

# 論文 左官用ジオポリマーモルタルの室温養生による調製と諸特性

上原 元樹\*1・佐藤 隆恒\*2・小坂 征雄\*3・山口 正廣\*4

**要旨:** フライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用し、水ガラスを使用しない「Si 成分粉体添加その場添加溶解法」で左官作業用ジオポリマー (GP) モルタルを試作し、その性状を検討した。その結果、アルカリ成分/水のモル比が 0.15、ケイ素成分/アルカリ成分のモル比が 0.20 の配合において良好な作業性が得られ、高い酸劣化抵抗性等の特徴が観察された。この左官用 GP モルタルを屋外環境で普通ポルトランドセメント(OPC)モルタル板に 10mm の厚さで左官施工した結果、十分な作業性があり、ひび割れが生じないこと、OPC モルタル板との付着強度も 1.89~2.14MPa とポリマーセメントモルタルに匹敵することが確認された。

**キーワード:** ジオポリマー, 左官, 室温養生, アルカリ/水比, ケイ素/アルカリ比

## 1. はじめに

筆者らは高炉スラグ微粉末 (以下 BFS) で一部置換したフライアッシュ (以下 FA) から、ジオポリマー(GP)硬化体を作製している。この過程で GP プレストレストコンクリート(PC)まくらぎ<sup>1)</sup>や繊維補強 GP 短まくらぎ<sup>2)</sup>を蒸気養生で作製し、それらまくらぎを営業路線に試験敷設した<sup>3)</sup>。また GP 硬化体に関して、作製溶液の配合、養生温度と GP 硬化体生成物との諸特性を検討しており、加温養生の GP 硬化体において各種作製条件と GP 硬化体諸性質との相関を把握できるようになってきた<sup>4)</sup>。その結果として、筆者らは目的とする性質に応じた GP 硬化体の作製方法及び配合を提案しており、水ガラスを使用せず広範な配合で実用的に GP 硬化体を作製できる「Si 成分粉体添加その場溶解法」を提案している<sup>4)</sup>。

一方、GP 硬化体の高耐火性や高耐酸性を活かして、それを補修材料として使用する試みも行われている<sup>5)</sup>。また、食品工場の屋上や製糖工場の床面では糖分による Ca 成分の溶出のため、コンクリートが劣化と補修を繰り返す事案もあり<sup>6,7)</sup>、遊離した Ca 成分を含まない GP 硬化体は耐糖性を有した補修材料としても期待される。

しかし、GP 硬化体は、フレッシュ性状における粘性の

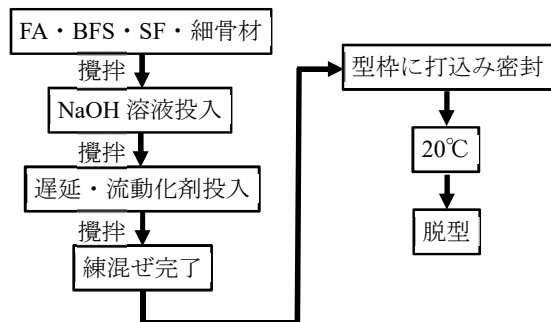


図-1 溶解法による GP モルタル作製手順

高さから左官作業性が悪いこと、常温養生では収縮の影響が大きくひび割れが生じやすいこと<sup>8)</sup>等、実用化に際して問題が残っていた。そこで、筆者らは、補修用の左官施工用のモルタル材料として、実用的に使用できる GP モルタルの作製を試み、その左官作業性や圧縮強度等の物理的性質及び生成物等を検討した。

## 2. 試料の作製

### 2.1 各種試験用 GP モルタル供試体の作製方法

GP 硬化体の作製は、一般的には水酸化ナトリウム溶液とケイ酸アルカリ溶液 (水ガラス) を混合した溶液を使用する。筆者らは、この作製方法を「一般法」と呼んでいる。ただし、一般法では凝結時間のコントロールが難しい上にフレッシュ状態での粘性が高く、左官用モルタルとしてのコテならし性が悪いことから実用的に用いることは困難な場合もある。そこで、筆者らが、「Si 成分粉体添加その場溶解法」、略して「溶解法」と呼んでいる、水ガラスの代わりに Si 成分としてシリカフューム (以下 SF) を練り混ぜ時に添加する方法を採用した (図-1)。

### 2.2 各種試験用 GP モルタルの作製配合

表-1 に各種試験用 GP モルタル供試体の配合を記し、使用材料を表-2 に示す。なお、筆者らは GP 硬化体の諸性質を良く表す配合記述法として、使用する NaOH と H<sub>2</sub>O のモル比を A/W, SF における SiO<sub>2</sub> と NaOH のモル比を Si/A, 水分量と粉体 (SF 分の体積を含まない FA+BFS 分の体積) の体積比を W/P と記述する方法を提案しているため、その記述法に則って表-1 では記述した。

表-3 は、表-1 の供試体試験結果から左官作業性が良好な配合として配合 1 (表-3 における配合 A および B)、低コストの配合として配合 4 (表-3 における配合 C) の配合を選定し、より実施工に近い形で普通ポルトランド

\*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 博士 (工学) (正会員)

\*2 公益財団法人鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 修士 (工学) (正会員)

\*3 カドヤ工業株式会社 営業・技術部

\*4 株式会社タカボシ 神奈川支店 横浜営業所

セメント(OPC)モルタル下地に、選定試料を左官施工したときの配合である。実施工に則ってハンドミキサーで練り混ぜを行い、実際の施工環境での作業性を考慮した結果、表-1の配合より、ややW/Pの大きい配合となっている。なお、表-1および表-3におけるグルコン酸ナトリウムは主に流動化剤として、FA換算した粉体量に対して一律に0.5%添加している。

### 2.3 左官作業性及び諸特性確認試験

10cm×10cm×1cmの合板製型枠に表-1の配合で作製したGPモルタルを左官施工し、コテ切れ、伸び等、その作業性を評価した。施工後は20℃環境下に静置し、白華発生状況、ひび割れの有無を確認した。なお、コテ塗りの作業性の評価は、左官作業経験40年の左官作業実務者が施工したときの評価に基づいている。

上記試験により選定した配合のGPモルタルをハンドミキサーで作製し、厚さ10mmのOPCモルタル下地に縦400×横900×厚さ10mmの寸法で左官施工し、その作業性を確認した上で神奈川県横浜市の屋外(10月～)に暴露した。なお、施工に当たってモルタル板は表面のほこりを拭き取る程度で特別な処理は行わなかった。また、建研式の接着力試験器によりGPモルタルとOPCモルタル板との付着強度を材齢28日で測定した。測定には40mm四方のアタッチメントを使用した。

### 2.4 各種分析方法

表-1の配合から砂成分を除いた配合で作製したGPペーストから粉末X線回折により生成物を同定した。また、5φ×10cmのGPモルタル供試体に関してJIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して圧縮強度を測定した。硫酸浸漬試験では、5%濃度の硫酸に5φ×10cmのGPモルタル供試体を28日浸漬し、上記方法と同様に圧縮強度を測定した。耐熱性試験では、GPモルタル供試体を電気炉により600～1000℃で2時間保温(昇温速度：20℃/分、降温速度：徐冷)した後、上記同様に圧縮強度を測定した。また、一宮他<sup>9)</sup>に準拠して製氷皿に打ち込んだ棒状ペースト供試体を電気炉で加熱し、加熱冷却後の形状から、熔融状況を評価した。供試体の収縮試験では、配合1の試料に関して1日で脱型後、5φ×10cmの円柱供試体の両側面にひずみゲージを取り付け、60%相対湿度の雰囲気中に静置してひずみ量を測定した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 フレッシュ性状、圧縮強度と生成物

表-4に表-1の配合にしたがって作製したGPモルタルのフレッシュ性状と圧縮強度を示す。フロー値において配合による大きな差は認められず、特にSi/A比による差は小さかった。

一方、圧縮強度はA/W比0.10の試料でやや低く、活

表-1 GPモルタル供試体の配合

配合	FA	BFS	SF	骨材	NaOH	水	GNa	A/W	Si/A	W/P
	Kg/m <sup>3</sup>						モル比		体積比	
1	314.1	254.0	17.3	1570.6	119.8	111.7	2.62	0.15	0.20	0.797
2	315.8	255.4	8.7	1579.2	120.5	112.2	2.63	0.15	0.10	0.797
3	312.4	252.6	25.8	1562.3	119.2	111.1	2.60	0.15	0.30	0.798
4	317.1	256.4	11.6	1585.4	80.6	133.3	2.64	0.10	0.20	0.795
5	404.0	326.6	19.4	1346.7	134.1	125.1	3.37	0.15	0.20	0.694
6	311.4	251.8	22.9	1557.2	158.4	90.5	2.60	0.20	0.20	0.799

GNa:グルコン酸ナトリウム, NaOHは48%濃度の水溶液

表-2 使用材料

材料名	記号	規格等
フライアッシュ	FA	JIS I種(JIS A6201) 密度: 2.40g/cm <sup>3</sup>
高炉スラグ微粉末	BFS	4000cm <sup>2</sup> /g (JIS A 6206) 石膏添加: 無 密度: 2.91g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	JISセメント強さ試験用標準砂
シリカフェーム	SF	JIS A 6207 相当

表-3 モルタル板への左官施工用GPモルタルの配合

配合	FA	BFS	SF	骨材	NaOH	水	GNa	A/W	Si/A	W/P
	Kg/m <sup>3</sup>						モル比		体積比	
A	309.3	250.0	18.5	1546.3	128.0	117.9	2.58	0.15	0.20	0.859
B	305.9	247.3	19.3	1529.3	133.5	123.2	2.55	0.15	0.20	0.907
C	307.8	248.8	13.2	1538.9	91.5	150.3	2.57	0.10	0.20	0.926

GNa:グルコン酸 Na, NaOHは48%濃度の水溶液を使用

表-4 GPモルタルのフレッシュ性状と圧縮強度

配合	モルタルフロー		圧縮強度*		
	0打	15打	1日	7日	28日
	mm		MPa		
1	124	165	22.7	62.5	79.3
2	113	158	22.3	57.1	78.5
3	119	165	23.2	60.2	78.4
4	105	153	25.1	55.8	69.5
5	115	155	28.4	71.6	86.7
6	113	149	23.7	63.8	79.8

\*:20℃封緘養生

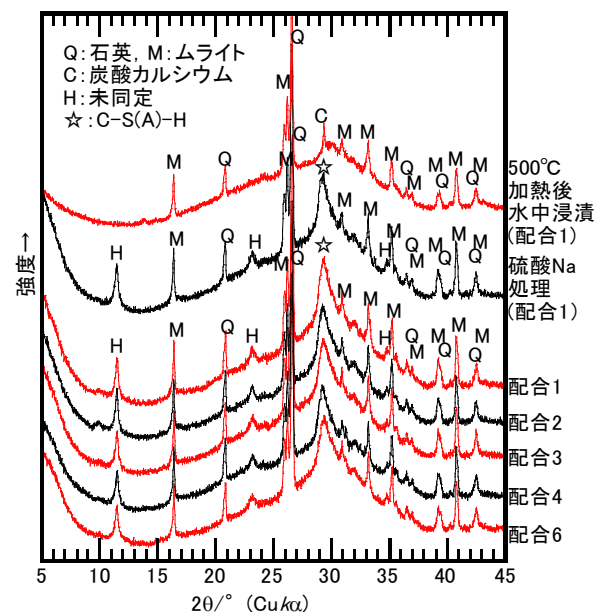


図-2 GPペーストの粉末X線回折図

性フィラー(FA+BFS)の多い配合5でやや高かったが、配合による差は加温養生による結果<sup>10)</sup>と比較して小さかった。筆者らは、常温養生では加温養生と比較して、活性フィラーであるFAとBFSの中でBFSの反応割合が増加することを報告している<sup>4)11)</sup>。特に水ガラスを使用しないことが特徴の溶解法の常温養生では、SFの溶解が遅く、反応性に富む水ガラス成分が少なくなるためアルカリ刺激によるBFSの反応が主となりA/W比の圧縮強度への影響が小さかった可能性が考えられる。

図-2は表-1における砂成分を除いて同一配合で作製したGPペーストのX線回折図である。なお、ペーストとした場合、配合1と5は、ほぼ同配合となるため配合5は除外している。結晶物質はFA起源の石英とムライトである。2θ(CuKα)が30°近傍にはケイ素の一部をアルミニウムで置換したBFS起源のケイ酸カルシウム水和物(C-S(A)-H)に起因すると考えられるブロードなピーク(図中の☆)が各試料同様に認められた。各配合におけるピーク強度、プロファイルに大きな差は認められず、生成物に大きな差は無いものと推察される。また、2θ(CuKα)=11.4°に、これまで、加温養生で作製した場合に観察されなかった未同定のピークが今回全ての試料で認められた。ここで、常温養生でも水ガラスを使用した一般法では、本ピークは観察されていない<sup>11)</sup>。ただし、一般法における配合は、Si/A比の高い配合となっており、本配合とは異なっている<sup>11)</sup>。なお、アルカリ刺激されたBFSの生成物においてハイドロタルサイトが生じることが報告されており<sup>12)</sup>、回折位置もおよそこれに一致する。したがって、この生成物がハイドロタルサイトとすると、高温養生と異なりFAが反応しにくいいため、アルカリ刺激によるBFSからC-S(A)-Hが生じる反応が本反応の主となっている可能性が示唆される。また、ハイドロタルサイトのCa系物質であるハイドロカルマイトの可能性も考えられるが、図-2に示すよう、硬化体を粉碎した

微粉末を1Mの硫酸Na溶液で処理しても、回折位置が全く移動しないことからハイドロカルマイトとは考えにくい。一方、図-2に示されるようにハイドロタルサイトの特徴となる加熱処理後の水分浸漬による再生成<sup>13)</sup>も確認されず、走査型電子顕微鏡による精査でも、ハイドロタルサイトあるいはハイドロカルマイトを確認できなかったことから詳細はさらに検討する必要がある。

### 3.2 左官作業性及び諸特性確認試験結果

表-5にGPモルタルを100mm×100mm×10mm厚に、コテ塗り作業を行い、その性状を確認した結果を記す。フロー値では大きな差は無かったがコテ塗りの作業性では差が認められた。配合1の試料の作業性の評価が高く、次いで配合4の作業性が高かった。他の配合の試料はコテに付着してモルタル全体が動いてしまう等、上記配合より作業性の評価は低かった。これはフロー値では評価できないGPフレッシュペーストの粘性が主に影響しているものと考えられるが粘性だけの単純評価では現在の所、左官作業性の評価は困難であり、今後何らかの指針を考える必要がある。

図-3は表-5におけるGPモルタル左官施工の外観写真の一部である。全ての試料において、硬化後もひび割れは認められなかった。これは、例えば、配合1の硬化時の収縮を測定した結果が388μ/24日と小さいことに起因していると考えられる。一般的な水ガラスを使用した常温養生のGPコンクリートの収縮量は、一例として収縮低減剤を使用しないとき1150μ/28日、収縮低減剤を使用して400μ/28日と報告されている<sup>14)</sup>。したがって、水ガラスを使用しない溶解法では、収縮が小さく、左官施工時におけるひび割れが生じにくい可能性が示唆される。各試料とも1日後では炭酸ナトリウム(NaCO<sub>3</sub>)の白華が発生した。配合3と6は比較的硬化体に堅く付着する

表-5 GPモルタルの左官作業性性状と仕上り状況

配合	練上り後コテ作業開始時間(分)						仕上り	白華		
	10	20	30	50	60	85		量	除去性	
									掃除機可	水洗可
1	○	○	○	△ <sub>2</sub>	×	×	◎	△	○	○
2	△ <sub>1</sub>	△ <sub>1</sub>	△ <sub>1</sub>	△ <sub>2</sub>	×	×	○	×	○	○
3	△ <sub>1</sub>	△ <sub>1</sub>	△ <sub>1</sub>	△ <sub>2</sub>	△ <sub>2</sub>	×	△~×	×	×	○
4	○	○	△ <sub>2</sub>	△ <sub>2</sub>	△ <sub>2</sub>	×	◎~○	△	○	○
5	△ <sub>1</sub>	△ <sub>1</sub>	△ <sub>2</sub>	×	×	×	△	○	○	○
6	△ <sub>1</sub>	△ <sub>1</sub>	△ <sub>1</sub>	×	×	×	△	△	×	○

コテ作業性の評価；◎：伸び良好，コテ付着なし ○：粘性が高いがコテ付着量は少量 △<sub>1</sub>：粘性が高くコテに付着 △<sub>2</sub>：伸びが悪いがコテ作業可能，×硬化によりコテ作業不可  
仕上りの評価（表面の平滑度を外観から評価）；◎：良好 ○：普通 △：やや粗い ×：粗い  
白華生成量の評価（生成量を外観から評価）；◎：発生無し ○：少量 △：やや多い ×：多い  
除去性の評価（掃除機可）；○：綿状，掃除機で簡単に除去可 ×：掃除機で除去不可  
白華の除去性の評価（水洗可）；○：水溶性で水洗により簡単に除去できる

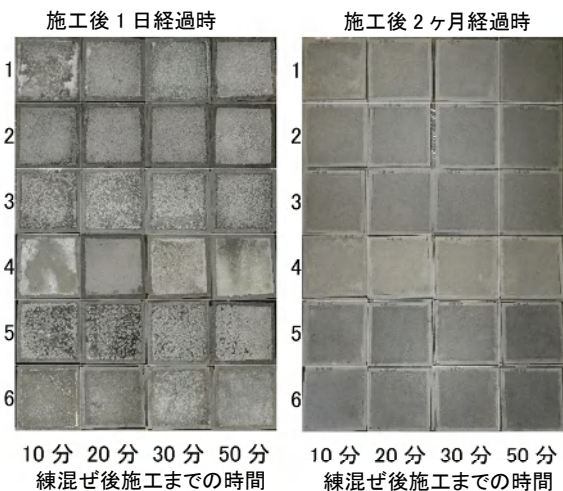


図-3 GPモルタル左官施工供試体の外観写真 (1~6の各番号は表-1における配合を表す)

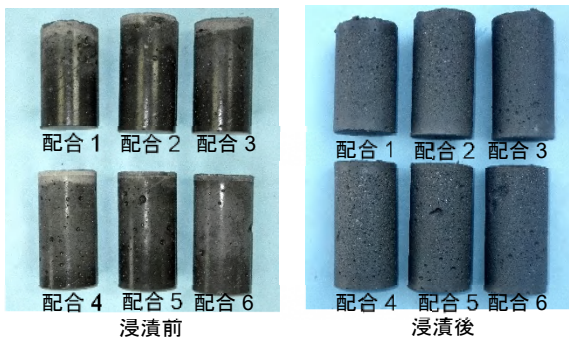


図-4 硫酸浸漬前後写真

表-6 硫酸浸漬試験結果

配合	質量変化率	硫酸浸漬前 圧縮強度	硫酸浸漬後 圧縮強度	圧縮強度 変化率
	%	MPa		%
1	-0.08	79.3	77.2	-2.7
2	-0.32	78.5	76.4	-2.7
3	-0.05	78.4	78.4	0.1
4	-0.43	69.5	62.6	-9.9
5	0.02	86.7	85.4	-1.5
6	-0.04	79.8	75.5	-5.5

形で析出したが、他の配合試料は綿孢子状の白華であるため掃除機で簡単に除去可能であった。また、白華は水溶性の  $\text{NaCO}_3$  であるため、全ての試料において水洗で簡単に除去可能であり、除去後に再び白華が生じることはなかった。

### 3.3 GP モルタルの諸性質

図-4 は GP モルタルの硫酸浸漬前後の写真であり、表-6 は 28 日経過時の質量変化と圧縮強度の変化を記したものである。硫酸浸漬で各試料表面の光沢がなくなり、最表面は溶脱し、表面から 2mm 程度の領域で、ざらつく様子が認められたが、特別な析出物等は観察されなかった。また、各試料の質量変化率は -0.32~0.02% と小さく、圧縮強度の変化量も小さかった。これらの値は、蒸気養生試料では同様の配合で、表面のざらつきも認められないという点で異なるが、質量変化や圧縮強度の変化は蒸気養生した試料と大きな差はなかった<sup>15)</sup>。したがって、常温養生、溶解法で作製した GP 硬化体の耐酸性は、既報告における蒸気養生試料と大きな相違はないものと推察される。

図-5 に各配合における加熱温度に対する圧縮強度の変化を記す。配合 4、すなわち A/W 比 0.10 で作製した試料は 600℃ 以上で爆裂した。しかし、他の試料に配合による大きな差はなく、600℃ 加熱試料で圧縮強度は 40~50MPa 程度、700℃ 以上では 10~15MPa となり、それ以上低下することなくほぼ一定であった。700℃ 以上では、後で示すように、一宮他<sup>9)</sup>の結果と比較して、圧縮強度の値はやや低かったが、C-S(A)-H が残存せず、鉱物組成が変化すること等の結果は同様であった。なお、今回、700℃ 以上で強度が小さかったのは、蒸気養生を行って

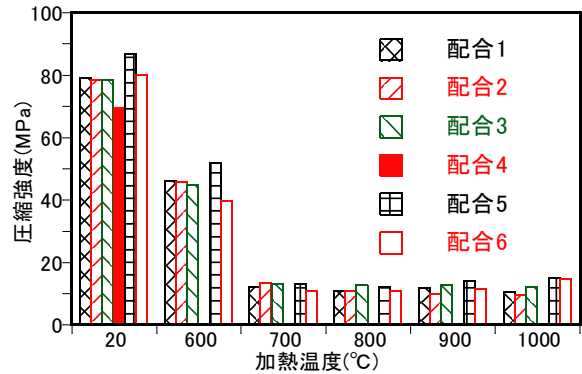


図-5 左官用 GP モルタルの加熱温度と圧縮強度

ないことから、FA の反応量が少なかったことに起因している可能性がある。しかし、常温養生の場合 FA は長期的な反応となる可能性もあるため、本性状はさらに長期的に観察していく必要があるものと考えられる。

図-6 に加熱冷却後の棒状ペースト供試体の外観を、表-7 に変状一覧を示す。一宮他<sup>9)</sup>は、このペースト加熱試験で、その性状を観察することで、より詳細な加熱性状の把握が可能としている。本試験では 800℃ 及び 1000℃ で加熱した供試体では、ひび割れや僅かな反り返り等は認められるが、溶融による変形は認められなかった。一方で、1150℃ で 2 時間加熱した場合は全ての配合で溶融しており原形を留めなかった。また、モルタル供試体では配合 4 すなわち A/W 比 0.10 の供試体は 600℃ 以上で爆裂したがペーストで爆裂は観察されなかった。一宮他<sup>9)</sup>でもモルタルとペーストで加熱性状に相違があることが述べられているが、一般的にはモルタルの方が骨

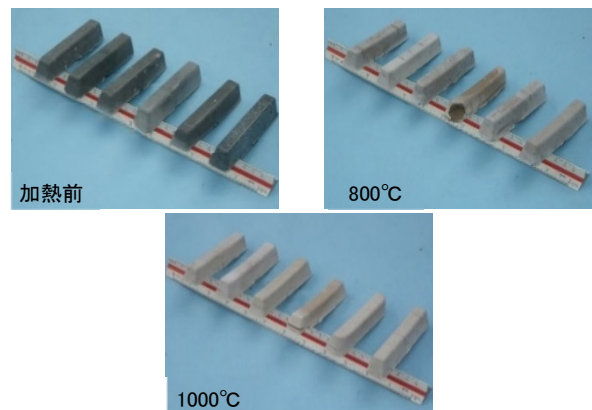


図-6 加熱前後の棒状ペースト供試体  
(左から配合 1~6)

表-7 棒状ペースト供試体の変状

配合	1	2	3	4	5	6
A/W	0.15	0.15	0.15	0.10	0.15	0.20
Si/A	0.20	0.10	0.30	0.20	0.20	0.20
1150℃-2h	×	×	×	×	×	×
1000℃-2h	○	△	△	△	△	△
800℃-2h	○	○	○	△	△	○

○：細かいひび割れ程度，△：大きなひび割れ，欠損程度，  
×：原形を留めない（発泡，溶融）

材の効果で、その変化は穏やかになる傾向と考えられる。今回、ペーストで爆裂が生じないでモルタルで生じた理由は、高粘性の本材料で骨材により空気を巻き込み、その膨張による爆裂等が考えられるが詳細は不明である。

図-7 に加熱冷却後のペースト試料の粉末 X 線回折図を示す。C-S(A)-H によるブロードなピークは、500°Cでは小さくなり、800°Cでは消失している。このことから、800°Cでは C-S(A)-H は残存していないことがわかる。なお、図-7 に各加熱温度での生成物同定結果を記したが、ケイ酸塩物質は種々の固溶体を形成するため X 線回折の結果からだけで生成物を同定することは困難であり参考として記すものである。800°C以上では結晶質物質として、高炉スラグ非晶質相から生じることが報告されているゲーレンイトーオケルマナイト系列の物質<sup>16)</sup>やネフェリン等が新たに生じた。800°C以上の硬化体は、鉱物組成が500°C以下の硬化体とは全く異なるため同一に論じられないことがわかる。また、配合による生成物の差は大き

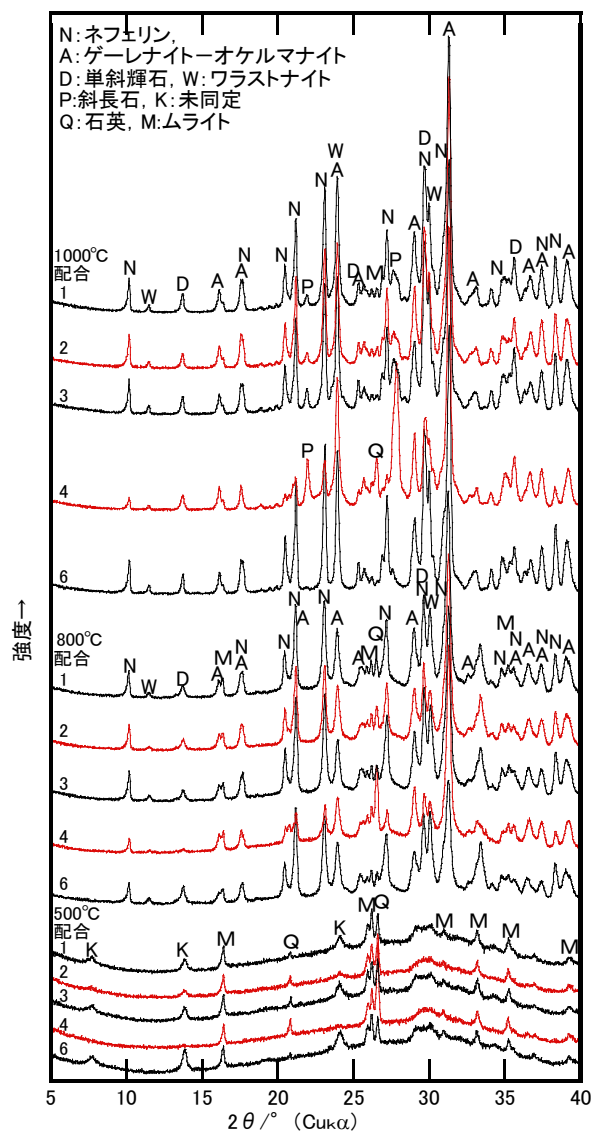


図-7 焼成した GP ペーストの粉末 X 線回折図

くなかったが配合 4, すなわち A/W 比 0.10 の試料ではアルカリ成分が少ないことに起因して石英等が残存傾向となり斜長石生成量が多いことなど焼成後の鉱物組成に若干の差が認められた。

### 3.4 左官 GP モルタルの屋外曝露試験結果

図-8 に屋外施工した左官 GP モルタルの外観を、図-9 に材齢 8 日時点の外観を、表-6 に左官作業性状と付着強度試験結果を示す。なお、屋外施工試験用モルタルは、モルタル施工性も良く、その他の諸性質に関しても良好な結果が得られた表-1 における配合 1 と耐熱性で爆裂等の問題があったが施工性が良好で、アルカリ使用量が少なく低コスト配合である配合 4 を基にした。

屋外施工に際して、ハンドミキサー等、作製条件を実施施工に準じた結果、コテ作業性を確保するために、表-1 における基本配合より W/P がやや多くなり、結果としてフローはやや大きくなった(表-8)。なお、表-8 の A~C 全ての配合において作業性は良好であり、実施工における問題は認められなかった(図-8)。また、図-9 に示される材齢 8 日時の外観写真に見られるように、左官施工面の平滑度も高く、ひび割れも生じてなかった。な



図-8 屋外施工時の左官 GP モルタル



図-9 材齢 8 日後の GP モルタル

表-8 GP モルタルの左官作業性状と付着強度

配合	15 打フロー (mm)	コテ作業性	ひび割れ剥離	付着強度 (MPa)
A	154×156	○	◎	1.89
B	176×178	◎	◎	2.09
C	177×175	◎	◎	2.14

コテ作業性の評価

◎: 伸び良好。コテ付着なし。

○: 粘性がやや高いがコテ付着なし。

ひび割れ、剥離の評価

◎: 2ヶ月経過時にひび割れ及び剥離なし。

付着強度の評価

材齢 28 日時における建研式接着力試験結果。

お、現在3ヶ月経過後も、特にひび割れ等は生じておらず、8日材齢時の様子を維持している。一方、付着強度に関しては、界面処理を行わなかったが、1.89MPa～2.14MPaと配合による差は小さく、ポリマーセメントモルタルに匹敵する付着強度が得られた。また、どの試料に関しても引張試験において界面で剥離した事象は認められなかったが、配合A及びBでは下地モルタル板が破壊され、配合CではGPモルタル部分が破壊された。これは配合CのA/W比が低く強度が小さいことによりGPモルタル内で破壊が生じたものと推察される。

#### 4 まとめ

本論文では、種々の配合のGPモルタルを溶解法、常温養生で作製し、その左官作業性、諸性質を検討した。また、作製したGPモルタルをOPCモルタル下地に1cm厚で左官施工して、左官作業での実用性、付着強度を検討した。以下にその結果を記す。

- (1) 種々の性質において、配合による差は、加温養生と比較して小さかった。これは、生成物が高炉スラグ由来するC-S(A)-Hが主なものであることに起因していると考えられる。
- (2) 左官作業性を検討した結果、A/W比0.15、Si/A比0.20あるいはA/W比0.10、Si/A比0.20の配合が良好であった。
- (3) 耐熱特性は600℃まで40MPa程度を維持するが、700℃以上で15MPa程度に圧縮強度が低下し、1150℃以上では溶解した。
- (4) 5%硫酸溶液による浸漬試験では、表面2～3mmが溶脱し荒れたように表面となったが、圧縮強度や質量変化特性は加温養生した物と大きな差は無かった。
- (5) 普通セメントモルタル板に左官施工した結果、作業性は良好で、ひび割れも生じなかった。また、OPCモルタル下地との付着強度は1.89～2.14MPaと特に界面処理をしなくてもポリマーセメントモルタルと同等であったことから、左官作業用モルタルとして実用的に使える目処が得られた。

#### 参考文献

- 1) 大木信洋, 東原 実, 佐藤隆恒, 上原元樹: ジオポリマー法による環境負荷低減 PC まくらぎの実用化に向けた試作, 土木学会第73回年次学術講演会講演要旨集, pp.559-560, 2018
- 2) 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.2013-2018, 2013
- 3) 上原元樹, 佐藤隆恒, 東原 実, 大木信洋: ジオポリマーPCまくらぎの営業線への試験敷設, 土木学会第72回

年次学術講演会講演要旨集, pp.167-168, 2017

- 4) 上原元樹: ポルトランドセメントを使用しないジオポリマーコンクリートの配合と諸性質およびその開発, 工業材料, Vol.66, No.6, pp.46-49, 2018
- 5) ボンマーハーサイ パラミ, 伊藤彰利, 畑中重光: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1249-1250, 2018
- 6) 吉田清司: 屋上防水コンクリートの劣化原因分析, 第一工業大学研究報告, Vol.26, pp.51-56, 2014
- 7) 小島 朗, 鈴木英博: 耐糖用モルタル, セメント, コンクリート及び床面, 特開 2002-193645
- 8) 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
- 9) 一宮一夫, 秋永史也, 原田耕司, 池田 攻: フライアッシュ系ジオポリマーのアルカリ水比とフロー値ならびに高温加熱による外観や強度変化の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, pp.1851-1856, No.1, 2018
- 10) 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等諸性質の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2325-2330, 2016
- 11) 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
- 12) Song S., Sohn D., Jennings H.M., Mason T. O.: Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag, Journal of Material Science, Vol.35, pp.249-257, 2000
- 13) 日比野俊行, 綱島 群: インターカレーションによる層状複水酸化物ハイドロタルサイトの機能材料化, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan 7, pp.227-234, 2000
- 14) 岡田朋久, 李 柱国, 橋爪 進, 永井伴英: フライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーコンクリートの性能に及ぼす収縮低減剤の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2029-2034, 2017
- 15) 佐藤隆恒, 上原元樹: 高炉スラグ細骨材を使用したジオポリマーモルタルの諸特性: コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1881-1886, 2018
- 16) 佐川孝広, 名和豊春: X線回折リートベルト法による高炉スラグ量の定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010