

論文 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 達也*¹・李 柱国*²

要旨：産業廃棄物・副産物を主原料とするジオポリマーは、セメントを使用しないため環境負荷が低く、耐酸性および耐候性などが優れる。本研究では、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。性能試験結果より、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 以上の性能をもつジオポリマー系ひび割れ注入材を作製しうることが認められた。

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、ケイ酸質系塗布剤

1. はじめに

現在、建築基準法ではひび割れ補修と断面修復に用いる材料はポリマーセメント、エポキシ樹脂および両者のいずれかを使うモルタルに限定されている。しかし、このような耐火性の低い有機化合物を含む補修材料は火熱時の物性に問題がある。また、エポキシ樹脂は、接着材とひび割れの注入材としてよく使われているが、耐候性が悪く、また引張強度、熱膨張係数および弾性係数などの性質ではコンクリートと同質ではないため、補修部と既存部の相違が生じる。なお、セメントの水和生成物として、Ca(OH)₂ 結晶と C-S-H ゲルがポリマーセメントに存在するため、耐酸性と耐火性が劣る。

ジオポリマー(GP)は、アルミナシリカ粉末(高炉スラグ微粉末、フライアッシュなど、活性フィラーとも呼ばれる)とアルカリ活性剤の混合物が縮重合反応によって硬化する無機材料である。セメントを使用せず産業廃棄物・副産物を主原料とする点で環境負荷の少ない材料として注目されている¹⁾。GP は、凝結・硬化と強度発現が早い²⁾ため、養生期間が短く³⁾、既存コンクリートおよび鉄筋との接着性が良く³⁾、また Ca(OH)₂ などの結晶質水和生成物が含まれないため耐火性⁴⁾および耐酸性⁵⁾が優れるなどの特徴がある。したがって、コンクリートの二次製品に、下水道関連施設などの酸が発生する環境下や、製鉄所などの高温となる環境下において、GP の活用が期待されている。

本研究は、コンクリートのひび割れ注入材として GP の利用技術の開発を目標としているものである。常温環境の強度発現性の観点から、粉末度が高い高炉スラグ微粉末(BFS)を主に活性フィラーとする GP はひび割れ注入材に適するが、凝結時間は短いため、長時間の注入作業に向かない。そこで、本研究では、粉末度が高い高炉

スラグ微粉末(BFS)を主に活性フィラーとするひび割れ注入用 GP スラリー(GPS)の可使時間が 1 時間以上、圧縮強度が 36MPa 以上になる調合技術を検討し、GPS の粘度、接着性および硬化収縮などの性質を考察する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した材料を表-1 に示す。GPS のアルカリ溶液として、水ガラス水溶液 (以下、WG と記す)と 10M の苛性ソーダ水溶液(以下、NH と記す)のいずれかを用い、または両者を所定の体積比で混合したものを使用した。水ガラス水溶液は、JIS K 1408 の 1 号水ガラスと水を 1 : 1 の体積比で調製したものである。また、新規のアルカリ溶液として、NH とケイ酸質系塗布剤の水溶液(以下、S と記す)を所定の体積比で混合して一部のシリーズに用いた。ケイ酸質系塗布剤の水溶液は、ケイ酸質系塗布剤と水を 1 : 2 の体積比で混合したものである。ケイ酸質系塗布剤の成分が企業秘密で不明であるが、水と混合すると SiO₂ が生じるといわれている。

活性フィラーとして、JIS A 6201 のフライアッシュ I 種(以下、FA と記す)、JIS A 6206 の高炉スラグ微粉末 8000 級と 6000 級(以下、それぞれ BFS8、BFS6 と記す)を用いた。用いた活性フィラーの化学成分を表-2 に示す。なお、GP 注入材の性能を改善するために、L-酒石酸ナトリウムを主成分とした遅延剤⁶⁾(以下、R と記す)および新規に開発されたエーテル系収縮低減剤⁷⁾(以下、SR と記す)を混和剤として添加した。

2.2 GP スラリーの調合

実験に用いた GP スラリーの調合を表-3 に示す。活性フィラーの種類、アルカリ溶液の構成および混和剤の添加有無を変えて、C、W および S タイプに分けて実験を

*1 山口大学大学院 創成科学研究科 建設環境系専攻 大学院生 (学生会員)

*2 山口大学 創成科学研究科 工学系学域感性デザイン分野 教授 博士(工学) (正会員)

表-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)

実施した。C タイプの調査では、JIS8000 級の BFS を単独に使い、または JIS I 種 FA を併用し、苛性ソーダ(NH)と水ガラス(WG)のいずれかおよび二者の混合液をアルカリ溶液とした。W タイプは、BFS と FA を併用し、NH と WG の混合溶液を使い、遅延剤単独または遅延剤と収縮低減剤を用いたものである。S タイプの調査の特徴として、ケイ酸質系塗布剤と苛性ソーダの水溶液をアルカリ溶液とした。スラリーの流動性や注入性を確保するために、液固比(AS と AF の質量比)を 0.70 や 0.75 とした。

2.3 試験項目および方法

表-3に示す調査によって使用材料を計量して、活性フィラーとアルカリ溶液をペーストミキサーに投入して2分間練り混ぜた。活性フィラー、アルカリ溶液が2種類の材料から構成される場合にはアルカリ溶液と活性フィラーをそれぞれ予め混合してから練混ぜを行った。活性フィラーの混合はペーストミキサーで行った。また、混和剤を添加する場合に、混和剤をアルカリ溶液で溶解させてから活性フィラーと混合した。GPSを練り混ぜた直後にフレッシュ性状を測定し、硬化後の性能試験の供試体を作製した。

(1) 可使時間

可使時間の測定方法はまだ確立されていないため、本研究では、室温20±3℃の条件下で、試料面を実験室用ミクロスパーテルで突き刺し、圧痕に液の進入が認められ

表-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

ず、かつ圧痕が明瞭に残るまでの時間を計測し、アルカリ溶液の投入からの経過時間を可使時間とした。可使時間以外の性能試験を主にWとSタイプに対して行った。

(2) 粘度と流動性試験

練混ぜ直後に、室温20±3℃の条件下でB型粘度計によって粘度を測定した。また、土木学会のPCグラウトのコンテシステンシー試験方法に準じて、容量630ml、排出口径φ14mm、上端口径φ70mm、高さ395mmのJ14ロートを用いて流下時間を測定した。

(3) 保水係数

WとSタイプのGPSに対して、日本建築仕上材工業会の「補修用注入ポリマーセメントスラリー」の保水性試験法に準じて保水係数の測定を行った。

(4) 強度試験

JIS A 1171(ポリマーセメントモルタルの試験方法)に準じて供試体の作製および養生を行い、材齢7と28日で曲げおよび圧縮強さを測定した。試験体の寸法は、40×40×160mmとした。作製と養生方法として、GPスラリーを型枠に流し込んで、材齢1日で脱型後、乾燥収縮によるひび割れの発生を防ぐためにラップで密閉して20±3℃、R.H.60%±5%の室内で養生した。

(5) 耐酸性試験

JIS 原案 コンクリートの溶液浸漬による耐薬品性試験方法⁸⁾に準拠して、サイズが直径5cm×高さ10cmの円柱試験体をシリーズごとに1本作成し、20℃、R.H.60%の養生を28日間行った。その後、5%の濃度の硫酸に浸漬し、7日ごとの質量変化率を計測し、表面の劣化状況の観察と記録を行った。また、質量変化を測定する際に表面を布で拭き取ってから測定した。

(6) 接着強さ試験

表-3(1) GPS(C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(%)
	BFS8	FA	NH	WG	
C1	1.0		1.0	-	0.75
C2	0.4	0.6	1.0	-	0.75
C3	1.0		-	1.0	0.75
C4	0.4	0.6	-	1.0	0.75
C5	1.0		1.0	2.0	0.75

表-3(2) GPS(Wタイプ)

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	BFS6	FA	NH	WG	R	SR	
W1	0.4	-	0.6	1	2			0.75
W1R	0.4	-	0.6	1	2	5		0.75
W1RSR	0.4	-	0.6	1	2	5	3	0.75
W2	-	0.4	0.6	1	2			0.75
W2R	-	0.4	0.6	1	2	5		0.75
W2RSR	-	0.4	0.6	1	2	5	3	0.75

表-3(3) GPS(Sタイプ)

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	BFS6	NH	S	R	SR	
S1	1	-	1	2	-	-	0.70
S1SR	1	-	1	2	5	3	0.70
S2	-	1	1	2	5	-	0.70
S2SR	-	1	1	2	-	3	0.70

JIS A 6024: 2015 建築補修用及び建築補強用エポキシ樹脂の A 法に準じて、供試体の製作および養生を行い材齢 28 日で接着強さを測定した。また、接着層の厚さは 3mm とした。

(7) 収縮試験

W と S タイプの中で計 5 シリーズの試料に対して、JIS A 6024(建築補修用注入エポキシ樹脂)の硬化収縮試験法に準じて、 $12.7 \times 12.7 \times 25.4\text{mm}$ の正四角柱の試験体を用いて室温 $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 、R.H.60% $\pm 5\%$ で 7 日間常温養生した後、液比重法により測定を行った。

また、サイズが直径 5cm $\times$ 高さ 10cm の円柱試験体を 20°C 、R.H.60%の室内において作製し、2 日後に脱型した。作製した際に、長さ変化を測定するために、長さが 50mm の埋め込みゲージを試験体の長軸方向の中心に埋め込んだ。作製直後から長さの変化率を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 GP スラリーの性能

(1) 可使時間

GP スラリーの可使時間をアルカリ溶液種類別、BFS のグレード別に図-1 に示す。BFS のみを活性フィラーとした場合に、アルカリ溶液の種類に拘らず、可使時間はほぼ同じであり、20 分以下であったが、FA と BFS の併用の場合には NH、WG、NH+WG の順に長くなることが認められた。しかし、NH+WG を使っても 20°C の環境では可使時間は 45 分以下であった。

8000 級の BFS と JIS I 種 FA を併用した GPS の可使時間を 60 分以上延長するために、遅延剤を添加した。図-1(b)に示すように。遅延剤を添加しなかった JIS8000 級 BFS(BFS8 と略記)を用いた併用系 GPS の可使時間は 45 分で、JIS6000 級 BFS(BFS6 と略記)を使用した GPS は 50 分と短い結果となったが、遅延剤の添加によってシリーズ W1(BFS8)で約 60 分、シリーズ W2(BFS6)で 80 分を超える可使時間が得られた。また、JIS6000 級 BFS を使用した場合の可使時間は、JIS8000 級 BFS より長いことが認められた。乾燥収縮を低減するために収縮低減剤を添加したことは GPS の可使時間に与える影響は見られなかった。しかし、予備実験によって、JIS8000 級 BFS のみを用いた GP ペーストにおける遅延剤の使用効果は低く、可使時間は短い (15 分程度) したがって、BFS 系 GPS の可使時間を延長するために、ケイ酸質系塗布剤と苛性ソーダの混合水溶液を使った S タイプの GPS を作製した。図-1(c) に示すように、BFS8 と BFS6 のいずれかを使った S タイプの GPS は、60 分を超える可使時間を得ることが出来た。また、W タイプと同様に、収縮低減剤の添加は可使時間に与える影響は確認されなく、JIS6000 級 BFS の使用で 8000 級と比較して長い可使時間が得られた。

(2) 粘度

W と S タイプの GPS の粘度試験の結果を図-2 に示す。図-2 に示すように、BFS6000 の使用で BFS8000 の使用と比較して小さい粘度が得られた。また W タイプに比

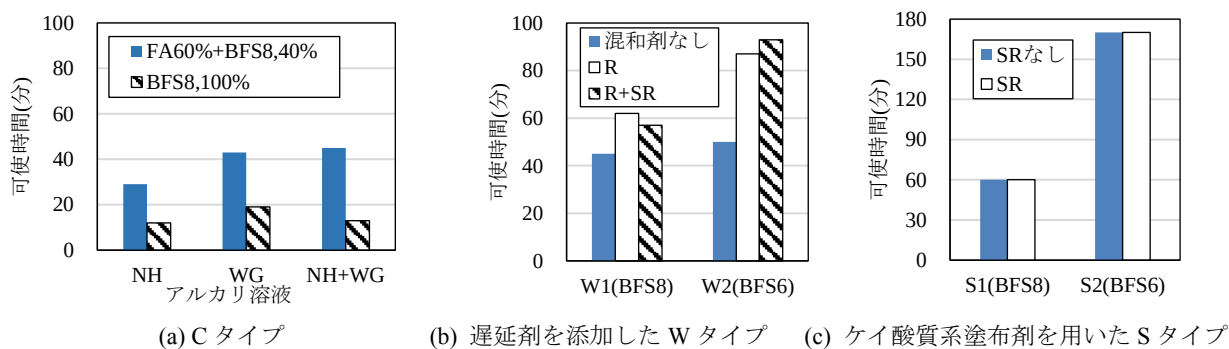


図-1 GP スラリーの可使時間

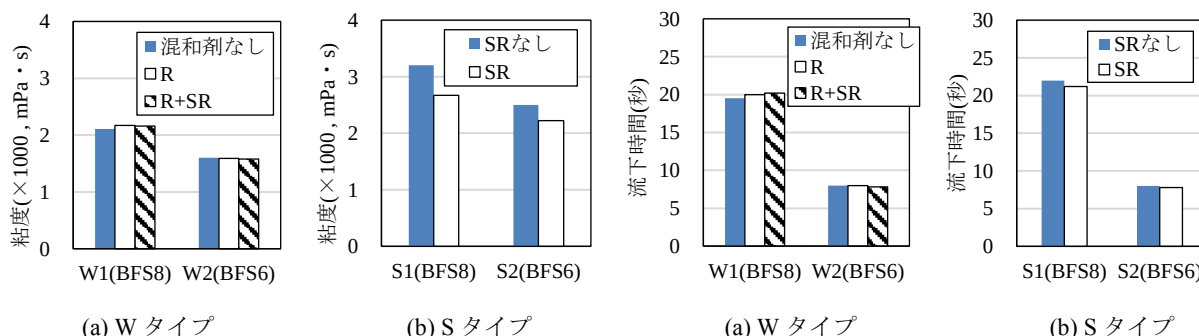


図-2 GPS の粘度に及ぼす混和剤と BFS 種類の影響

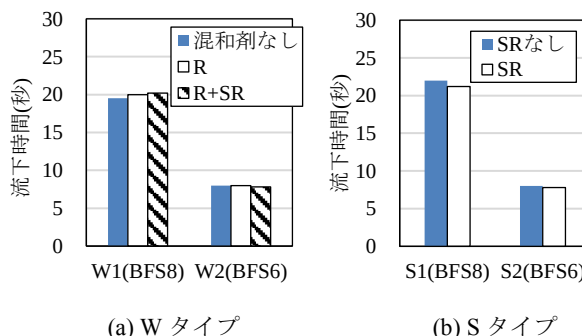
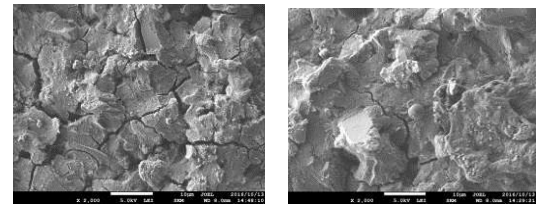
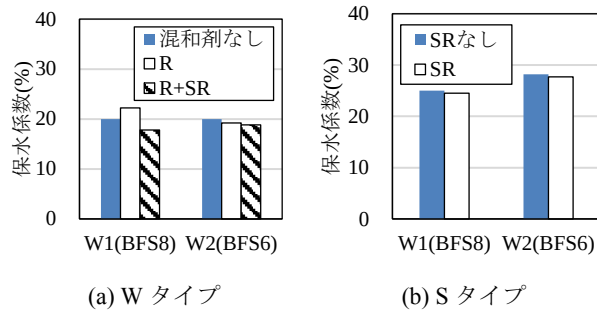


図-3 GPS の流下時間に及ぼす混和剤と BFS 種類の影響



(a) S1(BFS8), SR 無添加 (b) S1(BFS8), SR 添加
写真-1 GPS 硬化体の内部構造の SEM 画像(2000 倍)

図-4 GPS の保水係数に及ぼす混和剤と BFS 種類の影響

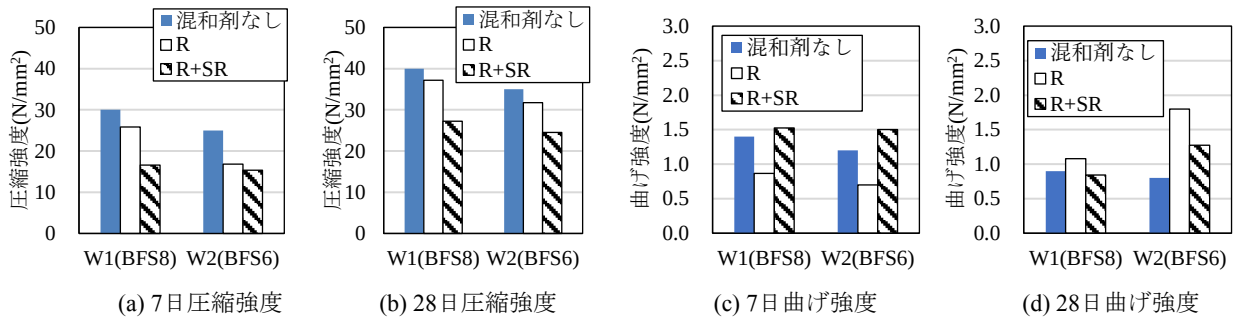


図-5 WタイプのGPS硬化後の強さ

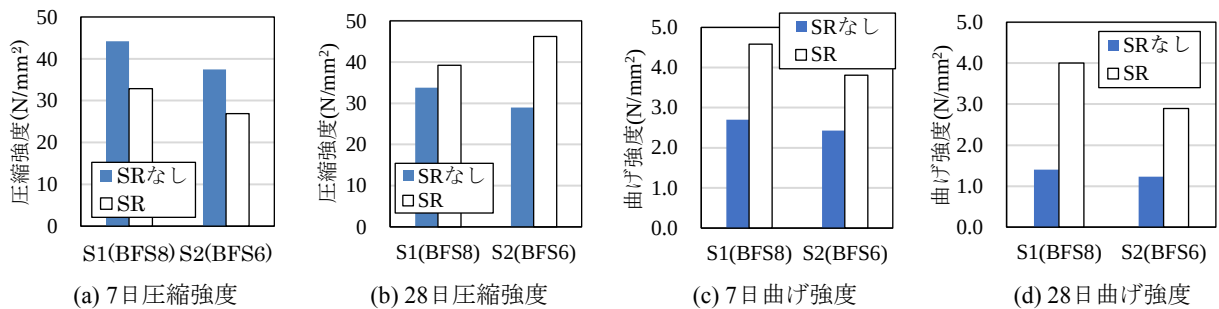


図-6 SタイプのGPS硬化後の強さ

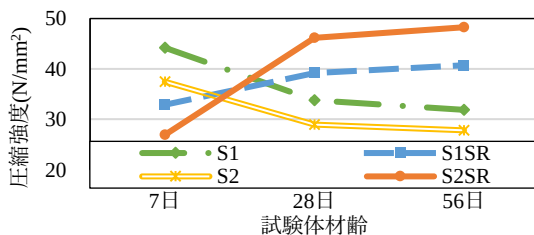


図-7 SタイプのGPSの圧縮強度と材齢の関係

べ、Sタイプの粘度は高い傾向が見られた。これは、Sタイプの液固比は小さいためである。なお、収縮低減剤の添加によって、Sタイプの粘度は若干減少したが、Wタイプに与える影響は見られなかった。

WタイプのGPSの粘度は、BFS8000の使用で約2000mPa・s、BFS6000の使用で約1500mPa・sとなった。一方、Sタイプの場合、BFS8000を使用したGPSの粘度は3100mPa・s程度であったが、BFS8000を使用したものは約2500mPa・sであった。

(3) 流下時間

図-3 は、WとSタイプのGPSのロート流下時間を示すものである。同図に示すように、球状粒子であるFAを使ったWタイプは、液固比が大きいが、Sタイプと同等な流下時間を示した。

また、遅延剤と収縮低減剤の添加により、WとSタイプのGPSの流下時間において大幅な変化は確認されなかった。しかし、GPSの流下時間は、用いたBFSの比表面積によって異なる傾向が見られた。BFS8000を使用した場合には約20秒であったが、BFS6000の使用で8秒程度となり、大幅に低下した。

(4) 保水係数

図-4に、GPSの保水係数に及ぼす混和剤とBFS種類の影響を示す。SタイプのGPSの保水係数はWタイプより大きかったが、いずれも30%以下であった。また、実験結果にばらつきはあったが、保水係数に及ぼす混和剤の影響はほとんどなかった。

(5) 強さ

図-5は、WタイプのGPスラリー硬化後の圧縮と曲げ強度を示すものである。混和剤を使用しなかったシリーズ(W1, W2)の圧縮強度と曲げ強度は最も大きく28日圧

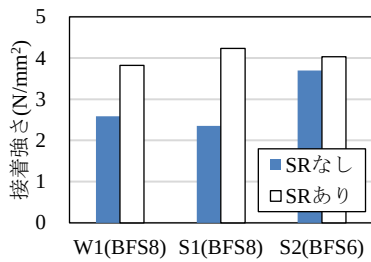


図-8 GPSの接着強さ

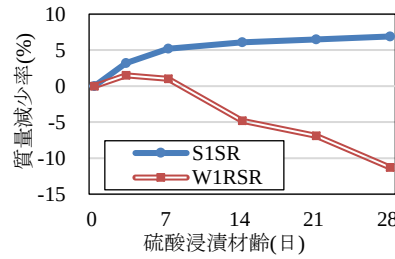


図-9 GPSの硫酸浸漬後の質量変化

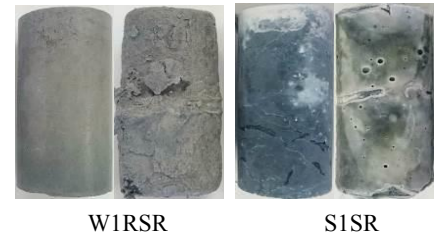


写真-2 GPS硬化体の硫酸浸漬後の劣化状況 (浸漬前：左、28日間浸漬後：右)

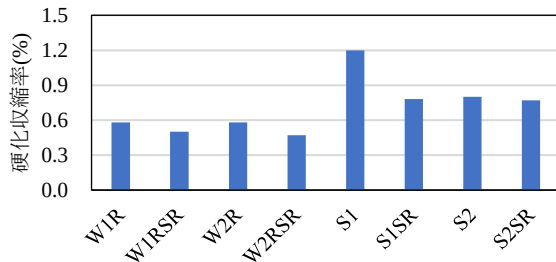


図-10 GPSの硬化収縮率

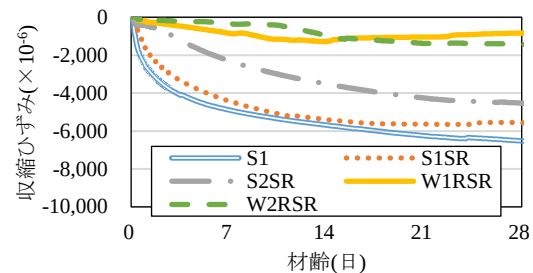


図-11 GPSの長さ変化

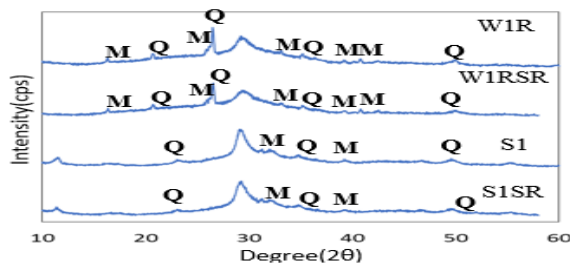


図-12 GPSのX線回折分析の結果 (Q 石英 M ムライト)

縮強度と曲げ強度はそれぞれ40MPaと2.0MPaであった。

しかし、混和剤の添加により強度の低下が見られた。特に、遅延剤と収縮低減剤を共に添加する場合の圧縮強度と曲げ強度の低下は大きく、28日圧縮強度は30MPa以下になった。遅延剤のみを添加し、JIS8000級BFSを使用すれば、36MPaの圧縮強度に達成しうる。しかし、遅延剤のみを添加したGPSの7日曲げ強度は小さくなった理由は現在不明である。

一方、SタイプのGPスラリー硬化後の圧縮と曲げ強度を図-6に示す。収縮低減剤を添加しなかったシリーズS1(BFS8)にひび割れが多く、曲げ強度を測定することが出来なかった。図-6に示すように、圧縮強度は、収縮低減剤の添加で材齢7日に低下したが、材齢28日に未添加のシリーズを上回った。収縮低減剤を添加した場合、BFSの級に拘らず、材齢28日の圧縮強度は36MPa以上であった。しかし、収縮低減剤を添加しなかったシリーズの7日圧縮強度は材齢28日の圧縮強度を上回ったことが確認された。また、曲げ強度に関しては、収縮低減剤の添加によって、材齢7日と材齢28日の曲げ強度は増加することが認められた。収縮低減剤(SR)を添加しなかったシリーズS1(BFS8)の曲げ強度は4.0N/mm²を超え

た。なお、圧縮強度の結果にばらつきがあるが、全体の傾向として、BFS6000よりBFS8000を使ったGPSの強度は大きいことがわかった(図-6を参照)。

図-7に、SタイプのGPSの圧縮強度と材齢の関係を示す。収縮低減剤を使用しなかったGPSの圧縮強度は、材齢の増加とともに低下するが、収縮低減剤を添加したGPSの圧縮強度は材齢の増加に伴って増大する傾向が見られた。これらは、収縮低減剤の添加により硬化体の乾燥収縮が減少し、ひび割れの発生が抑えられたためであると考えられる。走査型電子顕微鏡(SEM)による内部構造の写真(写真-1を参照)より、収縮低減剤を添加したGPS硬化体にひび割れが少なかった。

(6) 接着強さ

図-8に、GPSの材齢28日の接着強さ試験の結果を示す。収縮低減剤の添加によって、いずれのタイプのGPSでもその接着強さは増大することが認められた。収縮低減剤を添加したSタイプのGPSの接着強さが4.0N/mm²を上回った。

(7) 耐硫酸性

GPSの硫酸溶液浸漬後の質量変化率を図-9に示す。SタイプのGPSの質量は、浸漬期間の増加に伴って徐々に増加し、4週間では7%程度増加した。また、4週間後に、直径3mm程度、高さ5mm程度の増加が見られた。なお、写真-2に示すように外観の破損が見られなかった。

しかし、WタイプのGPS硬化体の質量は、材齢に伴い減少し、4週間では13%程度の減少が確認された。また、ひどい外観の破損が見られた(写真-2を参照)。GPの耐酸性が優れると一般に考えられるが、WタイプのGPSの耐酸性が低いのは、液固比が高く、侵食性物質が内部に拡散しやすいためであると思われる。

(8) 体積変化

図-10 に、GPS の 7 日の硬化収縮率を示す。データにばらつきがみられたが、全体の傾向として収縮低減剤の添加により硬化収縮率は低下する傾向が見られた。また、W タイプと S タイプを比較すると W タイプの硬化収縮率が低かった。

一方、埋め込みゲージによって測定した長さ変化率を図-11 に示す。S タイプでは、収縮低減剤を添加していないシリーズ S1 と添加したシリーズ S1SR の結果を比較すると、収縮ひずみは収縮低減剤の添加で大幅に低下したことがわかる。また、シリーズ S1SR と S2SR を比べると、BFS6000 級を使用したシリーズ S2SR のほうが、収縮ひずみは小さかったが、W タイプのシリーズ W1SR と W2SR に違いが殆どなく BFS の比表面積の影響は見られなかった。

なお、S タイプと W タイプでは、後者の収縮ひずみが小さかった。現在、理由不明であるが、S タイプでは活性フィラーに BFS のみを使用するため、増加された縮重合反応による脱水量が多い。また、ケイ酸質系塗布剤水溶液の水量(66.7vol.%)は水ガラス水溶液(50vol.%)より多いのも一因であると思われる。

3.2 ジオポリマースラリーの微細構造

図-12 は GPS の X 線回析分析の結果である。収縮低減剤(SR)の添加によるグラフのピークの変化は認められず、新たな結晶物質が生じなかった。また、W タイプと S タイプを比較すると 26°(2 θ)付近にムライトと石英に若干の違いが見られたが、大差はなく、両タイプとも非結晶質の硬化体であると判断している。

4. まとめ

本研究では、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 スラリーとケイ酸質系塗布剤を用いた BFS 系 GP スラリーの性能を考察した。得られた知見を以下のようにまとめる。

- (1) アルカリ溶液として水ガラス(WG)と苛性ソーダ(NH)の混合水溶液を使用する FA-BFS 系ジオポリマースラリー(GPS)において、遅延剤の添加で可使時間が 60 分以上になりうるが、圧縮強度は 10~30%低下する。
- (2) ケイ酸質系塗布剤(S)と NH の混合水溶液をアルカリ溶液とした GPS では、遅延剤を添加しなくても、60 分以上の可使時間を得ることが出来る。また、WG+N のアルカリ溶液を用いた GPS よりも、低い液固比で同等の粘度や流下時間を得ることができ、36MPa 以上の圧縮強度を有し、接着強さも 4.0N/mm²を超えることが出来る。
- (3) ケイ酸質系塗布剤、苛性ソーダおよび BFS を用いた

GPS の乾燥収縮は大きい、収縮低減材の添加で抑えることができ、28 日以降の圧縮強度は材齢 7 日より低下しない。

- (4) GPS の耐硫酸性能は、液固比が高いため FA-BFS 系の場合には劣るが、ケイ酸質系塗布剤を用いた BFS 系の場合には優れる。
- (5) アルカリ溶液として NH+S を用い、収縮低減剤を添加した調合で粘度が 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 以上の性能をもつ GPS を作製することが出来る。

謝辞 本研究の実験を行う際に山口大学工学部感性デザイン工学科卒論生稲田雄大君ならびに(一財)建材試験センター西日本試験所 流田靖博氏・杉原大祐氏のご協力をいただきました。ここに付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 李柱国: ジオポリマーコンクリートの環境影響に関する定量的考察「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集, pp.43-50, 2016.6
- 2) Naik T. R., and Kumar R.: Geopolymer Concrete for sustainable Developments: opportunities, limitations, and future needs, *Proc. of 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>
- 3) Bell J. L., Gordon M., and Kriven W.M.: Use of geopolymeric cements as a refractory adhesive for metal and ceramic joins, *Advances in Ceramic Coatings and Ceramic-Metal Systems: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, Vol.26, No.3, pp.407-413, 2005
- 4) Lyon R.E., et al.: Fire-resistant aluminosilicate composites, *Fire Materials*, Vol.21. No.2, pp. 67-73, 1997
- 5) Allahverdi A., and Skvara F.: Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements. Part 1. Mechanism of corrosion at relatively high concentrations, *Ceramics-Silikáty*, Vol.49, No.4, pp.225-229, 2005
- 6) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1969-1974, 2016.
- 7) 岡田朋久・李柱国・橋爪進・北里慎悟: ジオポリマーの乾燥収縮による体積変化を制御する添加剤に関する研究, 「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集, pp.67-72, 2016.6
- 8) JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法, コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.59-62, 1985