

## 論文 脱水ケーキ乾燥粉末を用いたジオポリマー硬化体に関する研究

李 柱国\*

**要旨:** 本研究では湿式砕石粉(De)を用いたジオポリマー(GP)を検討した。その結果として、今回の De サンプルのみを粉体として用いた GP は、適切なケイ酸ソーダ(WG)と苛性ソーダ(NH)の体積構成比をもつアルカリ溶液を使った場合、10MPa 以上の圧縮強度を有する。De と高炉スラグ微粉末(BFS)を併用した GP の強度は、WG のみをアルカリ溶液とした場合には高いが、NH のみをアルカリ溶液とした場合には大幅に低下する。また、De と BFS の併用系 GP は、強度が BFS の比表面積や混合率が高いほど増加し、高分子凝集剤を含有する De を使用しても耐酸性が優れ、湿式砕石粉由来の石英、曹長石および方解石などの結晶物質を含有する。

**キーワード:** ジオポリマー、湿式砕石粉、高炉スラグ微粉末、凝結時間、強度、耐酸性

## 1. はじめに

近年、川砂や川砂利等の天然骨材の枯渇に伴い、コンクリート用骨材として砕砂と砕石の利用が増え続けてきた。これまでの骨材供給構造の推移から鑑みても、コンクリート用骨材は今後も砕石、砕砂に依存せざるを得ない状況である。砕石、砕砂の製造方法には、湿式と乾式がある。前者では乾燥な砕石粉(以下、乾式砕石粉)が排出されるが、後者では濁水の沈殿・脱水処理に伴い脱水ケーキが発生する(以下、湿式砕石粉)。また、砕石、砕砂には、主に石灰質と珪酸質の2種類がある。前者は、石灰岩が原石で殆ど炭酸カルシウムの成分を有し、後者は SiO<sub>2</sub> に富み、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO 等の成分も含む安山岩、砂岩および粘板岩などを原石としている。

砕石粉の定義は明確になっていないため、砕石粉の発生量は精確に統計されていないが、湿式砕石粉の発生量は原石の約 10 %<sup>2)</sup>、砕石・砕砂を製造する際には生産量の約 1~2 %の微粒分(0.075mm 以下)発生する<sup>3)</sup>と言われ、一般社団法人日本砕石協会は、砕石粉の発生量が年間 1200 トンに達していると推計している<sup>4)</sup>。

乾式砕石粉については、既に JIS A 5041 として規格化され、高流動コンクリートの混和材として利活用されている。一方で湿式砕石粉に含まれる凝集剤(ポリ塩化アルミニウム(PAC)やアニオン系高分子凝集剤)はコンクリートの品質に悪影響を及ぼす。特に、アニオン系高分子凝集剤を含有する場合、湿式砕石粉を添加したコンクリートの流動性と強度は大きく低下する<sup>2)</sup>。実用化に向けて湿式砕石粉の研究実績も少ないため、まだ規格化に至っていない。したがって、湿式砕石粉は汚泥として産廃処理をするケースが多く、処分場、処理費および環境への影響などの問題がある。湿式砕石粉のリサイクルは、これらの問題を解決し、砕石・砕砂製造業界の環境負荷の軽減に寄与すると考えられる。

一方、近年、ジオポリマー(GP)の研究開発が注目されている。GP は、非晶質のアルミノシリケート粉末(活性

フィラー)とアルカリ溶液を混合することで硬化する無機材料である。同じレベルの流動性と圧縮強度を有するポルトランドセメントコンクリートに比べ、高炉スラグ微粉末(BFS)とフライアッシュを活性フィラーとした GP コンクリートの CO<sub>2</sub> 排出原単位は、日本の場合には 40-50%で低減できる<sup>5)</sup>。また、活性フィラーを混合したら、結晶質の固形廃棄物粉末でも不活性フィラーとして GP に使用できる<sup>6-8)</sup>。したがって、セメント・コンクリート分野の CO<sub>2</sub> 排出量を削減し、廃棄物処理の地域問題を緩和することから、GP の利用が期待されている。

先行研究として、著者<sup>8)</sup>は、石灰岩と硬質砂岩の乾式砕石粉と BFS を用いた GP モルタルとコンクリートの可使時間、強度および耐久性をそれぞれ考察した。この2種類の乾式砕石粉はアルカリ溶液との反応性が低く、非活性フィラーと区分されるが、粉体の 6-7 割で混合しても強度、特に曲げ強度が高い GP 硬化体を作製ができることを明らかにした。本研究では、湿式砕石粉を用いた GP 硬化体の性能について考察を行い、湿式砕石粉の新たなリサイクル方法を開発する。

## 2. 実験概要

## 2.1 湿式砕石粉

本研究では使用した湿式砕石粉(ここに、De と記す)は、山口県周南市では、硬質砂岩の湿式方法で砕砂を製造する濁水処理工程(凝集沈降と汚泥機械脱水)に排出された「脱水ケーキ」と称されるブロック状の固形物を乾燥・粗砕粉(図-1 参照)して、さらに比表面積が 8039 cm<sup>2</sup>/g になるまでポットミルで微粉碎したものであった。濁水の凝集沈降に使用された凝集剤はアニオン系高分子物であった。湿式砕石粉の絶対密度は 2.72 g/cm<sup>3</sup> であり、X 線蛍光分析(XRF)によって得られた化学組成を表-1 に示す。使用される前に湿式砕石粉を予め乾燥状態とした。

## 2.2 活性フィラー

本研究では、上記の湿式砕石粉をアルカリ溶液と単独

\* 山口大学 大学院 創成科学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

に混合した GP と、高炉スラグ微粉末(BFS)を併用した GP 硬化体を作製した。用いた BFS は JIS 規格品 3000 級 (比表面積 3200cm<sup>2</sup>/g, 密度 2.9g/cm<sup>3</sup>)と 4000 級(比表面積 4080cm<sup>2</sup>/g, 密度 2.9g/cm<sup>3</sup>)であった。XRF 分析による BFS の化学成分を表-1 に示す。

### 2.3 アルカリ溶液

市販の JIS 1 号水ガラス (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O モル比 2.1, 比重 1.54) をイオン交換水で 2 倍に希釈したもの (以下 1 号液と記す)と 10M の苛性ソーダ(NaOH)水溶液(比重 1.32, 以下 2 号液と記す)を所定の体積比で混合したものをアルカリ溶液(AS)として使用した。1 号と 2 号の体積比が 3 : 1 である場合にはここに 0 号液と呼ぶ。0 号液の SiO<sub>2</sub> と Na<sub>2</sub>O の質量濃度がそれぞれ 13.5%と 12.8%であり, SiO<sub>2</sub> と Na<sub>2</sub>O のモル比が 1.1 であった。

### 2.4 試験項目と方法

#### 2.4.1 GP ペースト試験

##### (1) 凝結時間と強度試験

湿式碎石粉とアルカリ溶液の混合物の凝結・硬化特性を検討するために、まず比表面積が 8039cm<sup>2</sup>/g の湿式碎石粉だけを粉体とした GP ペーストを練り混ぜた。調査として、液粉体比は 0.50 であり、1 号液と 2 号液を 4:1, 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3, 0:1 の体積比で混合した 7 種類のアルカリ溶液のいずれを使った。JIS R 5201(セメントの物理試験法)に準じて、ペーストの凝結時間を測定した。また、ペーストを練り混ぜた直後に、2×2×10cm の小角柱試験体をシリーズごとに 2 本計 14 本作製した。

次に、表-2 に示す調査で、湿式碎石粉の一部は BFS に代替され、異なるアルカリ溶液でペーストを練り混ぜ、凝結時間を測定し、耐酸性試験用の円柱供試体(直径 5cm×高さ 10cm)および強度試験用の小角柱試験体(2×2×10cm)をシリーズごとにそれぞれ 1 本と 2 本作製した。使用したアルカリ溶液は、凝結時間と強度試験の場合には 1 号液、2 号液および 0 号液であったが、耐酸性試験の場合には 0 号液のみであった。また、脱水ケーキの微粉砕時間管理の不具合で耐酸性試験に用いた湿式碎石粉の比表面積は 3400cm<sup>2</sup>/g であった。

GP ペーストの小角柱試験体を 24 時間 80℃で加温養生を行った後、20℃の養生槽においてさらに気中養生を 27 日間行った。28 日材齢に、小角柱試験体の真中を切断して、万能試験機で圧縮強度の測定を行った。シリーズごとに 3 つ(平均値±20%範囲外の結果を除き)や 4 つの測定結果の平均値を圧縮強度とした。

##### (2) 硫酸浸漬試験

耐酸性試験については、GP ペーストの円柱試験体を 20±3℃の気中で 26 日間封緘養生した。その後、2 日間 20℃±2℃の水中で浸漬して、吸水飽和後に表面乾燥状態にした。28 日材齢に、試験体を 5%硫酸溶液に浸漬し、7 日間ごとの質量変化を測定し、外観を撮影した。質量の測定は、硫酸溶液から試験体を取り出し後に水道水でよ



図-1 乾燥・粗粉碎した脱水ケーキ

表-1 粉体の化学組成 (wt.%)

粉体	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Others
BFS30	30.4	46.9	13.6	0.37	0.6	0.28	4.95	0.04	0.67	2.19
BFS40	32.7	45.1	13.7	0.37	-	0.30	4.92	0.04	0.63	2.25
De	56.0	9.1	17.1	8.20	2.4	2.90	2.70	0.20	0.90	0.50

[注] De: 湿式碎石粉, BFS30: JIS 3000 級 BFS, BFS40: JIS 3000 級 BFS

表-2 湿式碎石粉と BFS を用いた GP ペーストの調査

シリーズ	BFS の級	AS の種類	BFS/AS	AS/AF	試験
De3.0.40	3000	0 号液	40	0.60	凝結時間 圧縮強度
De3.1.40		1 号液			
De3.2.40		2 号液			
De4.0.30	4000	0 号液	30		硫酸浸漬
De4.0.50			50		

[注] AS: アルカリ溶液, AF: 粉体(De+BFS), AS/AF: アルカリ溶液と粉体の質量比

くすすぎ、乾いた清潔な布で水分を十分にふき取り行った。しかし、表面劣化は少なかったため、寸法の変化を測定しなかった。

##### (3) XRD 分析

XRD 分析に使われたサンプルは、比表面積が 3400cm<sup>2</sup>/g の湿式碎石粉に BFS4000 を 30%や 50%混合し、0 号液を用い、液粉体比が 0.44 であった GP ペースト硬化体であった。GP ペースト硬化体は 20℃の気中で 56 日間封緘養生された。

XRD 分析は、CuKα線源を用い、40kV-120mA 電源、1°-1°-0.3mm スリット、走査速度 4°/min, 0.02° ステップスキャンといった条件で 3-60° の 2θ 範囲で行った。

#### 2.4.2 GP モルタル試験

後述するように、湿式碎石粉を単独に用いた GP 硬化体の強度は高くないため、BFS を混合して GP を作製するのは得策であると考えられる。本研究では、湿式碎石粉と BFS を用いた GP モルタルの強度に及ぼす BFS の粉末度・混合率およびアルカリ溶液の種類の影響を検討した。用いた GP モルタルの調査を表-3 に示す。細骨材として、表乾状態の海砂は、表乾密度 2.56 g/cm<sup>3</sup>, 単位容積

質量 1.63kg/L, 吸水率 1.81%, 実積率 65.0%, 粗粒率 2.87, 塩化物量 0.002%, 最大寸法 5.0mm であった。

モルタルミキサーで GP モルタルを練り混ぜた。まず、粉体をミキサーに投入して 60 秒間混合してから、粉体と海砂を 1 分間混合した。その後、アルカリ水溶液を加えてさらに 2 分間練り混ぜた。練り混ぜた後に、振動台による締固めで、4×4×16cm の角柱試験体をシリーズごとに 3 本作った。試験体が凝結した後に、室温と加温で各 3 本の試験体を養生した。前者は 20°C の養生槽において気中養生を 28 日間行い、後者は 80°C で 24 時間の加温養生後に 27 日間常温養生を行った。どちらの養生方法においても養生期間中はラップで試験体を封緘した。28 日材齢に、万能試験機で強度試験を行った。曲げ強度は 3 つの測定結果の平均値で、圧縮強度は 6 つの曲げ試験後の折片の測定結果の平均値であった。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 GP ペースト

##### 3.1.1 湿式砕石粉を単独に用いた GP ペーストの凝結時間と強度

図-2 は、湿式砕石粉と、1 号液と 2 号液を 7 種類の体積比で混合した AS を使用した GP ペーストの始発・終結時間を示すものである。グラフが 300 分以上伸びているシリーズは、6 時間を超えて凝結が始発せず、測定を終了したものである。図-2 に示すように、湿式砕石粉を単独に用いた GP ペーストの凝結は、1 号液（水ガラス水溶液）の体積割合が大きいほど遅い傾向が見られた。2 号液（苛性ソーダ水溶液）の割合を大きくすると、凝結時間は短くなるということが認められた。2 号液と 1 号液の体積比は 1.0 を超える場合、凝結が速く、始発時間は約 150 分以内であった。苛性ソーダ水溶液の体積割合が大きいほど、強アルカリの刺激で湿式砕石粉のイオン溶出が容易になるためであると思われる。

図-3 は、湿式砕石粉を単独に使用した GP ペーストの圧縮強度と AS の構成の関係を示すものである。同図に示すように、GP ペーストの圧縮強度は 7 MPa 以上で、1

表-3 湿式砕石粉と BFS を用いた GP モルタルの調査

シリーズ	BFS の級	AS の種類	BFS/AS	AS/AF	S/AF
De4.0.20	4000	0 号液	20	0.60	2.0
De4.0.30			30		
De4.0.40			40		
De4.0.50			50		
De3.0.40	3000	0 号液	40		
De3.0.50			50		
De4.1.30	4000	1 号液	30		
De4.1.40			40		
De3.1.40	3000	1 号液	40		
De4.2.30	4000	2 号液	30		
De4.2.40			40		
De3.2.40			3000	2 号液	40

[注] AS: アルカリ溶液, AF: 粉体(De+BFS), AS/AF: アルカリ溶液と粉体の質量比, S/AF: 海砂と粉体の質量比

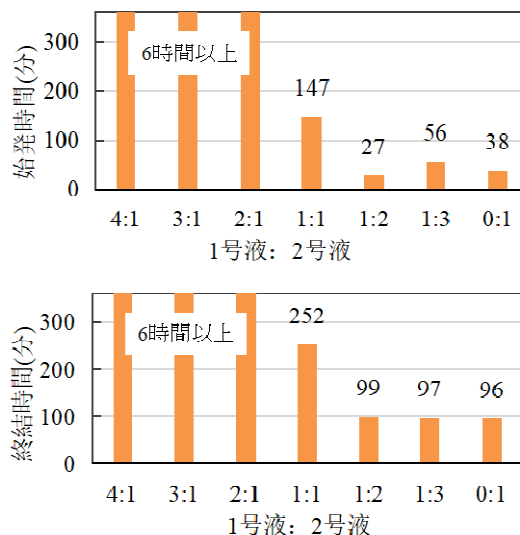


図-2 湿式砕石粉を単独に用いた GP ペーストの凝結時間およびアルカリ溶液の影響

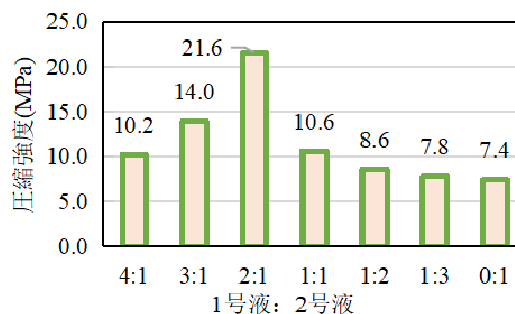


図-3 湿式砕石粉を単独に用いた GP ペーストの圧縮強度およびアルカリ溶液の影響

号液と 2 号液の体積比が 3:1 や 2:1 であれば、ペーストの強度は大きい傾向が見られた。2:1 の体積比で圧縮強度は最大になり、21.6 MPa に達した。この結果より、湿式砕石粉を用いて GP を作製するときに、2:1 や 3:1 のアルカリ溶液(AS)の使用が薦められる。

久保井・西田は、原子吸光分析で京都府亀岡市で産出された硬質砂岩の乾式砕石粉に含有する非晶質物質の化学成分を分析した<sup>9)</sup>。酸化物として非晶質 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> および SiO<sub>2</sub> はそれぞれ 5.81%、4.38% および 5.16% 計 15.35% であった。岩石風化の進行に伴って化学的に不安定な非晶質物質が多くなり、結晶質であっても非晶質物質と同様、化学的に不安定で溶解性が大きくなる。また、人工的に細粒化されれば粒子の比表面積が増大し、表面や内部の不安定な物質が容易に溶出されやすい状態になると指摘している。後述の XRD 分析の結果に示すように、今回に使用した硬質砂岩の湿式砕石粉中の結晶物質の一部が溶出された可能性がある。非晶質および弱結晶質物質の溶出によって、今回の湿式砕石粉を単独に使っても GP 硬化体はある程度の強度を有している。

苛性ソーダ水溶液の体積割合が大きいほど、凝結時間は図-2 に示すように短かったが、硬化体の強度は図-3 に

示すように小さかった。ジオポリマーの縮重合による硬化反応は、 $\text{Si}^{4+}$ と  $\text{Al}^{3+}$ や  $\text{Ca}^{2+}$ が欠かせない。水ガラス水溶液は  $\text{Si}^{4+}$ を提供するするため、粉体から  $\text{Al}^{3+}$ や  $\text{Ca}^{2+}$ の溶出がアルカリ溶液の刺激で必要となる。したがって、苛性ソーダ水溶液の体積割合が大きいと、碎石粉からの  $\text{Al}^{3+}$ や  $\text{Ca}^{2+}$ の溶出が増え、GP の凝結は速くなるが、Si の不足は硬化後の強度が小さい原因であると思われる。一方、水ガラス水溶液の割合が多すぎると、アルカリ溶液の刺激能力が弱くなり、碎石粉からの  $\text{Al}^{3+}$ や  $\text{Ca}^{2+}$ の溶出は少なくなるため、GP の凝結が遅くなり、硬化後の強度は小さい。即ち、GP の強度を高くするために、1号液と2号液適切な割合で混合する必要がある。

### 3.1.2 湿式碎石粉と BFS を併用した GP ペーストの凝結時間と強度

湿式碎石粉と BFS を併用した GP ペーストの凝結時間と圧縮強度を図-4 に示す。湿式碎石粉を単独に使用した GP に比べ、JIS 3000 級の BFS を 40%混合したことによって圧縮強度が明らかに増加した。1号液(水ガラス水溶液)のみを使用した De3.1.40 の凝結時間が短く、強度は最大であった。しかし、2号液(苛性ソーダ水溶液)を使ったシリーズ De3.2.40 の圧縮強度は小さかった。また、苛性ソーダと水ガラスを併用したシリーズ De3.0.40 の圧縮強度はシリーズ De3.1.40 とほぼ同じであった。3シリーズの GP の流動性に大差はなく、凝結時間も BFS 単独の GP とほぼ同じ水準であることから、凝結時間の短かったのが BFS を添加したためと思われる。

この結果は、 $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ などを溶出し難い結晶質碎石粉と  $\text{Ca}^{2+}$ などを溶出しやすい非晶質 BFS を併用する場合、苛性ソーダの増加で碎石粉の溶出を促進することよりも、水ガラスの増加による  $\text{Si}^{4+}$ の大量提供が GP 強度の向上に有効であることを示唆している。

### 3.1.3 湿式碎石粉と BFS を併用した GP ペーストの耐酸性

図-5 に、GP ペースト硬化体を 5%硫酸溶液に浸漬した後の質量変化率を示す。6 週の浸漬で試験体の質量減少率は 1%以下であった。JIS 4000 級の BFS を 30%添加した試験体の方が質量減少率は若干高かった。つまり、碎石粉の割合が高くとされると、GP 硬化体の耐酸性は低下する。表-4 に示すように、いずれのシリーズの試験体でも、表面のツヤが浸漬後に無くなったが、形状は保持され、表面剥落を生じなかった。したがって、高分子凝集剤を含む湿式碎石粉を用いた GP でも硫酸に対する抵抗性が優れているといえる。

### 3.1.4 湿式碎石粉と BFS を用いた GP 硬化体の XRD 分析

図-6 に、湿式碎石粉とそれを用いた 3 シリーズの GP ペースト硬化体の XRD チャートを示す。湿式碎石粉 XRD チャートに、石英、方解石、曹長石、カオリナイト、緑泥石および白雲母などのピークが見られるが、ブロー

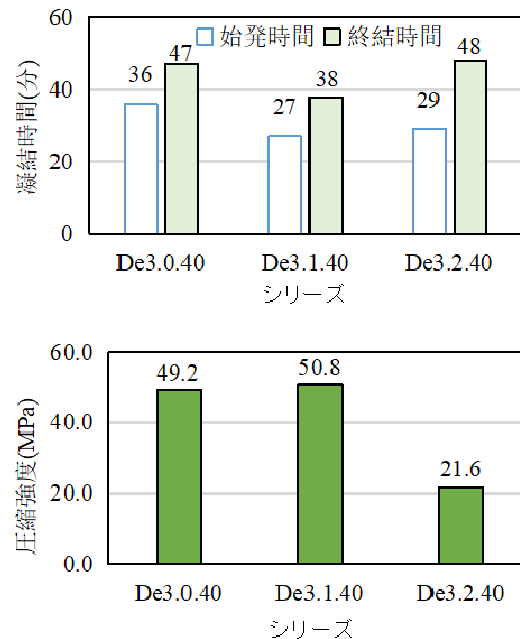


図-4 湿式碎石粉と BFS を併用した GP ペーストの凝結時間と圧縮強度に及ぼすアルカリ溶液の影響

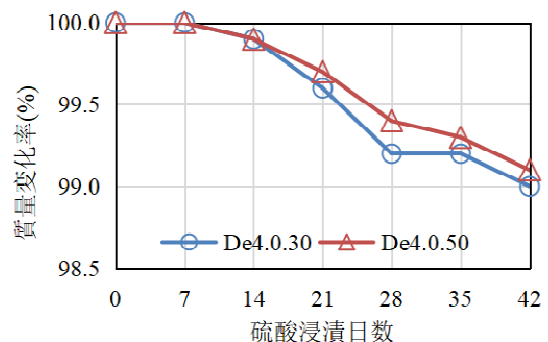
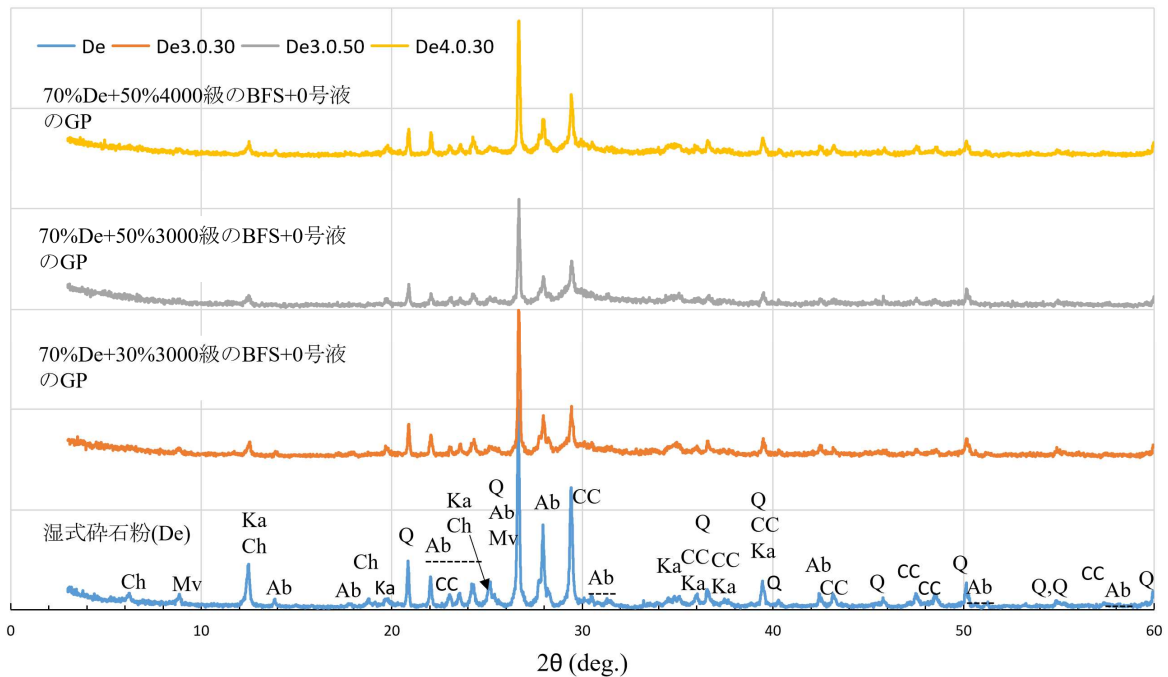


図-5 湿式碎石粉と BFS を併用した GP ペーストの硫酸浸漬後の質量変化

表-4 硫酸溶液における浸漬前後の表面状況

De4.0.30		De4.0.50	
打込み面		打込み面	
浸漬の前			
打込み面		打込み面	
6 週間浸漬後			



[Notes] Q: 石英 Quartz, Ab: 曹長石 Albite, CC: 方解石 Calcite, Ka: カオリナイト Kaolinite, Mv: 白雲母 Muscovite, Ch: 緑泥石 Clinocllore

図-6 湿式碎石粉およびそれを用いた GP 硬化体の XRD 分析結果

ドピーク (hump) が現れず、この碎石粉は主に結晶質であることがわかった。しかし、3 シリーズの GP の X 線回折角  $2\theta=25\text{-}35\text{deg.}$  の範囲にブロードピークが見られており、GP ペースト硬化体は非結晶質ゲルを有することが認められた。しかし、3 シリーズの GP に現れる結晶物の種類に違いが見られない。GP 中の結晶物は碎石粉のものと同じである。即ち、碎石粉の多くの結晶物質は反応せず、そのまま GP に残存している。

しかし、碎石粉中のカオリナイト、白雲母、緑泥石および曹長石の一部のピークが GP 硬化体に見られない、またはピークが低くなった。BFS の混合で碎石粉の使用量が減少したことが一因である。また、碎石粉を単独に使用した GP が硬化できることより、これらの結晶物の一部はアルカリ溶液に溶け、GP の硬化反応に消費されたと推測している。

### 3.2 GP モルタルの強度および諸要因の影響

GP ペーストの乾燥収縮が大きいいため、乾燥収縮によるひび割れや寸法変化によって、強度の試験結果にばらつきが生じやすい。そこで、表-3 に示すモルタルで碎石粉と BFS を併用した GP の強度の影響要因を検討した。

図-7 に、0 号液を用いた GP モルタルの圧縮・曲げ強度に及ぼす養生温度、BFS の粉末度と混合率の影響を示す。また、図-8 は、1 号液や 2 号液を用いた GP モルタルの圧縮・曲げ強度を示すものである。モルタルの調合にかかわらず、加温養生のほうが常温養生より圧縮・曲げ強度は高いことが認められた。特に、2 号液を使った場合、加温養生と常温養生の強度差は大きかった。これは、GP の縮重合反応に必要な  $\text{Si}^{4+}$  が粉体の溶出に依存し、

養生温度が高いほど溶出が多いためである。

BFS の影響として、アルカリ溶液の種類と養生温度にかかわらず、BFS の混合率または比表面積が大きいほど、圧縮・曲げ強度は大きいことも認められ、図-7 に示すように、圧縮・曲げ強度は BFS の混合率とほぼ線形関係である。図-7、図-8(a),(b) を比較すると、GP モルタルの強度に及ぼす BFS の比表面積の影響は、2 号液を用いた場合は最も大きく、1 号液を用いた場合は小さかった。

なお、養生方法、BFS の混合率と比表面積が同じであるシリーズの強度を比べると、1 号液、0 号液および 2 号液の順で圧縮・曲げ強度は減少することが分かった。これは、3.1.2 節に説明したように、イオンを溶出しやすい BFS を併用する場合、 $\text{Si}^{4+}$  を直接に提供する水ガラスの割合を増加することが、苛性ソーダを増加して粉体のイオン溶出を促進することより GP の硬化反応を増加させるためである。

### 4. まとめ

本研究は、湿式碎石粉の有効利用方法を開発するために、それを用いたジオポリマー(GP)硬化体の性能を検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 湿式碎石粉(De)を単独に使用した GP の凝結時間は、アルカリ溶液中の苛性ソーダの割合が大きいほど短くなる。その強度は、水ガラスと苛性ソーダから適切に構成されるアルカリ溶液を使用した場合には大きい。
- 2) De と高炉スラグ微粉末(BFS)を併用した GP の凝結時間は De の単独使用の場合より短く、強度は、水ガラス水溶液のみをアルカリ溶液とした場合には高いこと

に対して、苛性ソーダ水溶液の単独使用の場合には大幅に低下する。また、De/BFS 併用系 GP の強度は、常温養生より加温養生の場合に高く、BFS の比表面積や混合率が高いほど増加する。BFS の混合率を 30%以上とし、1 号液または 0 号液を使えば、高強度 GP を作製することができる。なお、高分子凝集剤を含む De を使っても GP 硬化体の耐酸性が優れる。

3) De/BFS 併用系 GP は石英、曹長石および方解石などの結晶物質を含有する。碎石粉の結晶物質はほとんど GP に残存するが、一部のカオリナイト、白雲母、緑泥石および曹長石が溶ける可能性がある。

SEM/EDS 分析によって、De/BFS 併用系 GP の反応生成物は主に C-A-S-H ゲルであったが、ごく一部の領域で N-A-S-H ゲルも確認された。紙面の都合で別途詳細に報告させていただく。また、湿式碎石粉は若干反応性があるが、De/BFS 併用系 GP に主に充填材の役割を果たすと考えられ、使用時に乾燥状態と適切な粉末度が要求される。今後、湿式碎石粉のアルカリ環境下の溶出特性と縮重合反応性を解明し、比表面積が GP 硬化体の性能に与える影響を考察する予定である。

**謝辞** (株)鹿野興産は脱水ケーキを提供していただきました。また、本研究を実施する際には、山口大学工学部感性デザイン工学科卒業生永山雛乃さんのご協力を得ました。ここに付記して感謝を申し上げます。

**参考文献**

- 1) 経済産業省製造産業局素材産業課：骨材需給表，2018.9.10
- 2) 佐藤道生，佐伯竜彦，井下一郎：湿式にて捕集した碎石スラッジの混和材としての特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1335-1340，2002
- 3) 本居貴利，片山一司，中原信幸，田村隆弘：湿式碎石粉を添加したコンクリートの性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1909-1914，2015
- 4) 河野広隆：骨材の微粉末の有効利用，コンクリート工学，Vol.46，No.5，pp34-37，2008.5
- 5) 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
- 6) 李柱国，池田攻ほか：低カルシウム流動床石炭灰の固化方法及び固化体，特許第 6719154 号，2020.6.18
- 7) 岡崎弘樹，李柱国，池田攻：ジオポリマーによる CaO 低含有量の流動床石炭灰のリサイクル方法に関する基礎研究，2015 年度日本建築学会中国支部研究報告集，Vol.39，pp.65-68，2016.3
- 8) 山口拓臣，李柱国：岩粉を用いたジオポリマーセメントに関する研究，2017 年度日本建築学会中国支部研究報告集，Vol.41，pp.41-44，2018.3

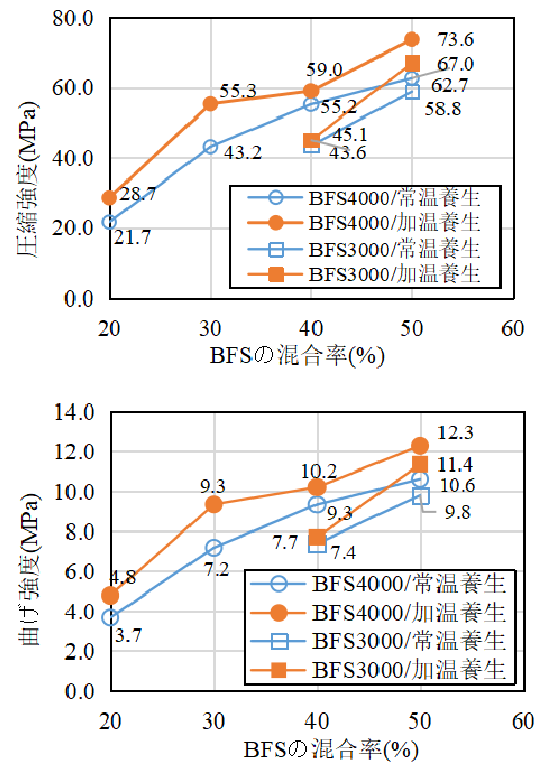


図-7 湿式碎石粉と BFS を併用した GP モルタルの圧縮・曲げ強度に及ぼす BFS と養生温度の影響 (0 号液)

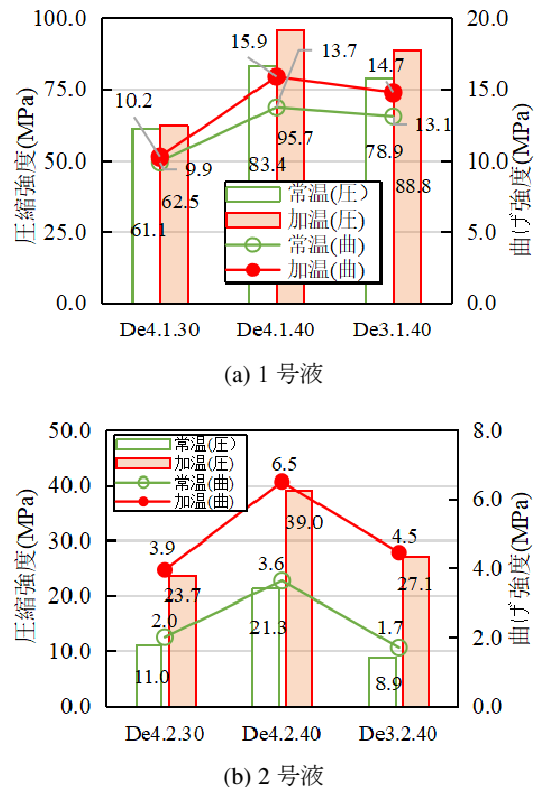


図-8 湿式碎石粉と BFS を併用した GP モルタルの圧縮・曲げ強度に及ぼすアルカリ溶液の影響

9) 久保井利達，西田一彦：碎石粉を混合補助材として用いた粘性土のセメント安定処理効果，土木学会論文集，No. 631/III-48，pp.1-12，1999. 9.