

論文 高温環境下におけるジオポリマー硬化体の物理的および化学的变化

八代 大生*1・新 大軌*2・周藤 将司*3・三代 龍之輔*4

要旨: 本研究では、加熱によるフライアッシュベースのジオポリマーおよびフライアッシュの体積の20%を高炉スラグ微粉末で置換したハイブリッド型ジオポリマーの物理的および化学的变化を検討した。その結果、フライアッシュベースのジオポリマーは加熱に伴い圧縮強度は増加したが、ハイブリッド型ジオポリマーは加熱に伴い圧縮強度が低下した。これはハイブリッド型ジオポリマー中に存在するC-A-S-Hが熱分解され、微細構造が粗になり生じると考えられた。また、高炉スラグ微粉末の最適置換率を強熱減量から求めた結果、C-A-S-Hの生成が少ない置換率10%の試料が優れた耐火性を有する可能性があることを明らかとした。

キーワード: 高温環境下, ジオポリマー, 化学的变化, 圧縮強度, モルタル, XRD

1. はじめに

結合材にセメントを用いたコンクリートが受熱すると強度や耐久性が低下することが知られている。例えば、受熱温度が300°Cを超えると圧縮強度は低下し始め、受熱温度500°Cに達すると圧縮強度は健全時の1/2程度まで低下する^{1, 2)}。そのメカニズムとしては、セメントペーストは受熱することで、構成要素の大部分を占める水酸化カルシウム(CH)やケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)が分解し、微細構造が粗になることによるものとされている。

一方で、フライアッシュ(FA)のみを原料としたジオポリマー(GP)の主生成物はケイ素やアルミニウムを含む非晶質物質とケイ酸アルカリ溶液との反応によって得られる縮重合体であるため、水和物を生成しない。よってFAのみのGPを結合材として用いたコンクリートは高温においても水和物の脱水熱分解反応が生じないため、耐火性に優れていると考えられ、高度な耐火性が求められる道路トンネル、溶鉱炉付近のキャストブル耐火物などへの適用が期待されているが、FAのみのGPの高温環境下での強度変化や生成物変化について検討した例は少ない。

活性フィラーにFAのみを使用したGPは、初期強度が低いことが知られている。そこで、FAの一部を高炉スラグ微粉末(BFS)で置換しC-A-S-Hを生成させ、初期強度発現性を高めたハイブリッド型ジオポリマー(HBGP)が注目されており、HBGPの耐火性に関する研究もなされている。その中で、一宮ら³⁾はFAにBFSを10%置換した水アルカリ比の異なるHBGPを500°Cで加熱した結果、試料の水アルカリ比によっても異なるが、未加熱時と比較して圧縮強度が増加するあるいは圧縮強度の低下が小

さいため、セメントと比較して優れた高温抵抗性を有していると報告している。一方で、Saludungら⁴⁾によると、FAにBFSを15%置換したHBGPを500°Cで加熱した結果、圧縮強度は未加熱時と比較して約50%低下することを報告している。これらの加熱による圧縮強度の変化の相違^{3, 4)}は、使用したFAの特性が異なることやBFSの置換率が異なるためHBGP中に生成するC-A-S-H量も異なるためであると考えられる。よって、HBGPを耐火材料として建設分野へ利用するためには、FAとBFSの混合比率を変化させ、生成するC-A-S-H量をコントロールし初期強度発現性と耐火性の2つを兼ね備えた材料設計が必要となる。しかしBFSの置換率がC-A-S-Hの生成量およびGPの耐火性に与える影響を検討した例は少ない。

本研究では、GPの耐火材料としての適用を目的としFAを100%使用したGPおよびFAにBFSを一部置換したHBGPの高温環境下での変形性や物理的および化学的变化などをセメントと比較検討し、さらにBFS置換率がGPの耐火性に及ぼす影響についても検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用した材料を表-1に示す。本検討では、セメントモルタルにおけるセメントに相当する活性フィラーには、FAを単独で使用した系(FA100%GP)とFAと固化促進のためにBFSをFAの体積の20%を内割りで置換した系(FA80-BFS20%HBGP)のGPモルタルを作製した。アルカリ溶液はケイ酸ソーダ(WG)とNaOHを混合して、打設を行う24時間前に作製した。WGの扱いにくさを考慮して、予めWGの質量の0.5倍の水をWGに混合した。残りの水

*1 島根大学 自然科学研究科 環境システム科学専攻 修士課程 (正会員)

*2 島根大学 学術研究院 環境システム科学系 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 松江工業高等専門学校 環境・建築工学科 准教授 博士(農学) (正会員)

*4 松江工業高等専門学校 専攻科 生産・建設システム工学専攻 (非会員)

表-1 使用材料

記号	材料
C	研究用普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
NaOH	水酸化ナトリウム, 10mol/L
WG	JIS K 1408 1号水ガラス
FA	JIS A 6201 フライアッシュII種, 密度2.15g/cm ³
BFS	高炉スラグ微粉末, 密度2.91g/cm ³ , 比表面積4000cm ² /g
S	セメント強さ試験用標準砂, 絶乾密度2.64g/cm ³
W	水道水

表-2 GP モルタル配合表(1L 当たり)

単位 ; g	FA	BFS	S
FA100%GP	516	0	1297
FA80-BFS20%HBGP	416	143	
使用したアルカリ溶液			
1.5倍WG	NaOH	水	
232	52	64	

表-3 セメントモルタル配合表(1L 当たり)

単位 ; g	S	C	W
セメントモルタル	1398	466	233

は、練り混ぜ時に混入した。また、細骨材には標準砂を絶対乾燥状態で使用した。

研究用普通ポルトランドセメントを用いたモルタルに対しても同様の実験を行い、GPモルタルと比較した。

2.2 圧縮試験測定用の試料の作製

FA100%GPおよびFA80-BFS20%HBGPモルタルの配合は表-2に示す通りである。GPモルタルの練り混ぜについては卓上モルタルミキサー(最大練り混ぜ容量: 15リットル, 主軸回転数: 37rpm, 副軸111rpm)を用い、バッチ量は2リットル程度として行った。

FA100%GPモルタルの作製方法としては、粉体とアルカリ溶液を投入して1分間、標準砂を入れて2分間、その後練り混ぜを一時停止し、10秒間掻き落としを行った後、直ちに練り混ぜを再開し1分間練り混ぜた。また、FA80-BFS20%HBGPモルタルに関しては、粉体投入後、1分間低速で練り混ぜ、粉体同士を混合した。その後の工程はFA100%GPモルタルと同じである。

圧縮強度試験用の試料は、JSCE-F506-2018「モルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験用円柱試料の作り方(案)」を参考に、直径50mm×高さ100mmの円柱型枠に打設して作製した。また、加熱による形状変化を観察するために、圧縮強度試験用と同様のモルタルを市販の製氷皿に充填し、試料(縦110×横10×高さ20mm)を作製した。

打設後の試料は打設面にラップをし、封緘養生で養生を行った。養生条件については、打設直後の試料を相対湿度95%に設定した恒温恒湿器に入れ、1時間で60℃まで上昇させ、1日等温で保持した。その後、試料を取り出し、養生日数が合計で28日となるように、実験室内で27日間養生した。なお、養生期間中の試料は常時封緘養生の状

態にあり、実験室内の気温は概ね15℃から20℃であった。

セメントモルタルの配合を表-3に示す。セメントモルタルについても同様にモルタルミキサーを用いてJIS R 5201: 2015に準拠し練り混ぜを行った。その後、ジオポリマーモルタルと同様の打設方法で打設を行った。養生条件については蒸気養生は行わず、実験室内で28日間封緘養生を行った。なお、すべての測定は養生28日目の試料を用いて行った。

2.3 化学的分析用の試料の作製

圧縮強度試験用の試料は標準砂を含んでいるため、XRD や強熱減量の測定等の化学的分析の結果に影響すると考えられる。そのため、化学的分析を行う試料は2.2で作製した圧縮強度試験用のモルタル試料と配合比および養生方法を変えず、標準砂のみを除去したものを作製した。

2.4 BFSの最適置換率に関する実験試料の作製

圧縮強度試験用および形状変化観察用のモルタルは、粉砕などの処理を行わず、マッフル炉を用いて、200, 400, 600, 800, 1000℃の各温度で加熱を行った。加熱条件については養生後、型枠から脱型した試料をマッフル炉に入れ、3時間で設定温度まで上昇させ、その後9時間設定温度で保持した。その後は炉内で室温程度まで放冷した。

化学的分析を行う試料については、1~2cmに粉砕して、圧縮強度試験用のモルタルと同様の条件で加熱した。

2.5 試験項目について

圧縮強度試験は、未加熱および200, 400, 600, 800, 1000℃で加熱したモルタル試料に対して行った。試験にはアンボンドキャッピングを用い、一度の試験に対して3本の試料を供した。

化学的分析用に作製した試料を用いて、強熱減量およびXRDの測定、SEMによる組織の観察を行った。

強熱減量については、200, 400, 600, 800, 1000℃で加熱を行い、各温度に対しての強熱減量をJIS R 5202: 2010に準拠し測定した。また、付着水による質量減少を考慮し、予め105℃で質量が恒量になるまで加熱し、試料を絶対乾燥状態とした質量減少率を差し引いた。

XRDの測定については、加熱した試料および各設定温度で加熱後の試料を微粉砕したのち、粉末X線回折内部標準法(Burker, D2 PHASER; 管球Cu, 管電圧30kV, 電流10mA)により各試料の結晶相を同定した。

また、未加熱の試料、および各設定温度で加熱した試料の微細構造をSEMを用いて観察した。

3. 結果と考察

3.1 加熱に伴う外観の変化

耐火性を評価する上で、重要となる要因の一つとして加熱による形状変化がある³⁾。よってまず初めに、加熱

に伴う形状の変化について検討した。

写真-1 にセメントモルタル, FA100%GP モルタル, FA80-BFS20%HBGP モルタルの加熱温度別の試料の形状変化の様子を示す。いずれの硬化体も加熱に伴い目視できるほど形状の変化は確認できなかった。一宮ら³⁾は GP ペースト試料を用いた検討で, 高温加熱時の形状安定性は練り混ぜ時に用いるアルカリ溶液の水アルカリ比や BFS の置換率によって異なり, 水アルカリ比や BFS の置換率の条件によっては GP ペーストが 800°C 程度の加熱を受けることで形状が変化することを報告している。本検討で, 上記のような変化が確認できなかった理由の一つとしては, 試料にモルタルを使用したため, 細骨材の存在が形状安定性に寄与しているためであると考えられる。

以上より, GP はペースト試料ではなくモルタル試料であれば高温時の形状安定性は加熱温度 1000°C まではある程度確保できると考えられる。

次に, 加熱による各試料の物理的変化を捉えるために, 圧縮強度試験を実施した。

3.2 圧縮強度試験

各モルタル試料の養生 28 日目時点の未加熱時の圧縮強度を基準(100%)とした加熱に伴う圧縮強度比の変化を図-1, 加熱に伴う圧縮強度の変化を図-2 に示す。

セメントモルタルの場合は加熱温度 200°C で一度, 圧縮強度はわずかに増加するが加熱温度 400°C から低下し始め, 加熱温度 600°C では圧縮強度は未加熱時の約 1/2 程度まで下がり, 加熱に伴い圧縮強度が低下する様子が確認された。その後も加熱温度の上昇とともに圧縮強度は下がり続け, 加熱温度 1000°C では未加熱時と比べ圧縮強度は約 95% 減少した。

これに対して, FA100%GP モルタルは未加熱時の圧縮強度は約 4N/mm² 程度であったが, 加熱温度 200°C で圧縮強度は未加熱時と比較して約 5 倍程度にまで上昇し, 圧縮強度は約 20N/mm² となった。その後, 加熱温度 600°C までは圧縮強度の増加の割合は未加熱時と比較して 400°C で約 4 倍, 600°C で約 3 倍と一時低下するが, 加熱温度 800°C 以上では圧縮強度は再び上昇し, 加熱温度 1000°C で圧縮強度は未加熱時の約 3.5 倍の数値(約 16N/mm²)となり, 加熱により圧縮強度の低下は確認できず, むしろ圧縮強度は増加した。

一方, FA80-BFS20%HBGP モルタルは FA100%GP モルタルと異なり, 加熱に伴い圧縮強度が増加する傾向はなく, むしろ加熱に伴い圧縮強度は低下するセメントモルタルに類似した傾向が確認された。

以上より, セメントモルタルと FA100%GP モルタルを比較した場合, FA100%GP モルタルはセメントモルタル



写真-1. 高温時の形状安定性試験の結果の例
左からセメントモルタル, FA100%GP, FA80-BFS20%GP
加熱温度並び順, 1000, 800, 600, 400, 200, 未加熱)

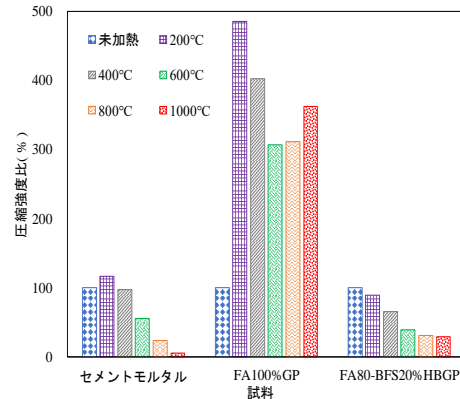


図-1. 各モルタル試料の加熱に伴う
圧縮強度比の変化

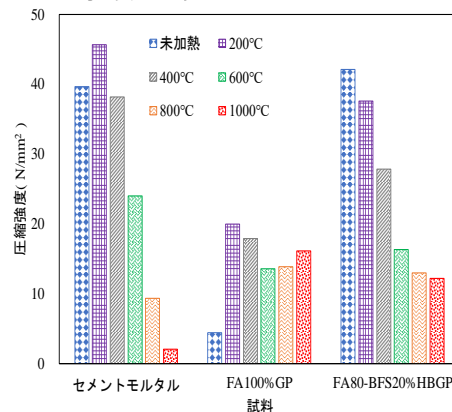


図-2. 各モルタル試料の加熱に伴う
圧縮強度の変化

より耐火性の観点では優れていると考えられる。しかし, FA ベースの GP → BFS を 20% 置換した HBGP の場合, 耐火性は低下することが明らかとなった。

3.3 加熱に伴う硬化体の質量変化

化学的分析用の試料に対して, 200, 400, 600, 800, 1000°C で加熱した際の質量減少を測定した。強熱減量の結果を図-3 に示す。

セメント硬化体は 1000°C の加熱で質量減少率が約 14% となっており, 各加熱温度においても 3 つの試料の中で最も高い質量減少率となっている。

一方で, FA100%GP 硬化体では, 質量減少率の値が 1000°C で約 4% 程度となっており, 3 つの試料の中で一番小さい値となった。しかし, FA80-BFS20%HBGP は 1000°C の加熱で質量減少率が約 6% となっており, FA100%GP と比較すると高い値となり, 質量減少率の値

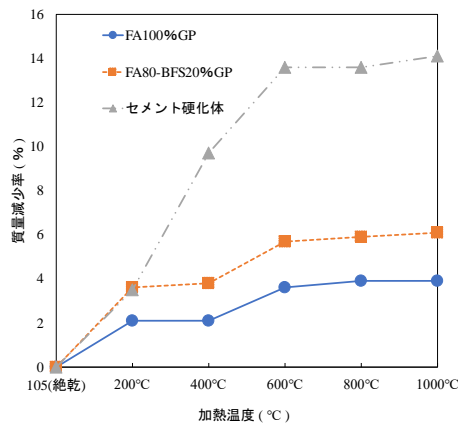


図-3. 各ペースト試験体の強熱減量

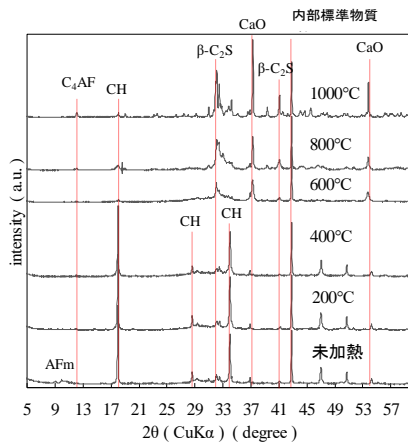


図-4. セメント硬化体の加熱による結晶相の変化

は高い順にセメント硬化体>FA80-BFS20%HBGP>FA100%GP となった。また 3.2 の加熱に伴う圧縮強度の低下の割合は高い順にセメント硬化体>FA80-BFS20%HBGP>FA100%GP であり、質量減少率は加熱による圧縮強度の変化と相関関係があると考えられる。

3.4 加熱に伴うセメントおよびHBGPの強度低下メカニズム

図-4に加熱に伴うセメント硬化体の結晶相の変化を示す。前報²⁾と同様に、セメント硬化体は、CH、AFm や AFt などのカルシウムアルミネート系水和物、C-S-H および β -C₂S の未水和分が確認された。加熱温度が 200°C では AFm や AFt に由来するカルシウムアルミネート系水和物の分解に伴いピークが消失した。さらに加熱温度 600°C においては CH 由来のピークが著しく減少し、C-S-H のピーク強度も減少しており、これは水和物の分解によるものと考えられる。吉田ら²⁾は加熱したコンクリート試料を SEM および偏光顕微鏡で観察した結果、加熱温度の上昇に伴い、組織が粗なることを報告しており、これは CH、C-S-H のような水和物の分解により生じていると考えられる。よって、加熱に伴うセメント系水和物の分解が、セメントモタルの圧縮強度が低下した理由およびセメント硬化体の質量減少率が増加した理

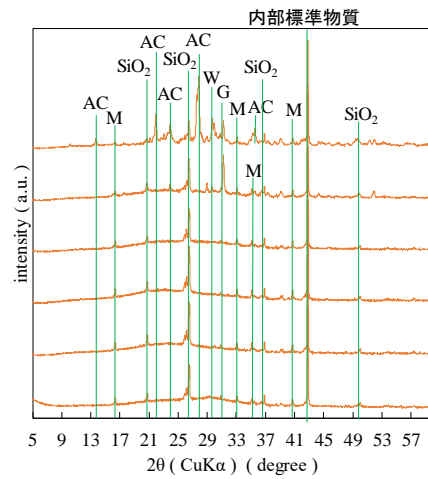


図-5. FA-BFS20%HBGP の加熱による結晶相の変化

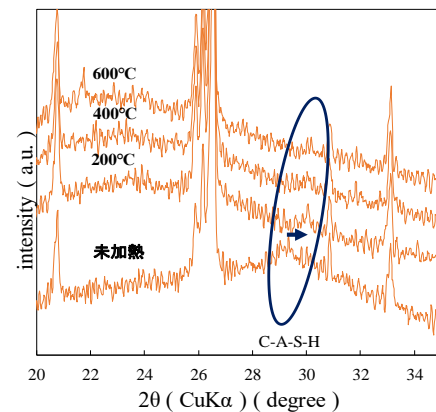


図-6. 加熱による C-A-S-H の分解

由であると考えられる。

FA80-BFS20%HBGP 硬化体の結晶相の変化を図-5 に示す。未加熱の FA80-BFS20%HBGP 硬化体は、未反応の FA 由来の Quartz や Mullite のピーク、さらに $\theta=29^\circ$ 付近に C-A-S-H のブロードなピークが確認された。800°C 以上で Gehlenite(Ca₂Al₂SiO₇)のピークが出現し、1000°C の加熱で Anorthoclase((Na,K)AlSi₃O₈), Wollastonite(CaSiO₃) のピークが出現した。Gehlenite(Ca₂Al₂SiO₇) や Wollastonite(CaSiO₃)は置換した BFS に Ca 成分が含まれているため生成したと考えられる。

特に C-A-S-H の分解挙動に着目し、図-6 に FA80-BFS20%HBGP の加熱に伴う $\theta=29^\circ$ 付近のピークの変化を示す。C-A-S-H のピークは 200°C の加熱でピークは小さくなると同時に高角側にシフトしており、C-A-S-H の分解と構造の変化が生じていると考えられる。また、その後 400, 600°C の加熱で C-A-S-H のピークは徐々に減少しており、硬化体の質量減少の結果から合わせて考えると C-A-S-H が熱分解していると考えられる。Saludung ら³⁾ は SEM-EDS を用いて FA に BFS を置換した GP 硬化体の組織観察を行ったところ、BFS を置換した GP は C-A-S-H の生成が確認され、C-A-S-H が加熱に

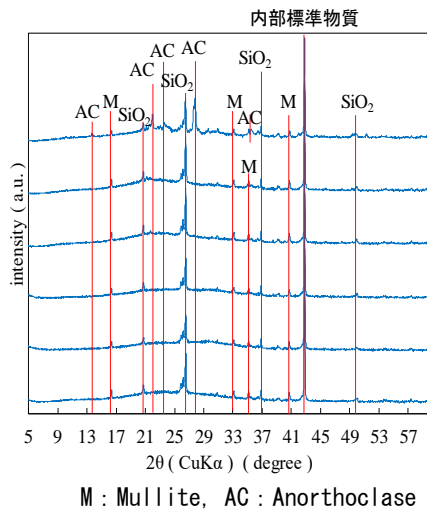


図-7. FA100%GP の加熱による結晶相の変化

に伴い分解することで微細構造が粗になることを報告している。よって加熱に伴う C-A-S-H の分解が FA80-BFS20% HBGP モルタルの圧縮強度が低下した理由および HBGP 硬化体の質量減少率が増加した理由であると考えられる。

以上のように加熱に伴う圧縮強度の変化はセメントモルタルでは CH および C-S-H が加熱により熱分解、FA80-BFS20%HBGP モルタルでは BFS に含まれる Ca 成分により生成した C-A-S-H などの水和物が熱分解し、微細構造が粗になることで生じていると考えられる。また、このような水和物の分解は脱水を伴う反応であるため、水和物の分解には質量減少が生じる。このことから、加熱による質量減少の値は水和物がどの程度熱分解したのかを知ることができるため、耐火性を簡易的に評価できる可能性があると考えられる。

3.5 加熱に伴う FA100%GP の強度増加メカニズム

FA100%GP 硬化体の加熱に伴う結晶相の変化を図-7 に示す。未加熱の FA100%GP 硬化体は、未反応の FA 由来の Quartz や Mullite のピークが確認され、加熱温度 800°C まで結晶相に変化はないが、1000°C の加熱では Anorthoclase((Na,K)AlSi₃O₈)のピークが出現した。このように、FA100%GP 硬化体では加熱温度 800°C まで結晶相の変化はほぼ生じない。加熱温度 800°C まで結晶相がほぼ変化しない理由として、FA100%GP 硬化体は XRD では確認できないアルミノケイ酸塩の縮重合体を形成して硬化していると考えられ、硬化体内部に水和物が存在せず、熱分解反応が生じないためであると考えられる。

次に 3.2 で FA100%GP モルタルで圧縮強度が加熱温度 200°C で未加熱時の 5 倍程度にまで上昇し、その後加熱温度 400, 600°C で未加熱時からの増加の割合が一時低下するが、800°C 以上で再び増加する傾向が確認された理由について考察した。

まず初めに加熱温度 200, 400, 600°C で加熱に伴い圧

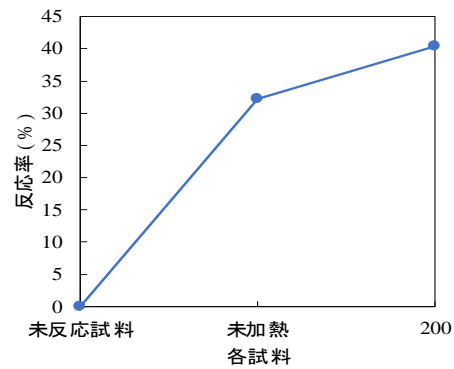


図-8. 加熱に伴う FA のガラス相 (22°) の反応率の変化

縮強度が増加した理由を考察した。図-8 に式(1)を用いて FA のガラス相に由来する $\theta=22^\circ$ のピークより算出した加熱による FA の反応率の変化を示す。

$$\alpha(t) = 100 - \frac{\frac{S_i(t)}{S_{MgO}(t)} \times \frac{100}{100 - ig.loss(t)}}{\frac{S_i(0)}{S_{MgO}(0)} \times \frac{100}{100 - ig.loss(0)}} \times 100 \quad (1)$$

$\alpha(t)$: t 日養生させた試料 i の反応率

$S_i(t)$: t 日養生させた試料の XRD から得られた i のピーク強度

$ig.loss(t)$: t 日養生させた試料の強熱減量

$S_i(0)$: 未反応の試料の XRD パターンから得られた i のピーク強度

$ig.loss(0)$: 未反応の試料の強熱減量

FA のガラス相の反応率は養生 28 日の未加熱時において約 32% であるが、200°C の加熱で反応率が約 8% 増加した。本研究では設定温度まで 3 時間で升温し 6 時間保持するという加熱プログラムを用い、比較的大きいサイズのモルタルを加熱している。升温速度が遅くモルタルのサイズが大きいため、加熱中、モルタル内部のアルカリ溶液が完全に空气中に逸散するのに時間がかかり、試料内部に残ったアルカリ溶液と FA がゆっくりと加熱され、高温で FA とアルカリ溶液との反応が急激に進行し圧縮強度が増加したと考えられる。また、加熱温度 600°C が加熱温度 200°C と比較して、未加熱時からの圧縮強度の増加の割合が低くなる理由としては、加熱温度 600°C は加熱温度 200°C と比較して加熱温度はもちろんであるが升温速度も上がるため、モルタル内部に存在しているアルカリ溶液が加熱温度 200°C と比較して速い速度で空气中に逸散すると考えられ、FA の反応が高温でアルカリ溶液に刺激される時間が短くなり、圧縮強度の増加が少なくなると推察される。よって、これが加熱温度 600°C の圧縮強度が加熱温度 200°C の圧縮強度と比較して、未加熱時からの増加の割合が低い理由であると考えられる。

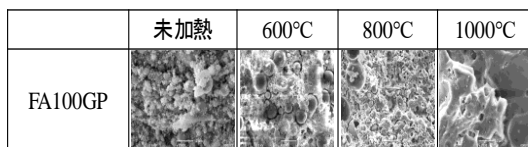


図-9. FA100%GP の加熱に伴う SEM 画像の変化

次に加熱温度 800°C以上で再び圧縮強度が増加した理由を考察した。図-9 に FA100%GP 硬化体の加熱温度別の SEM 画像を示す。FA100%GP 硬化体は 600°Cまでは組織はほぼ変化していないが、加熱温度 800°Cを超えると組織が焼結し緻密化する様子が確認できる。これが、3.2 で加熱温度 800°C以上で FA100%GP 硬化体において加熱により圧縮強度が再び増加していく理由である。

3.6 BFS の最適置換量に対する考察

3.4 の結果より強熱減量の値は、加熱に伴う圧縮強度の変化と密接に関係しているため、耐火性を簡易的に評価する 1 つの重要な指標になることが明らかになった。次に、BFS の置換率を 10, 20, 30 に変化させた HBGP 硬化体を作製し、強熱減量を測定することで置換量の最適値を考察した。以下に、実験操作を示す。

FA は JISII 種灰、BFS はこれまでの検討と同様のものを使用した。アルカリ溶液には WG を使用せず NaOH 水溶液(5mol/L)のみを用いた。また、粉体と NaOH 水溶液の体積比は 1 : 1 とし、手練りで 10 分間練り混ぜ、スチロール瓶を用いて 60°C の恒温環境下で 28 日間封緘養生した。また、強熱減量については 2.5 で記述した方法と同様の測定を行った。

図-10 に BFS の置換率を 10, 20, 30 に変化させた HBGP 硬化体の強熱減量の結果を示す。

BFS の置換率が 10%の試料(FA : BFS=9 : 1)が 1000°C 加熱時で約 6%と一番低い値となり、FA : BFS=8 : 2 および FA : BFS=7 : 3 では 1000°C 加熱時の強熱減量の値は 9%でほぼ同じ値となった。以上の結果から FA : BFS=9 : 1 の試料が水和物の分解が一番生じておらず圧縮強度の低下が低いと考えられる。

なお、FA : BFS=8 : 2 の試料の強熱減量と 3.3 の FA80-BFS20%HBGP の強熱減量は両者同じ置換率であるが強熱減量の値に差が生じた。これは、アルカリ溶液に対する WG の使用の有無や養生方法が異なるなどの因子が影響していると考えられる。

以上より、本検討の範疇では BFS の置換率が 20%を超えると耐火性が大きく低下すると考えられ、BFS の置換率 10%が耐火性に悪影響を与えない値であると推察される。なお、BFS の置換率 10%の試料の加熱による圧縮強度の変化の検討を行い、強熱減量の値と耐火性の関係について詳細に検討する必要があるが、これは今後の課題とする。

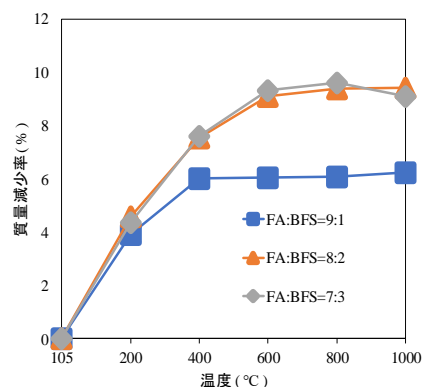


図-10. BFS の含有率別の HBGP 加熱による質量減少

4. まとめ

- (1) セメントモルタルおよび FA80-BFS20%HBGP モルタルは加熱に伴い、圧縮強度が低下する傾向が確認された。圧縮強度低下の理由としては、セメントペースト中に含まれる CH や C-S-H および FA80-BFS20%HBGP 中に存在する C-A-S-H が強熱により熱分解を受け組織の微細構造が粗になることで生じていると考えられる。
- (2) FA100%GP は加熱に伴い、圧縮強度が増加する傾向が確認された。加熱温度 200, 400, 600°C まで圧縮強度が増加した理由としては本検討では昇温速度が遅く、昇温過程においてモルタル試料中のアルカリ溶液が試料から逸散される速度が遅いため、試料内部に残ったアルカリ溶液と FA が高温で反応が促進され圧縮強度が増加したと考えられる。また、加熱温度 800°C 以上では組織が焼結し、圧縮強度が増加すると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建物の火害診断および補修・補強方法指針・同解説，2015
- 2) 吉田夏樹，新大軌，木野瀬透，俵あかり：火災の影響を受けたコンクリートの化学的変化に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.643-648，2017
- 3) 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，No.1，pp.1851-1856，2018
- 4) A. Saludung, et al. : effect of ggbs addition on properties of fly ash-based geopolymer at high temperatures, コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1991-1996，2019
- 5) 新大軌，吉田夏樹，俵あかり，高橋周：加熱によるセメント硬化体の化学的変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.649-654，2017