨，pp.1-4，2016
- 5) 合田寛基，原田耕司，津郷俊二，日比野誠：フライアッシュII種を用いたジオポリマーの材料特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1993-1998，2015
- 6) 川尻留奈，国枝稔，上田尚史，中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1943-1948，2011
- 7) 国枝実，李虎，上田尚史，中村光：ジオポリマーコンクリートおよびモルタルの曲げ破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1993-2004，2013
- 8) 一宮一夫，原田耕司，池田攻，津郷俊二：フライアッシュベースのジオポリマーの配合ならびに高温抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2230-2235，2014
- 9) 上原元樹，南浩輔，平田紘子，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1987-1992，2015
- 10) 東原実，大木信洋，上原元樹：短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの実用化に向けた基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1963-1968，2015
- 11) 佐藤隆恒，上原元樹，南浩輔，山崎淳司：ジオポリマー硬化体の種々の配合，作製法における生成物とpH等諸性質との関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2325-2330，2016
- 12) 佐藤隆恒，上原元樹，山崎淳司：低アルカリ/水比，高ケイ素/アルカリ比のケイ酸アルカリ溶液を使用したジオポリマー硬化体の諸性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.2035-2040，2017
- 13) 伊藤彰利，ポンマーハサイパラミ，前川明弘，畑中重光：シリカフェームを添加したフライアッシュベースのジオポリマーペーストに関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1875-1880，2018
- 14) 長滝重義，大即信明，久田真，水野和彦：シリカフェームの品質とその評価に関する研究，土木学会論文集，Vol.28，No.520，pp.87-98，1995.8
- 15) 松藤泰典：資源の有効利用とコンクリート/第6回シリカフェームを用いたコンクリート，コンクリート工学，Vol.34，No.5，pp.70-75，1996.5

論文 異なる比表面積の高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーの強度発現性および簡易注入試験に関する研究

五百蔵 沙耶*1・伊藤 彰利*2・畑中 重光*3

要旨: 本研究では、ジオポリマーは凝結時間が短く、耐候性および耐酸性などに優れるという点に着目して、ひび割れ注入材としての活用を目指す。本報では、比表面積が異なる高炉スラグ微粉末を3種類使用し、フロー値、凝結時間、圧縮強度を確認した。その後、塩ビ板による簡易注入試験を行った。その結果、比表面積が大きい程、圧縮強度は大きく、凝結時間は短くなることが確認された。注入試験の結果は、溶液粉体比が0.5の場合、ひび割れ幅0.2mmには5cm程度の注入深さだったが、溶液粉体比が0.7の場合、25cm以上注入可能となった。また、浸透速度は比表面積が大きい程早くなる傾向が見られた。

キーワード: ジオポリマー、ひび割れ注入材、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、比表面積

1. はじめに

コンクリート構造体にひび割れが発生すると、美観・外観を損なうだけでなく、雨水の浸透などの影響で、構造物自体の耐荷力・耐久性低下の原因となる¹⁾。ひび割れ注入工法には、エポキシ樹脂やアルリル樹脂等の有機系材料と、ポリマー系の無機系材料が使用されている。一般的に使用されるエポキシ樹脂は、付着やひび割れ追従性能が優れている。しかし、紫外線抵抗性、耐火性に劣り、施工時の湿潤面での接着不良が生じやすく、引張強度、熱膨張係数および弾性係数などがコンクリートとは同等ではないため、補修部と既存部の相違が生じるなどの問題がある。ポリマーセメント系の場合は、セメントの水和生成物としてのCa(OH)₂結晶やC-S-Hゲルが存在し、耐酸性や耐火性などが劣ることなどが挙げられる²⁾。

ジオポリマー(以下、GPと記す)は、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などのアルミナシリカ粉末と、珪酸ナトリウム水溶液(水ガラス)や水酸化ナトリウム水溶液などのアルカリシリカ溶液との縮重合反応によって得られる無機系材料である。GPはセメントを使用せず、産業廃棄物・副産物を主原料としているので、近年、環境配慮型の新建築材料として注目されている。さらにGPは凝結時間が短く、既存コンクリートおよび鉄筋との接着が良い、耐酸性、耐熱性、塩分浸透抵抗性が極めて優れているという特徴がある。したがって、GPには、これまでセメントコンクリートが適用できなかった環境下での利用が期待されている³⁾。

本研究では、GPのひび割れ注入材として利用することを目標とし、本実験では、粒子の細かさに着目し、異なる比表面積の高炉スラグ微粉末(4000, 6000, 8000)を

使用した場合のフロー値、凝結時間、圧縮強度を測定した。また、簡易的にひび割れ注入性能を調べるため、塩ビ板で0.2mm幅の擬似的ひび割れ試験体を作成し、GPの注入実験を行い、GPのひび割れ注入性能を確認した。

2. 実験概要

本実験では、文献⁴⁾⁵⁾をもとに溶液の種類、溶液粉体比(以下、W/Pと記す)を選択し、フライアッシュが粉体に占める割合(以下、FA置換率と記す)、高炉スラグ微粉末(以下、BSと記す)の比表面積を変えた場合のフロー値、圧縮強度、凝結時間について実験を行い、その後に注入実験を行う。

2.1 要因と水準

表1に、実験の要因と水準を示す。W/P=0.5とし、FA置換率を100, 80, 60%の3水準、BSの比表面積を4000, 6000, 8000の3水準設けた。注入試験は、FA置換率60%の場合のみ、W/P=0.7についても行った。

2.2 使用材料および調査

表2に、実験の使用材料を示す。活性フィラーとして、フライアッシュJIS I種(以下、FAと記す)、3種類

表1 要因と水準

粉体比 FA : BS (%)		BS 比表面積	溶液粉体比 W/P	溶液比 WG2 : NH
FA100	BS0		0.5	2:1
FA80	BS20	4000		
		6000		
		8000		
FA60	BS40	4000	0.5 0.7*1	
		6000		
		8000		

*1: 注入試験のみ

*1 三重大学工学部建築学科 大学生 (学生会員)

*2 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*3 三重大学大学院工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

表-2 使用材料

	記号	材料名	比表面積 (cm ² /g)
粉体 (P)	FA	フライアッシュ (JIS I種)	5000 以上
		BS	高炉スラグ微粉末 4000 級
	6000 級		6100
	8000 級		8000
溶液 (W)	WG2	水ガラス 2号 原液	
	NH	水酸化ナトリウム水溶液 (10mol/L)	

の BS ブレーン 4000 級, 6000 級および 8000 級 (以下, それぞれ 4000, 6000, 8000 と記す) を使用した。使用した活性フィルターの粒度分布を 図-1 に示す。使用溶液として, 水ガラス 2 号の原液 (以下, WG2 と記す) および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液 (以下, NH と記す) を使用した。粒度分布の図から, ピークの値が一番細かい粉体は FA ということが分かる。

表-3 に W/P=0.5 の場合, 表-4 に W/P=0.7 の場合に使用したジオポリマーの調合表を示す。溶液は, WG2: NH=2:1 となるように混合した。

2.3 試験項目および試験方法

溶液を入れる前に粉体を予め空練りし, 溶液を投入し, 60 秒間練り混ぜた。その後 30 秒間掻き落としを行い, さらに 120 秒間練り混ぜた。溶液は 2 種類を予め混合した状態で粉体に投入した。

(1) フロー試験

JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」のモルタルフロー試験に準拠して測定した。

(2) 凝結時間試験

JIS A 1147 「コンクリートの凝結時間試験方法に準拠したプロクター貫入抵抗試験」に基づき測定した。プロクター貫入抵抗試験の貫入針は, 断面積が 25mm² のものを使用し, 試験容器は, φ160×160mm の円筒容器を使用した。ここでは, 凝結の始発時間はコンクリートと同様, 貫入抵抗値が 3.5N/mm² の時点, 終結時間は, 同値が 28N/mm² の時点とした。

(3) 圧縮強度試験

硬化後の供試体に対して, 材齢 1, 7, 28 日における圧縮強度試験を行った。材齢 1 日は 60℃ で 27 時間の加温養生とし, 材齢 7, 28 日は 20℃, 60%RH の環境で養生を行った。供試体は φ50×100mm の円柱供試体に各調合 9 本ずつ打ち込んだ。

(4) 注入試験

図-2 に試験体の寸法を, 図-3 に試験体断面図を, 実際の試験体を 写真-1 に示す。既往の研究⁹⁾を参考に

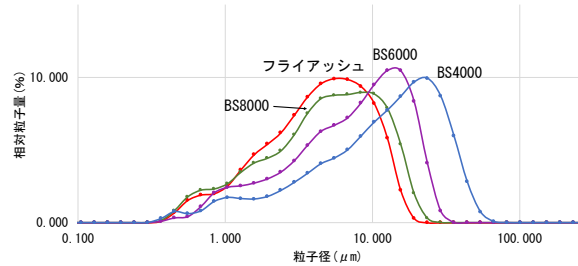


図-1 粒度分布

表-3 調合表 (W/P=0.5)

記号 (粉体比)	単位量 [g/L]						W/P
	FA	BS	WG2	NH	P	W	
FA100	1265.8	0.0	421.9	211.0	1265.8	632.9	0.5
FA80BS20	1036.7	259.2	432.0	216.0	1295.9	648.0	
FA60BS40	796.5	531.0	442.5	221.3	1327.5	663.8	

表-4 調合表 (W/P=0.7)

記号 (粉体比)	単位量 [g/L]						W/P
	FA	BS	NH	WG2	P	W	
FA60BS40	670.7	447.1	260.8	521.6	1117.8	782.5	0.7

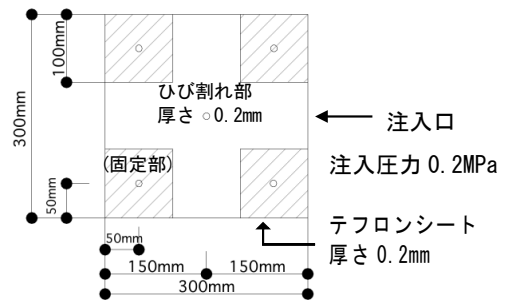


図-2 塩ビ板試験体寸法

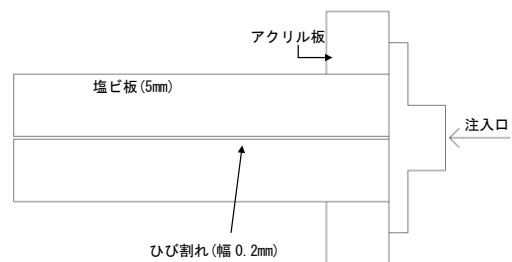


図-3 試験体断面図

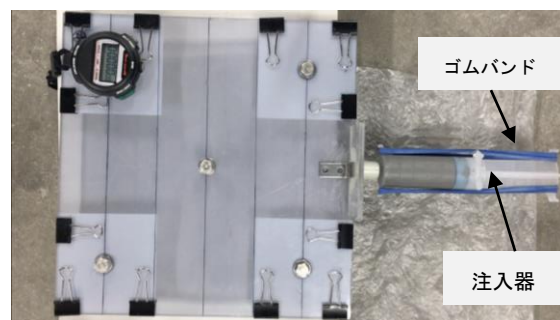


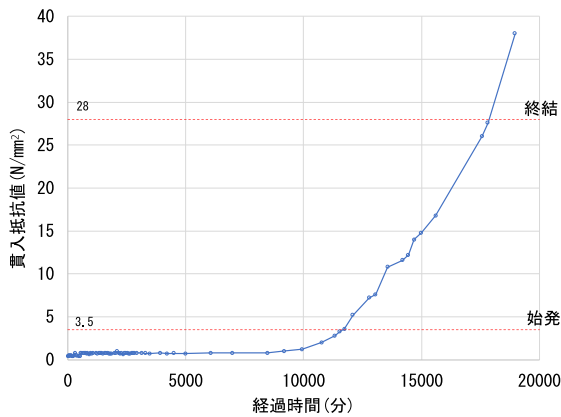
写真-1 ひび割れ注入の試験体 (上面)

し、簡易的なひび割れ幅を作成した。作成方法は、塩ビ板(厚さ 5mm)の間に設定ひび割れ幅である 0.2mm のテフロンシートを挟み、ボルトでしっかりと締める。その後、12個のクリップを周囲に止めた後、スケールルーペで注入口の幅を測定し、所定の幅となっているかを確認する。確認後、シーリングをし、翌日注入試験を行った。ゴムで圧力を加え、注入圧力は 0.2MPa とした。測定項目は、所定のひび割れ幅への注入の可否と 5cm ごとの到達時間を調べた。本実験では、ひび割れ注入工法は、幅 0.2~1.0mm の範囲で適用されることから、ひび割れ幅を 0.2mm に設定し、実験を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 フロー値

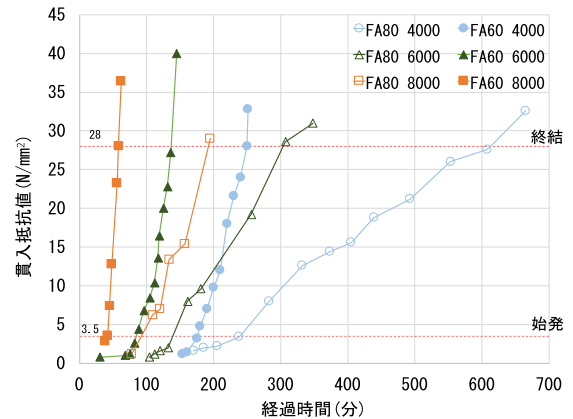
BS が粉体に占める割合(以下、BS 置換率と記す)とフロー試験結果の関係を図一 4 に示す。この結果から、比表面積が大きいほど、フロー値は減少する傾向が見られる。また、比表面積が同じで、BS 置換率が 20~40%までの場合、BS 置換率のフロー値への影響はほとんど見られなかった。BS を使用した場合、粒度分布のピークとなる粒子が細かいほど、フロー値は小さくなっていることから、フロー値は粒子の細かさに依存していることが確認できた。



図一 4 BS 置換率とフロー値の関係

表一 5 プロクター貫入抵抗試験結果

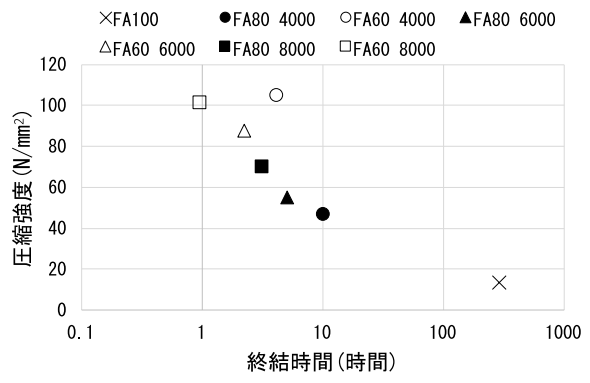
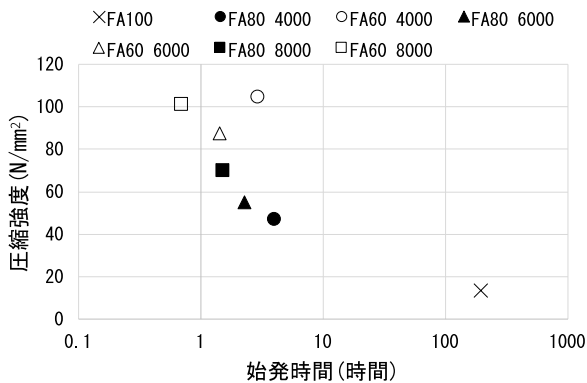
	FA100	FA80			FA60		
		BS4000	BS6000	BS8000	BS4000	BS6000	BS8000
始発時間	194 時間	239 分	137 分	92 分	176 分	85 分	42 分
終結時間	294 時間	613 分	304 分	192 分	250 分	134 分	58 分



(a) FA100%

(b) FA 置換率および比表面積による影

図一 5 貫入抵抗値の時刻歴



(a) 始発

(b) 終結

図一 6 圧縮強度と凝結時間の関係

に FA100% の場合、(b) に FA 置換率、比表面積を変えた場合の貫入抵抗値の時刻歴を表す。凝結時間は BS 置換率が大きいほど、比表面積が大きいほど短くなっている。始発後の抵抗値の変化量は、BS 置換率が大きいほど大きく、急激に抵抗値が増している。一方、同じ BS 置換率では、比表面積の影響は、BS 置換率が 40% の場合よりも 20% の場合の方が顕著である。圧縮強度と始発・終結時間の関係は、反比例の関係にあり、かなり強い相関性が確認され、既往の研究⁴⁾と同様の傾向が見られた。

3.3 圧縮強度

図-7 に圧縮強度の試験結果を示す。FA80BS20 の比率の場合、比表面積が大きくなるにつれて圧縮強度も大きくなり、線形の関係となっている。しかし、FA60BS40 の比率の場合、比表面積の影響は見られない。この結果は圧縮強度において、BS 置換率が小さいほど比表面積の影響を強く受けるという報告⁹⁾と同様の傾向である。また、BS 置換率が大きくなるとともに、圧縮強度も大きくなることが確認された。

3.4 注入試験

(1) W/P=0.5 の場合

FA 置換率、比表面積を変え、W/P=0.5 で一定とした。写真-2 に注入の様子を、表-6 に注入深さを示す。この結果より、本実験で用いた GP は、0.2mm のひび割れ幅に入るが 5cm 程度までしか入らないことが分かった。表-6 の×印は、5cm まで注入できなかったものを表す。注入深さが少なかった原因として、粘性が高かったこと、可使時間が短かったことが考えられる。

(2) W/P=0.7 の場合

W/P=0.5 では、粘性が高く注入深さが低い可能性があるため、粘性を下げる手法として溶液量を増やすことを考えた。既往の研究²⁾より、FA60BS40 の比率、WG2 : NH=2 : 1、W/P=0.75 の調合で 30N/mm² 以上であることが報告されている。さらに別の研究⁷⁾では、W/P を増加させると、圧縮強度が低くなる傾向があるが、FA 置換率が 50% 程度のとき、W/P の増加に伴う圧縮強度の低下量は比較的小さいという結果が示されている。そこで FA 置換率 60%、W/P=0.7 とし、注入試験を行った。表-7 に W/P=0.7 で行った注入試験結果を、写真-3 に注入実験の様子を示す。BS の比表面積に関わらず全調合において 25cm 以上注入可能であった。W/P=0.5 を W/P=0.7 に変更し、溶液量が増えたことで粘性が低下し、より深くまで注入できたと考えられる。

到達時間と注入深さの関係を図-8 に示す。この結果より、注入完了までの浸透速度は、比表面積が大きいほど早いということが確認された。また、浸透速度は、最初の 5cm の深さまではあまり差はないが、注入深さが深くなるにつれて比表面積が小さい方が、遅くなる傾向が

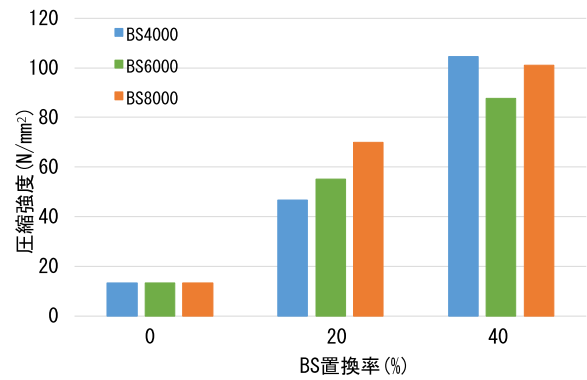


図-7 圧縮強度試験結果

表-6 注入深さの試験結果 (W/P=0.5)

	FA100	FA80BS20			FA60BS40		
		BS4000	BS6000	BS8000	BS4000	BS6000	BS8000
注入深さ	5cm	5cm	×	5cm	5cm	10cm	5cm

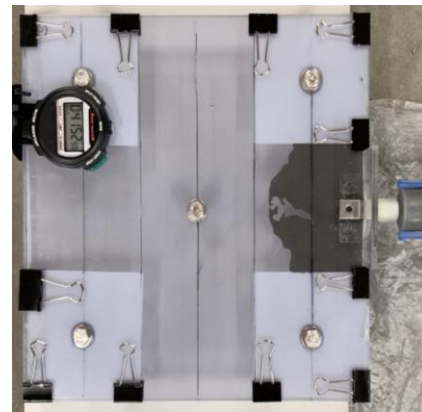


写真-2 注入試験状況
FA80BS20 4000 (W/P=0.5)

表-7 注入深さの試験結果 (W/P=0.7)

	FA60BS40		
	BS4000	BS6000	BS8000
注入深さ	30cm	30cm	30cm

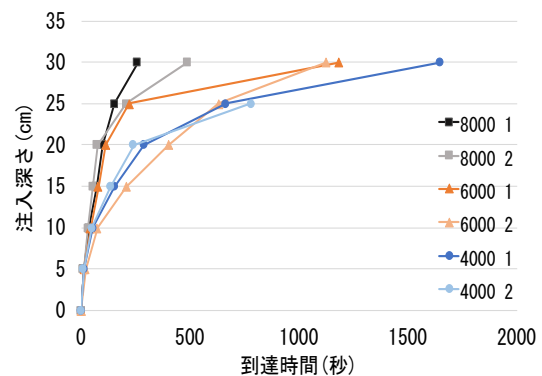


図-8 注入深さと到達時間の関係

見られた。

(3) 注入試験まとめ

今回は、W/Pを変化させて注入実験を行った。この2つの実験から、粘性は平滑な面での注入の可否に影響する1つの要因であることが確認できた。ひび割れ幅0.2mmの場合、W/Pを大きくすることで、注入可能となり、注入深さも深くなることから、粘性が低い方が注入性状に優れるといえる。W/P=0.7で同じFA置換率ならば、注入深さは変わらなかったが、浸透速度については、比表面積が小さい方が遅くなる傾向が見られた。

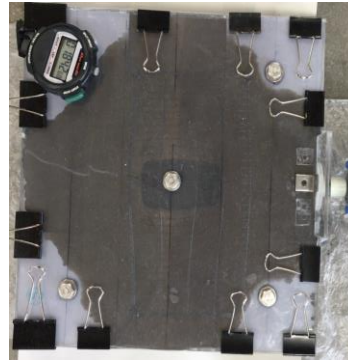


写真-3 注入実験状況
FA60BS40 4000 (W/P=0.7)

4. まとめ

本研究では、ジオポリマーの粉体としてフライアッシュ(JIS I種)および異なる比表面積の高炉スラグ微粉末(4000, 6000, 8000級)を、溶液として水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液の混合溶液を用いたジオポリマーペーストについて、それらのフロー値、凝結特性、圧縮強度、注入性能について調べた。得られた知見をまとめると以下ようになる。

(1)BSの比表面積が大きくなるほど、粘性が高くなり、フロー値は減少する。しかし、BSの比表面積が同一の場合、FA置換率20~40%の範囲では影響はほとんど見られず、同程度のフロー値となった。

(2)BSの比表面積が大きく、BS置換率が大きいほど、凝結時間は短くなり、圧縮強度は大きくなる傾向がある。また、始発してからの貫入抵抗値の変化量はBS置換率が小さいほど、BSの比表面積の影響を大きく受けることが分かった。

(3)簡易的なひび割れ注入試験の結果、W/P=0.5では、5cm程度の注入深さであったが、W/P=0.7では25cm以上の深さまで注入が可能であった。W/P=0.5をW/P=0.7に溶液量を増やすことで、粘性が低下したことが主な理由といえる。

(4)W/P=0.7の場合、全ての調合でひび割れ深さ30cmまで到達した。注入深さ5cmまでは浸透速度に差はほとんどないが、それ以降は、BSの比表面積が大きいほど浸透が早く進む傾向となった。

なお、注入試験において今回は溶液粉体比W/Pのみを変化させて行った。今後は、溶液の種類および溶液の比率の影響についても検討していく必要がある。

【謝辞】

本研究に際し、ボンマーハサイパラミ氏(三重大学大学院生)のご助力を得た。また、本研究費の一部は科学

研究費基盤研究(B)17H03291(研究代表者:一宮一夫先生・大分高専教授)によった。付記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 佐藤晋也, 臼杵匠, 伊代田岳史: 簡易的なひび割れ注入工法に用いる各種注入材料の補修効果の検討, 第40回土木学会関東支部技術研究発表会, 第V部門
- 2) 北田達也, 李柱国: コンクリートのジオポリマー系ひび割れ補修材に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2059-2064, 2017
- 3) 日本コンクリート工学会: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017
- 4) 市川敬悟, 三島直生, 前川明弘, 畑中重光: ジオポリマーペーストの凝結特性および圧縮強度発現性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1957-1962, 2015
- 5) 三島直生, 前川明弘, 畑中重光: ジオポリマーの圧縮強度に関する基礎的研究(その2: 水ガラス/粉体比, 粉体の混合使用, および養生条件の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.1385-1386, 2013.8
- 6) 原田耕司, 合田寛基, 一宮一夫, 日比野誠: ジオポリマーの高炉スラグの影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2236-2241, 2014
- 7) 市川敬悟, 三島直生, 前川明弘, 畑中重光, 犬飼利嗣: ジオポリマーペーストのフロー値および圧縮強度発現性に関する基礎的研究, 日本建築学会東海支部研究報告書, No.54, pp.89-92, 2016.2

論文 骨材量を変化させたジオポリマー硬化体の圧縮特性に関する基礎的研究

ボンマハーサイ パラミ*1・伊藤彰利*1・畑中重光*2

要旨：環境に優しく、建設材料としてセメントの代替が期待できるジオポリマーは、同一強度のセメント硬化体よりヤング係数が50%–80%低いことが報告されている。本研究では高炉スラグ微粉末の置換率と骨材量を変化させたジオポリマーの圧縮特性を実験的に調べた。また、複合則理論によりジオポリマーのヤング係数を評価した。その結果、高炉スラグ微粉末が大きいほど圧縮強度とともにヤング係数が増加すること、骨材量が増加するほど圧縮強度が低下し、ヤング係数が増加することが確認された。また、複合則によるジオポリマーのヤング係数の評価は過大となり、高炉スラグ微粉末の置換がある場合は精度よく概ね推定できる。

キーワード：ジオポリマー、複合則理論、ヤング係数、圧縮試験、骨材含有率

1. はじめに

コンクリートは、世界中に多用される建設材料の一つである。一般的にコンクリートで使用される結合材は普通ポルトランドセメントであるが、その製造工程において地球温暖化の一因とされるCO₂ガスを大量に排出することが問題視されている。その解決方法の一つとして、セメント使用量を削減するため、その代替としてフライアッシュや高炉スラグなどの産業副産物を有効に利用していくことが考えられる。

そこで、1988年にJoseph Davidovitsに提唱されたジオポリマー(GP)は、環境に優しい材料として様々な研究者から注目を集めた。GPとは、セメントクリンカを使用せず、産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末などに多く含まれているアルミナシリカ粉末とアルカリ水溶液との反応によって得られる非晶質の縮重合体(ポリマー)である。

既往の研究¹⁾によると、GPは価格がセメントの2倍程になるが、普通コンクリートと同等なレベルまで強度発現が可能で、凝結時間や養生時間が短く、コンクリートおよび鉄筋との付着性がよく、また耐火性や耐酸性が優れるなどの特徴があるといえる。GPに関しては、まだ基礎的な品質や建設用材料としての性質・性能を解明にする段階にあるが、土木分野および建築分野における構造物への利用が期待できる。

しかし、GPの場合、同一強度のセメント硬化体に比べヤング係数が低くなることが多く報告されている²⁾。南ら³⁾はGPコンクリートの圧縮強度と静弾性係数との間には相関性が認められ、一般的なセメント系材料を用いた硬化体と同様に、圧縮強度を指標とした指数関数で表すことができると報告している。

通常、セメントコンクリートのヤング係数の評価方法としては、骨材および混和剤による係数、単位容積質量および圧縮強度をパラメータとした建築学会式と、セメントペーストと骨材のヤング係数とそれらの構成比を用いて算出する複合理論による推定方法があるが、後者の複合理論により推定する方が精度よく評価できるという。

そこで、本研究では、活性フィラーの一部として高炉スラグ微粉末の置換率と骨材含有率を変化させたGP硬化体の圧縮特性を実験的に調べ、複合理論によりヤング係数の検討を行った。

表-1 使用材料

種別	材料名	密度 (g/cm ³)
粉体	普通ポルトランドセメント	3.15
	フライアッシュII種 (JIS A 6201)	2.29
	高炉スラグ微粉末4000 (JIS A 6206)	2.91
アルカリ溶液	水ガラス2号 原液	1.45
	水酸化ナトリウム水溶液(10mol/L)	1.35
細骨材	三重県町屋川産川砂 (吸水率 2.15%)	2.59
粗骨材	三重県志摩産5号碎石 (吸水率 0.93%)	2.66
	三重県志摩産6号碎石 (吸水率 1.29%)	2.66

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 工博 (正会員)

表-3 実験の要因と水準

種別		要因	水準
モルタル	GP	V_{BS} (%)	0, 10, 20
	セメント	V_s (%)	0 (ペースト), 10, 20, 30, 40, 50, 60
コンクリート	GP	V_{BS} (%)	0, 10, 20
	セメント	V_g (%)	0 ($V_s=50\%$ のモルタル), 10, 20, 30, 40, 50

V_{BS} : 活性フィラー粉体の全容積に対する高炉スラグ微粉末の置換率, V_s : 細骨材の体積割合, V_g : 粗骨材の体積割合

表-2 活性フィラーの化学組成 (質量%)

	FA	BS
Al_2O_3	23.64	14.94
SiO_2	60.49	34.04
CaO	2.90	42.72
Fe_2O_3	4.68	0.35
K_2O	1.21	0.26
MgO	0.53	5.81
Na_2O	0.49	0.26
Ig. loss	3.05	0.00
合計	96.99	98.38

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合

表-1 に使用材料を、表-2 に蛍光 X 線分析 (XRF) による粉体の化学成分比を示す。

GP の粉体としては、一般に多く用いられている 4000 ブレーンの高炉スラグ微粉末 (以下, BS) およびフライアッシュ JIS II 種 (以下, FA) を使用した。使用溶液としては、水ガラス 2 号 (以下, WG2) および 10mol/L の水酸化ナトリウム水溶液 (以下, NH) を使用した。比較用のセメント硬化体の粉体には、普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材は三重県町屋川産川砂を使用し、粗骨材には三重県志摩産砕石 5 号と 6 号を質量比 1 : 1 で混合させたものを使用した。

セメント硬化体の調合は、水セメント比を 0.5 とし、細骨材および粗骨材の体積割合を変更させることで、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの供試体を作製した。モルタルの場合は、細骨材の体積割合 (モルタル全容積に対する細骨材の割合) を 0% (ペースト) から 60%まで 10%ずつ増加させ 7 種類のモルタル供試体を作製した。コンクリートの場合は、粗骨材の体積割合を 0% (細骨材率 50%のモルタル) から 50%まで 10%ずつ増加させて 5 種類のコンクリートの供試体を作製した。

GP の調合は、溶液と粉体の質量比を 0.5 とし、アルカリ溶液は、質量比で WG2:NH=2:1 となるように混合したものを使用した。フライアッシュのみを用いた GP は、凝結時間が遅く初期強度発現性に劣り、実用的な強度発現性を得るには加温養生が必要とされている。したがって、常温硬化型の GP とするために、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用する検討例が比較的多い。市川ら³⁾によれば、高炉スラグ微粉末の添加量を大きくすると圧縮強度が比較的増加する傾向がある。そのため、本実験では粉

体の一部として高炉スラグ微粉末の添加による影響も調べ、粉体の容積に対する添加の割合 (置換率) を 0%, 10%, 20%の 3 水準とした。GP 硬化体は、セメントと同様に、ペースト、モルタルおよびコンクリートの 3 種類作製し、細骨材および粗骨材の体積割合はセメントと同様である。

2.2 供試体の作製方法

ジオポリマーを作製する際に用いた溶液は前日に WG2 と NH を質量比で 2:1 となるように混ぜ、20°C, 60% RH の養生室で保管したものとした。

セメントおよびジオポリマーペーストの練り混ぜには、ハンドミキサーを用いた。練り混ぜ方法としては、特にジオポリマーの場合は、最初にハンドスコップで粉体のみを空練りした後、溶液を追加し、モルタル用ハンドミキサーを用い 60 秒間練り混ぜ、30 秒間掻き落とした後、再び 120 秒間練り混ぜた。硬化前のフレッシュ性状を確認するために、JIS R5201「セメントの物理試験方法」に基づいてフロー試験を行った。その後、φ 50×100mm の円柱供試体型枠に打ち込んだ。打込み後、型枠上面をビニルシートで覆い、輪ゴムで留め、材齢 28 日まで 20°C, 60%RH の環境で養生を行った。

モルタルおよびコンクリートの練り混ぜには、揺動攪拌型ミキサーを用いた。練り混ぜ方法は、粗骨材、細骨材、セメントあるいはフライアッシュと高炉スラグ微粉末を事前に混ぜた粉体の順に投入し、30 秒間空練りをした。水あるいは溶液を追加し 1 分間練り混ぜた後、掻き落としを行い、再度高速で 2 分間の練り混ぜを行った。打ち込む前にスランプと空気量の試験を実施した。供試体は、モルタルの場合は φ 50×100mm の円柱供試体、コンクリートの場合は φ 100×200mm の円柱供試体とした。養生方法としては、材齢 28 日まで 20°C, 60%RH の環境で型枠内封かん養生とした。

所定材齢に達して脱型した供試体に対して、コンクリート研磨機を用いて平滑な端面を整えた。

2.3 実験方法

各調査につき3本ずつの供試体を用いて圧縮強度試験を行った。また、ヤング係数の測定に関しては、圧縮試験時にコンクリートの場合はコンプレッソメータを、ペーストおよびモルタルの場合はワイヤストレインゲージを用いてひずみの測定を行い、圧縮応力-ひずみ曲線を求め、JIS A1149 に準拠して行った。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

図-1 にモルタルの圧縮試験結果を圧縮強度と細骨材含有率の関係で示す。セメントの場合は、細骨材の体積割合 0%のペーストの圧縮強度が最も大きく、細骨材の体積割合を20%まで増加させるにつれて圧縮強度がわずかに減少するが、20%と50%の間ではほぼ等しい結果となるものの、細骨材の体積割合が50%を超えると圧縮強度が大きく低下した。これは、細骨材量が多くなるほどモルタルの充填が不十分になり、初期から欠陥が生成したためと考えられ、川上らの過去の実験結果と同様な傾向にあることが確認された。

GP の場合、特に高炉スラグ微粉末を添加したものは、細骨材の体積割合を0%から10%に増加させたとき、セメントの場合と異なり、圧縮強度の増加がみられた。このことに関しては、セメントの場合はGPよりペーストと細骨材の間の付着が劣り、載荷とともに早い段階からその界面部分が破壊していくと推測し、検討する必要があると考えている。また、高炉スラグ微粉末置換率0%と10%のとき、細骨材の体積割合を大きくするにつれて圧縮強度が低下したのに対し、高炉スラグ微粉末置換率20%では細骨材を40%まで増加させても圧縮強度に大きな減少が見られずほぼ同等であるが、細骨材の体積割合が40%を超えると圧縮強度の低下が確認された。

図-2 にコンクリートの圧縮強度-粗骨材の体積割合の関係を示す。セメントコンクリートは、粗骨材量を10%増加させた際は圧縮強度の増加が見られたが、添加率が10%を超えるとモルタルと粗骨材の間の弱い層により圧縮強度が低下していった。過去の研究には、粗骨材量と圧縮強度の間にはほぼ直線的な関係が認められると報告されている。本実験の結果においても同様な傾向が確認された。

しかし、GP の場合、粗骨材体積割合10%においてはセメントの場合と同様に圧縮強度の増加が確認でき、粗骨材含有率の増加に従い圧縮強度の低下が見られたが、その低下の程度はセメントの場合ほど大きくない。この

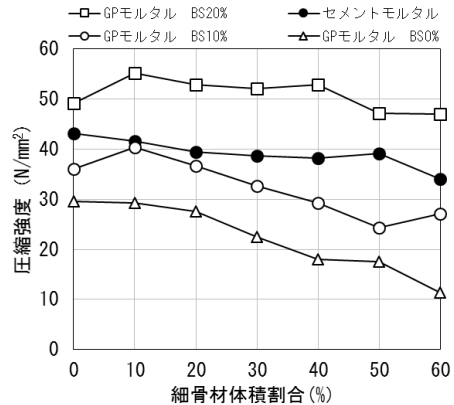


図-1 モルタルの圧縮強度-細骨材量

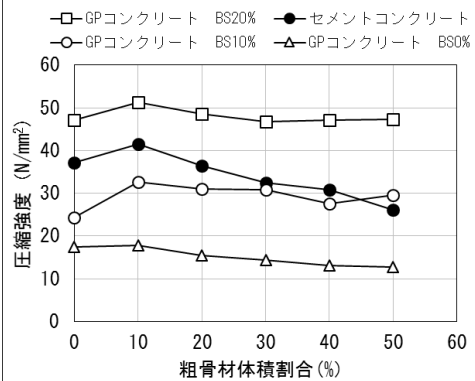


図-2 コンクリートの圧縮強度-粗骨材量

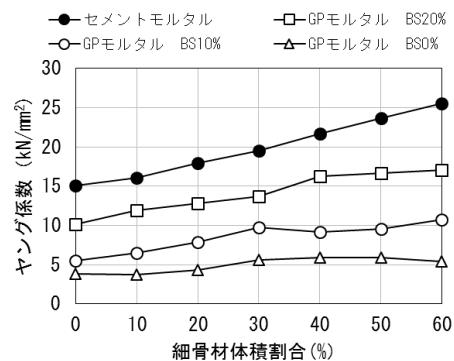


図-3 モルタルのヤング係数-細骨材量

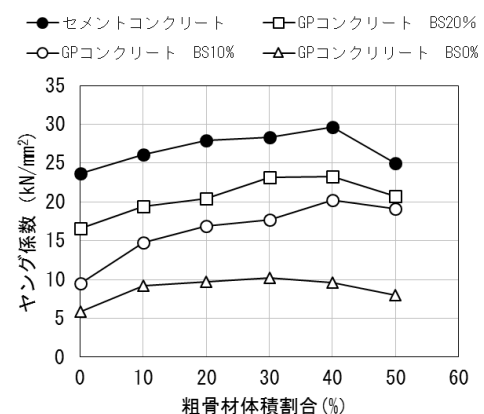


図-4 コンクリートのヤング係数-粗骨材量

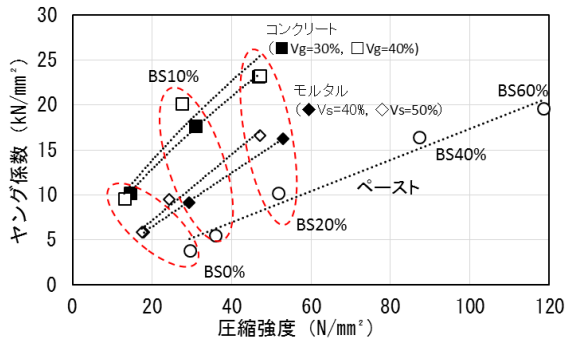


図-5 ヤング係数－圧縮強度の関係

ことは GP の場合、モルタルと粗骨材の間の付着がセメントよりも優れているのではないかと考え、今後の検討に取り組んでいきたい。

3.2 ヤング係数

図-3 にモルタルのヤング係数－細骨材量の関係を、図-4 にコンクリートのヤング係数－粗骨材量の関係を示す。

図-3 よりセメントモルタルは細骨材体積割合を 60% まで増加するにつれてヤング係数はほぼ直線的に増加している。また、GP モルタルの場合も細骨材量の増加とともにヤング係数の増加がみられ、その増加程度は高炉スラグ微粉末の置換率が大きいほど大きくなる。しかし、細骨材体積割合が 40% を超えるとモルタルの充填不良により GP のヤング係数の低下が見られた。

図-4 よりコンクリートもモルタルと同様に、セメント、GP とともに粗骨材量の増加に伴いヤング係数は増加するが、高炉スラグ微粉末無添加の GP コンクリートの場合だけはその増加程度が極わずかである。また、セメント、GP とともに細骨材体積割合が 40% を超えるとヤング係数が低下した。

図-5 に GP 硬化体の一例のヤング係数－圧縮強度の関係を示す。同図には、過去の実験データである GP ペーストの結果を併示する。ペーストの場合においては、高炉スラグ微粉末の置換率が増加するほど、圧縮強度、ヤング係数ともにほぼ直線的に増加し、圧縮強度とヤング係数の間に直線的な関係が認められる。一方で、本実験の結果より骨材を含有するモルタルおよびコンクリートの場合は、セメント硬化体と同様に圧縮強度とヤング係数の両者の関係は線形ではなく指数関数による相関がある。

3.3 複合理論によるヤング係数の検討

コンクリートのような複合材料の弾性係数を評価するために、複合則理論に基づいていくつかの複合モデルが提案されてきた。

本研究では、そのなかの簡易的な直列と並列モデルおよび最も精緻とされる Hashin-Hansen モデルを用いて検

表-3 複合則モデル

モデル	計算式
並列	$E_c = V_g E_g + V_m E_m$
直列	$E_c = \frac{1}{\left(\frac{V_g}{E_g} + \frac{V_m}{E_m}\right)}$
Hashin-Hansen	$E_c = E_m \times \frac{[V_m E_m + (1+V_g)E_g]}{[(1+V_g)E_m + V_m E_g]}$
ここで、 $E_c, E_m (E_p), E_g (E_s)$: コンクリート, モルタル (ペースト), 粗骨材 (細骨材) のヤング係数 $V_m (V_p), V_g (V_s)$: モルタル (ペースト), 粗骨材 (細骨材) の体積割合	

討を行った。各モデルの計算式は表-3 に示す。

ここで、モルタルの場合はペーストと細骨材の 2 相複合体として、コンクリートの場合は細骨材含有率 50% のモルタルと粗骨材の 2 相複合体として取り扱うこととする。

ペーストのヤング係数は、清原ら⁴⁾の推定式(式(1))により求めた。また、GP ペーストは過去の実験データからアルカリ溶液粉体比が 0.5 のときに GP ペーストのヤング係数と高炉スラグ微粉末の置換率の間に相関が認められ、式(2)のように表すことができ、今回の GP ペーストのヤング係数はこの式により求めることとした。

$$E_p = a + b \log(C/W) \quad (1)$$

ここに、 E_p はセメントペーストのヤング係数 (kN/mm²)

$$a = -3700 + 4200 \log(t)$$

$$b = 39500 - 2276 \log(t)$$

t は供試体の材齢(日)

C/W はセメント水比

$$E_p = 243.2 V_{BS} + 4483.6 \quad (2)$$

ここに、 E_p は GP ペーストのヤング係数 (kN/mm²)

V_{BS} は高炉スラグ微粉末の置換率 (%)

また、コンクリートのモルタル母材のヤング係数は式(2)あるいは式(3)により求められたペーストのヤング係数と後述する式(4)により求められた細骨材のヤング係数を Hashin-Hansen モデル式に代入して算出した値を用いた。

細骨材および粗骨材のヤング係数は、直接に求めることは困難であるため、今回は既往の研究により骨材のヤ

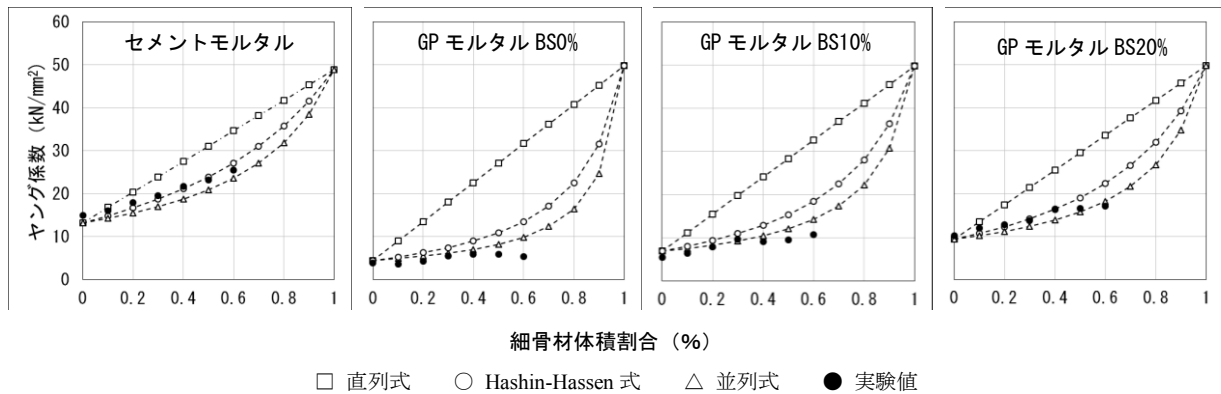


図-6 複合則理論により推定したモルタルのヤング係数の結果

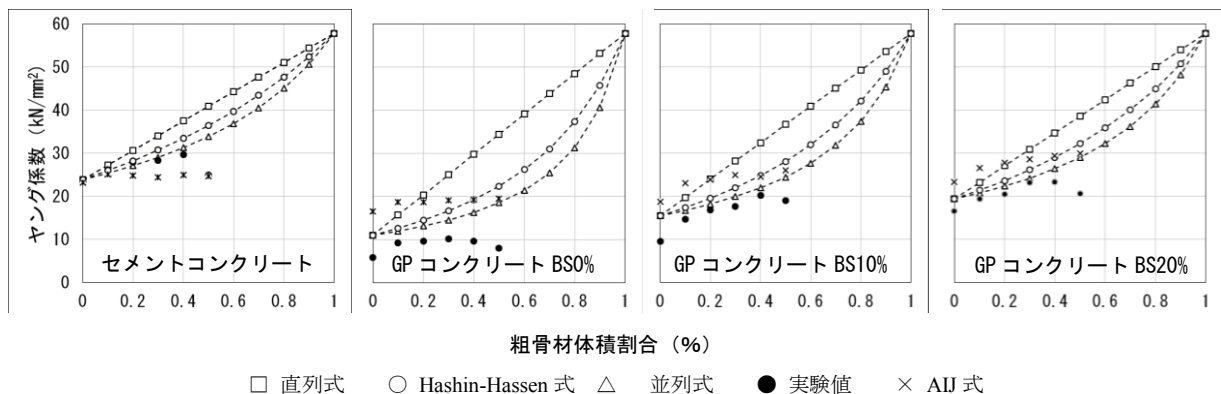


図-7 複合則理論により推定したコンクリートのヤング係数の結果

$$E_a = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \quad (3)$$

ここで、 E_a : 骨材のヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm²)

μ : 吸水率 (%)

$$E_g = V_{g1} E_{g1} + V_{g2} E_{g2} \quad (4)$$

ここで、 E_{g1} , E_{g2} : 5号, 6号砕石のヤング係数

V_{g1} , V_{g2} : 5号, 6号砕石の体積割合

ヤング係数と吸水率の間に相関性が認められることから、清原らが骨材の吸水率をパラメータとして提案した実験式(式(3))を用いて求めることとした。細骨材のヤング係数 E_s が 4.98 kN/mm^2 となった。粗骨材に関しては、今回の実験では5号と6号砕石の2種類を1:1で用いたため、最初にはそれぞれの吸水率を使ってそれぞれの砕石のヤング係数を求めた。次に、式(4)に示すように、5号および6号砕石のヤング係数にコンクリート中の両者の絶対容積比を乗じて粗骨材のヤング係数 ($E_g = 5.78 \text{ kN/mm}^2$) を求めた。

複合理論による計算結果は、モルタルは図-6に、コンクリートは図-7に示す。図-7には、建築学会式により算出したコンクリートのヤング係数も示す。

セメントモルタルのヤング係数の推定結果は、ほぼ実験結果と一致し精度よく推定している。一方で、GPモルタルの場合は、概ね推定することが可能であるが、実験値に比べ計算値のほうが大きく、その差は高炉スラグ微

粉末の添加率が大きいほど小さくなる。酸化カルシウム成分を大量に持つ高炉スラグ微粉末の添加によってGP硬化体がより密実になるためであると考えられる。また、細骨材量の増加につれ、特に体積割合が40%を超えると実験値と計算値が大きく異なる。この現象は骨材量の増加に伴いペーストと骨材との界面に生じるマイクロクラックや遷移帯に起因するものと考えられる。

コンクリートのヤング係数の推定結果においても、セメント、GPともに計算値が実験値より大きく、その差は粗骨材量が多いほど大きくなる。また、高炉スラグ微粉末の添加率が大きいほど精度よく推定することができる。これらの現象に関しては、モルタルの場合と同様であると考えている。したがって、セメントモルタルあるいはコンクリートの過去の研究のように、GPのヤング係数を精度よく推定するためには、セメントペーストと細骨材あるいはモルタル母材と粗骨材の境界面による影響や骨材を混入させることにより巻き込まれた空隙の影響などを考慮する必要がある。

4 まとめ

ジオポリマーの粉体の一部として添加する高炉スラグ微粉末の添加量および細骨材あるいは粗骨材の含有率を変化させたジオポリマー硬化体の圧縮特性について実験的に調べ、複合則理論に基づいてヤング係数の評価を行った。本実験の範囲においては以下の知見が得られた。

- (1) 細骨材含有率の増加につれてジオポリマーモルタルの圧縮強度が低下する。その低下の程度は高炉スラグ微粉末の置換率が小さいほど大きくなる。
 - (2) 粗骨材含有率の増加につれてジオポリマーコンクリートの圧縮強度が低下する。しかし、その低下の程度はセメントの場合に比較して小さい。
 - (3) 骨材量の増加に伴い、ジオポリマーモルタルおよびコンクリートのヤング係数は増加するが、含有率が40%を超えると充填不良によりヤング係数が増加しなくなる、もしくは低下する。
 - (4) ジオポリマー硬化体のヤング係数を複合則理論による推定は、高炉スラグ微粉末の置換がある場合概ね推定することは可能である。
- 6) 南浩輔, 松林卓, 舟橋政司: ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1987-1992, 2013
 - 7) 永井伴英, 李柱国, 高垣内仁志, 菅彰: フライアッシュと高炉スラグ微粉末を活性フィラーとしたジオポリマーコンクリートの力学性能に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集, No.39, No.1, pp.2077-2082, 2017
 - 8) 伊藤彰利, Phommahaxay Palamy, 前川明弘, 畑中重光: シリカフェームを添加したフライアッシュベースのジオポリマーペーストに関する基礎的実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1875-1880, 2018
 - 9) 川上英男: コンクリートの弾性係数と近似複合理論, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.497-500, 1995
 - 10) 川上英男: コンクリートの弾性係数と複合理論の適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.619-624, 1999
 - 11) 田中希枝, 島弘: 骨材の乾燥収縮とヤング係数を用いたコンクリートの乾燥収縮に関する複合モデルの検証, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.68, No.1, pp.72-82, 2012
 - 12) 趙力采, 小林一輔: コンクリートの弾性係数における複合特性, コンクリートジャーナル, Vol.12, No.7, pp.23-34, 1974
 - 13) 清原千鶴, 永松静也, 佐藤嘉昭, 三橋博三: 複合則理論を用いたコンクリートのヤング係数の推定式に関する研究, 日本建築学会構造論文集, No.576, pp.7-14, 2004
 - 14) 塚原絵万, 魚本健人: 多相複合理論に基づいたモルタルのヤング係数に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.481-486, 2000
 - 15) 江口清, 寺西浩司: 複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.15-22, 2002.7

[謝辞]

本実験に際し、本学学部4年生の五百蔵沙耶さんからご協力をいただきました。また、本研究費の一部は科学研究費基盤研究(B)17H03291(研究代表者:一宮一夫 大分高専教授)によった。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会: 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017
- 2) 一宮一夫, 津郷俊二, 原田耕司, 池田攻: ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.575-580, 2011.7
- 3) 市川敬悟: 高炉スラグ微粉末添加型ジオポリマーの基礎物性に関する研究, 三重大学平成27年修士論文
- 4) 清原千鶴, 永松静也, 佐藤嘉昭, 上田賢司: コンクリートのヤング係数の推定式, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.601-606, 1999
- 5) 河尻留奈, 国枝稔, 上田尚史, 中村光: ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1943-1948, 2011