

# 論文 ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究

南 浩輔\*1・松林 卓\*2・舟橋 政司\*2

**要旨：**ジオポリマー法による硬化体は、石炭灰や高炉スラグなど産業副産物を活性フィラーとして大量に使用でき、かつ一般的なコンクリートと比較して 80%もの CO<sub>2</sub> 削減を可能とする材料として注目されている。ジオポリマー硬化体の圧縮強度と静弾性係数の関係は、一般的なコンクリートと同様に、圧縮強度を指標とした指数関数で表すことができる。静弾性係数はセメント系材料の 50~80%程度であり、圧縮強度に対する引張強度の比は 1/17~1/9 程度である。また、耐久性の向上方法として、Ca 系混和材の添加や配合成分の Si/アルカリ比を制御することで、凍結融解抵抗性の改善が可能であることを確認した。

**キーワード：**ジオポリマー, 石炭灰, フライアッシュ, 高炉スラグ, 産業副産物, CO<sub>2</sub> 削減, 短繊維補強

## 1. はじめに

地球温暖化対策として二酸化炭素の排出量削減は国際的な重要テーマとなっている。中国, 米国, 欧州連合 (EU), インド, ロシアに次ぐ二酸化炭素排出国である我が国も, 発生量の抑制に取り組む必要がある。

同時に, 資源小国である我が国において, エネルギーの安全保障は国の根幹を支える重要課題である。エネルギー源のベストミックスの確保を鑑みた場合, 太陽光発電や風力発電に代表される非化石エネルギー (クリーンエネルギー) の導入や省エネルギー化を最大限進めても, 供給ポテンシャル, 利便性, 経済性の観点からは, 将来においても化石燃料をエネルギー供給に利用する必要がある。

このような社会背景のもと, 石炭火力発電所で使用される石炭量の約 1 割は石炭灰 (フライアッシュおよびクリンカアッシュ) として日々排出され, その発生量は年々増加傾向にある。石炭灰を含めた産業副産物の 3R 活動 (発生抑制・再利用・再生利用) の推進は極めて重要な課題であるが, 石炭灰の有効利用先の大部分がセメント原料となっている今日では, 社会資本投資の減少に伴い, その需要は縮小均衡の状態に陥っている。

そこで, 前述の諸問題を同時に解決する材料として, ジオポリマー法による硬化体が注目されている。この硬化体は, 石炭灰や高炉スラグなど産業副産物を素材として大量に使用でき, かつポルトランドセメントを使用しないため, 一般的なコンクリートと比較して 80%もの CO<sub>2</sub> を削減<sup>1)</sup>することが可能である。

近年, 基礎理論や実用化に向けた研究<sup>2),3),4)</sup>が行われているが, 基礎的な物性を含めその諸性状は未だ明らかになっていない<sup>5)</sup>とは言い難い。

本稿では, ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究結果について報告する (以下, ジオポリマーを GP

と記す)。

## 2. ジオポリマーとは

GP の固化概念図を図-1 に示す。GP は 1970~1980 年代にフランスの Davidvits により提唱された無機ポリマーであり, 石炭灰やメタカオリンなどケイ素 (Si) やアルミニウム (Al) を含む非晶質物質 (以下, 活性フィラーと記す) と, 珪酸ナトリウムや水酸化ナトリウムを用いたケイ酸アルカリ溶液との反応によって得られる非晶質の縮重合体 (珪酸モノマーの縮重合反応によるポリマー化) である。

GP 硬化体はポルトランドセメントの硬化反応である, いわゆる水和反応とは異なる硬化過程を有している。

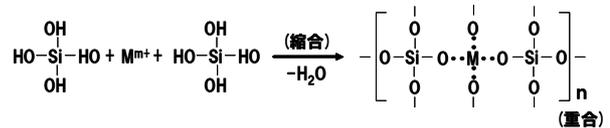


図-1 GP 固化概念図

## 3. 実験概要

GP 硬化体の諸物性を把握するため, 幅広い強度範囲 (10~70N/mm<sup>2</sup>) において圧縮強度 (JSC E-G505) と静弾性係数 (JIS A1149) および引張強度 (JIS A1113) を測定した。また, 加温時間と圧縮強度の関係ならびに配合強度と Ca 系混和材の置換率が圧縮強度に及ぼす影響について確認した。

中性化試験では, 硬化コンクリート試験方法の適用性の確認を目的とし, GP モルタルに対して促進中性化試験 (JIS A1153) を実施した。中性化深さの測定方法は JIS A1152 に従った。

乾燥収縮試験では, 初期養生条件と繊維補強 (鋼繊維: 2 種類, ポリビニルアルコール繊維 (以下, PVA 繊

\*1 前田建設工業 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

\*2 前田建設工業 (株) 技術研究所 博(工) (正会員)

表-1 使用材料

種別	材料	物性値
活性フィラー	フライアッシュⅠ種:A	密度 :2.40 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:5.390 cm <sup>2</sup> /g
	フライアッシュⅡ種:B	密度 :2.24 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:3.770 cm <sup>2</sup> /g
	フライアッシュⅡ種:C	密度 :2.30 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:3.560 cm <sup>2</sup> /g
	フライアッシュⅡ種:D	密度 :2.24 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:3.720 cm <sup>2</sup> /g
	フライアッシュⅡ種:E	密度 :2.25 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:4.030 cm <sup>2</sup> /g
	フライアッシュⅡ種:F	密度 :2.30 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:4.280 cm <sup>2</sup> /g
Ca系混和材	高炉スラグ微粉末 (石膏添加:無)	密度 :2.91 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:4.200 cm <sup>2</sup> /g
ケイ酸アルカリ溶液	珪酸ナトリウムと水酸化ナトリウムあるいは水酸化カリウムの混合液	密度 :1.25~1.60 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	千葉県産山砂 埼玉県産砕砂 静岡県産珪砂	表乾密度:2.56 g/cm <sup>3</sup> 表乾密度:2.70 g/cm <sup>3</sup> 表乾密度:2.62 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	千葉県産砕石	表乾密度:2.72 g/cm <sup>3</sup>

表-2 フライアッシュの主な化学組成(%)

種類	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	強熱減量
A	56.1	23.3	7.68	3.73	1.25	2.51
B	65.2	22.0	4.44	1.36	0.77	1.66
C	56.0	26.3	5.88	2.43	0.92	2.83
D	62.6	23.2	4.59	2.24	0.62	2.15
E	67.8	18.5	3.70	3.61	0.56	1.98
F	54.3	29.6	4.47	2.31	0.79	2.14

表-3 短繊維の物性値

種類	直径 [mm]	標準長 [mm]	アスペクト比	比重	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
鋼繊維 A	0.50	20	40	7.8	1000 以上
鋼繊維 B	0.16	13	81	7.8	2000 以上
PVA 繊維	0.66	30	45	1.3	900

表-4 GPモルタル配合例:30N/mm<sup>2</sup>級 [kg/m<sup>3</sup>]

配合名	F	S	AL	短繊維混入率[vol%]
モルタル	530	1415	265	A:2.0, B:1.0, PVA:2.0

表-5 GPコンクリート配合例:30N/mm<sup>2</sup>級 [kg/m<sup>3</sup>]

配合名	AL/F	s/a	F	S	G	AL
コンクリート	50%	43%	473	646	892	236

F:活性フィラー, S:細骨材, G:粗骨材, AL:ケイ酸アルカリ溶液

維):1種類)がGPモルタルに及ぼす影響を把握するため、乾燥収縮試験(JIS A1129-3)に則り確認を行った。

凍結融解試験では、圧縮強度(引張強度)、Ca系混和材の添加ならびにGP配合成分であるSi/アルカリ比(ケイ酸アルカリ溶液中に含まれるSi量とNaおよびK量の比)が、GPモルタルの耐凍害性に及ぼす影響を把握するため、これらをパラメータとした凍結融解試験(JIS A1148)を実施した。

#### 4. 使用材料

実験に使用した材料を表-1に示す。活性フィラーとしてフライアッシュⅠ種およびⅡ種を、Ca系混和材として高炉スラグ微粉末を、細骨材として山砂、砕砂および珪砂を用いた。蛍光X線分析による活性フィラーの化学組成を表-2に示す。ケイ酸アルカリ溶液には珪酸ナトリウムと水酸化カリウムあるいは水酸化ナトリウムをそれぞれ混合したものを用いた。

表-3に短繊維補強GPモルタルに使用した、コンクリート補強用短繊維の物性値を示す。また、GP配合例として、短繊維補強GPモルタルの配合を表-4に、GPコンクリートの配合を表-5示す。

#### 5. 物性試験

物性試験結果を以下に示す。配合設計に際しては、試験体が良好に作製可能なフレッシュ性状を有するものとした。なお、GP硬化体の製造方法は既報<sup>2)</sup>に準じて行い、モルタルの練混ぜにはモルタルミキサ(容量20L)を、

コンクリートの練混ぜには強制二軸式ミキサ(容量55L)を用いた。

##### 5.1 加温時間と圧縮強度

GPモルタルの加温時間と圧縮強度の関係を図-2に示す。加温条件は、温度80°C、湿度90%RHとした。試験の結果、加温初期に大きな強度増加(5.4MPa/hr)が認められ、加温時間が12時間以降の強度増加(0.1MPa/hr)が小さいこと(一般的なコンクリートと同傾向)を鑑み、推定には対数近似を用いた。また、加温を行わず常温固化(20°C、60%RH)させた場合、材齢28日の圧縮強度は加温6時間と同程度となった。所要の強度が得られる加温時間は、活性フィラーの種類やその反応性により異なるが、配合が持つポテンシャルを効果的に引き出すためには初期の加温温度と時間が重要となる。加温条件を適切に調節・管理することは、品質のみならず養生過程におけるCO<sub>2</sub>発生抑制・省エネルギー化につながる。

##### 5.2 配合強度と混和材置換率

Ca系混和材がGPモルタルの圧縮強度に及ぼす影響を把握するため、配合強度の異なるGPモルタル(2水準:30および80N/mm<sup>2</sup>級)に対し、フライアッシュに対する混和材置換率をパラメータ(3水準:10,20,30vol%)とした圧縮強度試験を実施した。

図-3に示す通り、ベース配合の強度が高い場合、Ca系混和材の置換率の増加に伴う圧縮強度の増進効果が小さい結果となった。

配合強度が低いケースでは、Ca系混和材の置換によりC-S-Hゲルの生成に伴う強度発現への寄与度が大きく現

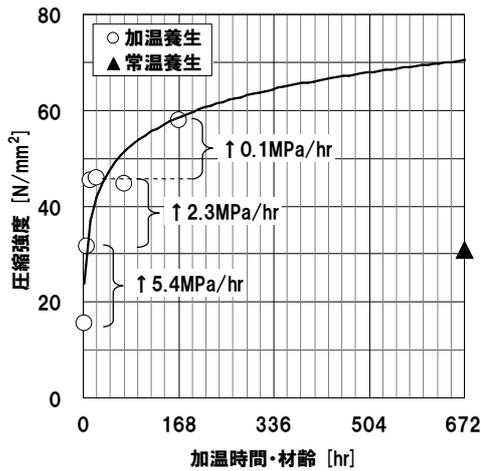


図-2 加温時間と圧縮強度の関係(モルタル)

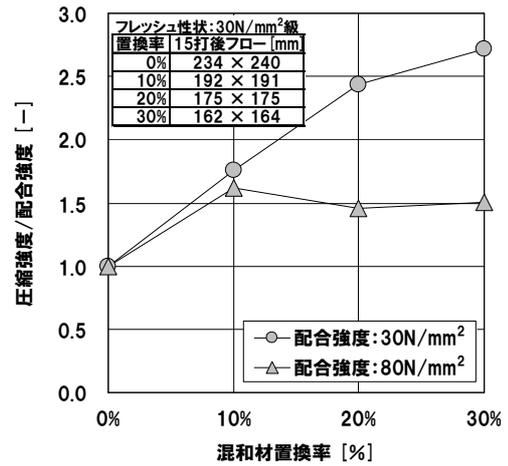


図-3 強度に対する混和材置換率の効果(モルタル)

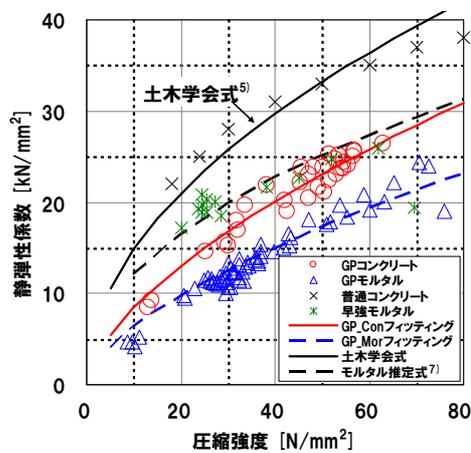


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

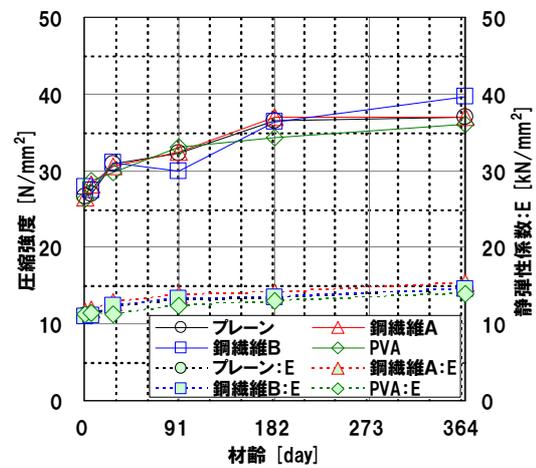


図-5 圧縮強度と静弾性係数の材齢変化(モルタル)

れ、強度増進効果が顕著となるのに対し、配合強度の高いケースでは、GP に依存する強度発現の割合が高く、結果的に Ca 系混和材の置換による強度増進効果が現れにくくなったものと推察される。また、アルカリ量に応じて Ca 系混和材の反応率が異なることも考えられるが、それらは今後検証していく。

### 5.3 圧縮強度と静弾性係数

#### (1) GP 硬化体の圧縮強度と静弾性係数

GP 硬化体の圧縮強度と静弾性係数の関係を明らかにすることを目的として、10~70N/mm<sup>2</sup>の範囲において圧縮強度試験を実施した。図-4に圧縮強度と静弾性係数の関係を、図-5に材齢変化を示す。

GP 硬化体の静弾性係数は、セメント系材料<sup>5),6),7)</sup>を用いたものに比べ50~80%程度と小さい値を示すが、セメント系材料の各推定式から求めた静弾性係数と GP のフィッティング式から求めた静弾性係数の比は、圧縮強度が高まるにつれ、その差は狭まる傾向を示す(圧縮強度が20N/mm<sup>2</sup>の場合、セメント系材料に対してGPの静弾性係数の割合が60%程度であったものが、60N/mm<sup>2</sup>では

70%まで高まる)。また、加温養生後の圧縮強度および静弾性係数は、材齢による顕著な伸びは認められない。

図-6に示す通り、本試験で得られた GP 硬化体の圧縮強度の変動係数は、0.4~11.9% (サンプル数93組の変動係数の幅)であり、セメント系材料と遜色ない安定した品質が得られている。今後は、高強度域を含めたデータの拡充を図るとともに、変動要因の把握に努めたい。

#### (2) GP 硬化体の圧縮強度と静弾性係数の回帰式

試験結果を基に、GP 硬化体の圧縮強度と静弾性係数の回帰式の構築を試みた。図-4に示す通り、GP 硬化体の圧縮強度と静弾性係数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、GP モルタルならびに GP コンクリートのいずれも、式(1)に示す圧縮強度:  $f'_{c,m}$  を指標とする指数関数で表すことができる。

$$E_{c,m} = a \cdot f'_{c,m}{}^x \quad (1)$$

ここに、 $E_{c,m}$ : GP 硬化体の静弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)、 $f'_{c,m}$ : GP 硬化体の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $a, x$ : 任意定数である。

今後より詳細な検討が必要ではあるが、著者らが GP モルタルの基礎物性および構造利用に係る研究<sup>8),9),10)</sup>で

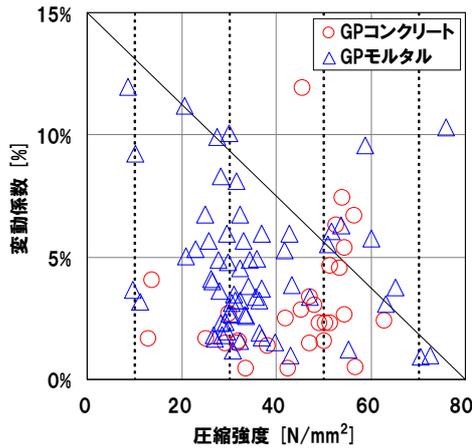


図-6 GP硬化体の圧縮強度と変動係数

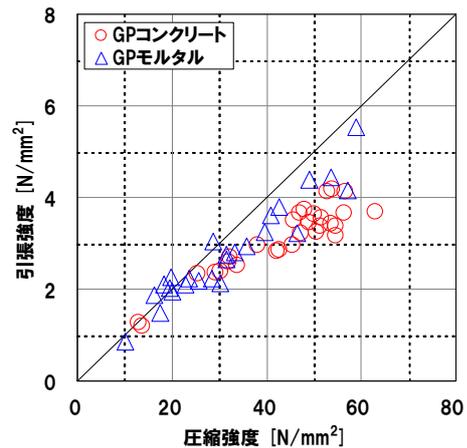


図-7 圧縮強度と引張強度の関係



写真-1 呈色状況 (左:1週目, 右:26週目)

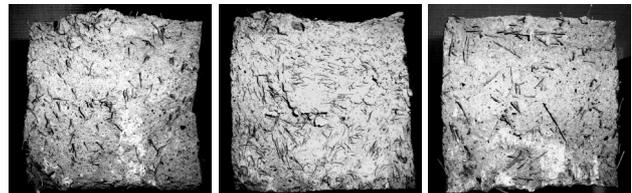


写真-2 短繊維の分散状況 (左から配合 A, B, C)

報告しているように、GP 硬化体の力学的な評価に際しては、コンクリート系材料で用いられるモデルや評価式の適用が可能と考えられる。

#### 5.4 圧縮強度と引張強度

図-7に示す通り、GP 硬化体の引張強度は圧縮強度の1/17~1/9程度であり、概ねセメント系材料と同程度の性能を有していると考えられる。また、高強度域に近づくにつれ、圧縮強度に対する引張強度の比が低下する傾向も同様である。

#### 5.5 中性化試験

写真-1に GP モルタルの促進中性化試験状況を示す。

写真-1に示す通り、GP モルタルは、フェノールフタレイン溶液の噴霧後、全面が淡いピンク色に呈色するもののその発色は弱く、促進試験開始後、促進期間が1,4,8,13,26 週と経過しても明確な中性化域の確認ができなかった。これは、通常のセメント系材料と異なり GP 硬化体が水酸化カルシウムを含まないことから、一般的にセメント系材料で用いられている中性化という指標で評価することが難しいことを示している。ただし、呈色が弱かった原因として、GP モルタルの pH がコンクリートに比べ幾分低いことが挙げられ(粉末試料と純水の混合割合を同一条件とした場合の相対値としての pH)、鉄筋の腐食についての検討が別途必要となる。

なお、GP 硬化体の構成材料に Ca 系材料を含む場合は、生成物質が異なるため、C-S-H ゲルと高分子ポリマーの両方の特性を有する材料として取り扱うことが重要であ

る。言い換えれば、Ca 系材料が含まれている GP 硬化体と含まれていない GP 硬化体では、劣化メカニズムが異なるため、耐久性能の面では全くの別物として扱う必要があると考えられる。

#### 5.6 乾燥収縮試験

図-8に乾燥収縮試験結果を、写真-2に短繊維の分散状況を示す。

本試験では、加温後の養生を2次製品の製造工程を模擬した気中養生(脱型直後から温度 20°C、湿度 60%RH の恒温恒湿室内で養生)と、JIS 規準に準じた水中養生(脱型後 1 週間水中養生(水温 20°C)を施し、その後、恒温恒湿室内で養生)の2通りとした。計測に際しては、気中養生は脱型直後を、水中養生は乾燥開始時をそれぞれ基長とした。

気中養生の場合、一般的なセメント系材料を用いたモルタルに比べ、長さ変化率(350~500×10<sup>-6</sup>:26 週)は小さく、質量減少率(-4.2~-4.8%:26 週)は同程度の結果が得られた。

一方、水中養生では、長さ変化率(740~1060×10<sup>-6</sup>:26 週)、質量減少率(-7.0~-7.2%:26 週)とも気中養生に比べて大幅に増加する結果となった。ただし、長さ変化率はセメント系材料を用いたモルタルと同程度<sup>11)</sup>であり、質量減少率においてもフライアッシュを使用したモルタルと同程度であり、十分実用レベルであると考えられる。

本試験の結果から、GP モルタルを繊維補強すること

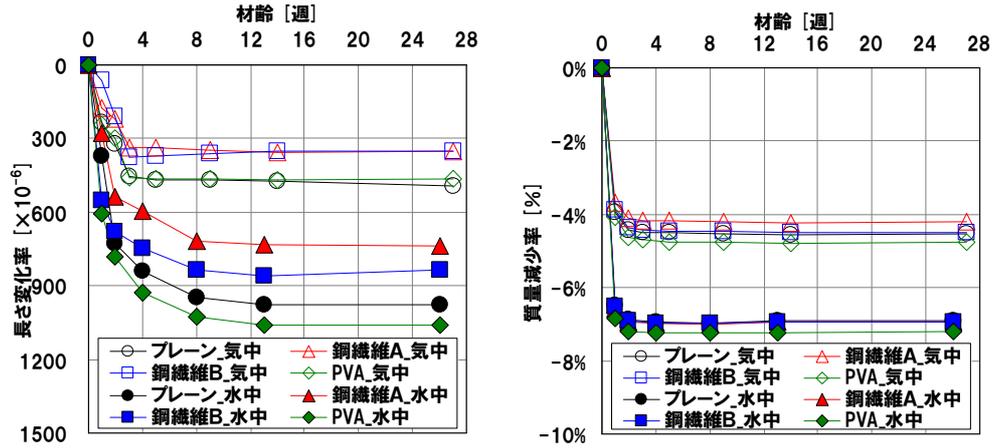


図-8 乾燥収縮試験結果（モルタル）（左：長さ変化率，右：質量減少率）

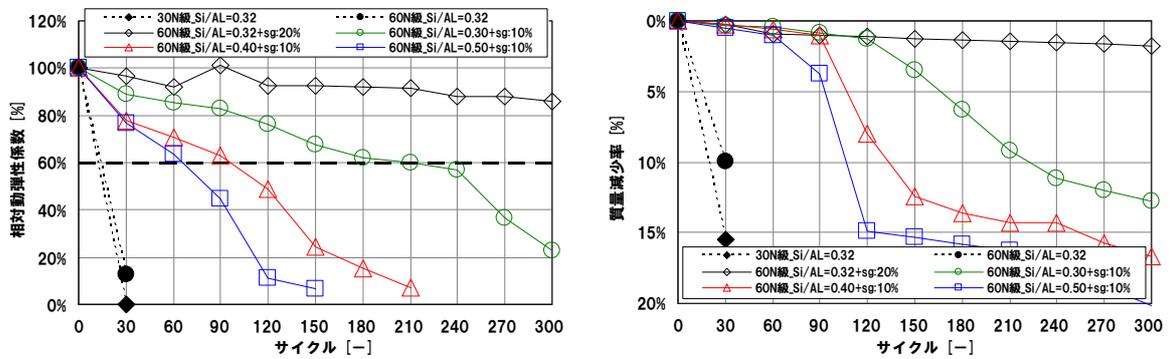


図-9 凍結融解試験結果（モルタル）（左：相対動弾性係数，右：質量減少率）

で乾燥収縮を低減することが可能であることが確認できた。なお、本試験に用いた配合では、鋼繊維の乾燥収縮低減効果が高い結果となったが、混入率やワーカビリティ、費用対効果など、構造物の要求性能に応じた補強繊維を選択し、長繊維を含めその適用性を確認することで、より適した繊維補強 GP の配合選定が可能と考えられる。

### 5.7 凍結融解試験

GP 硬化体の地上構造物への適用を想定し、耐凍害性の把握ならびに凍結融解抵抗性の向上策について検討を行った。試験結果を図-9 に示す。

5.4 で示した通り、GP 硬化体の圧縮強度と引張強度には相関性が認められ、圧縮強度を高めることで、引張強度を高めることが可能である。

凍結融解作用による劣化現象は、水分の凍結による体積膨張による膨張圧で試験体にひび割れが生じたり、表層が剥離するものであるため、試験体の強度を高めることで凍結融解抵抗性の向上が図れると予測した。しかしながら、圧縮強度ならびに引張強度を2倍程度に高めたにも関わらず、本試験においては有意な改善効果を確認することができなかった（図-9 の凡例●と◆）。

以上の結果より、単純に GP 硬化体の強度を増加させ

るだけでは、凍結融解抵抗性の改善は困難であると考えられる。

5.5 で一部触れたが、GP 硬化体の耐久性性能を考える場合、構成材料における Ca 系材料の有無は、結果を大きく左右する要因となる。既往の研究<sup>12),13)</sup>として、GP 硬化体に高炉スラグを添加することで、塩化物浸透抵抗性の改善効果が報告されている。これは、Ca 系材料を添加することで、組織構造が緻密化されることに起因していると考えられ、凍結融解抵抗性の向上においても Ca 系材料の添加は効果的であると予測された。

Ca 系材料の活性フィラー置換率が 10vol% の場合（図-9 の凡例：□，△，○）、凍結融解抵抗性の改善効果は認められるものの、耐凍害性を有するとまでは言い難い結果となったが、同置換率が 20vol% の場合（図-9 の凡例：◇）では耐凍害性を満足する結果が得られた。

このように、耐凍害性の改善策として Ca 系材料の添加は効果的であるが、Ca 系材料の多添加は GP のフレッシュ性状ならびにワーカビリティに影響を及ぼすため、更なる検討として、GP 配合成分が凍結融解抵抗性に与える影響について確認した。

本試験では、GP 配合成分の Si/アルカリ比をパラメータ（3水準：0.3，0.4，0.5）とし、凍結融解試験を実施し

た。試験の結果、耐久性指数はそれぞれ  $DF_{Si/AL=0.3}=42$ ,  $DF_{Si/AL=0.4}=19$ ,  $DF_{Si/AL=0.5}=13$  となり、GP 配合成分の Si/アルカリ比が凍結融解抵抗性に強く影響することが明らかとなった (図-9 の凡例: □, △, ○)。

以上のことから、GP 硬化体の耐凍害性を効果的に向上させるためには Ca 系材料の添加と共に、GP 配合成分の Si/アルカリ比を制御することが重要となる。

このとき、配合の留意点としてポリマー化の際に核物質となる Si 量が不足し過ぎないように、活性フィラーやアルカリ量に見合った適切な量を確保することが大切である。

## 6. まとめ

GP 硬化体の性能評価に際して重要な点として、以下の点が挙げられる。

- ・ Ca 系材料の有無 (使用材料の構成)
- ・ 加温養生の有無と養生温度と時間 (ポリマー化)

GP 硬化体の実用化に向け、幅広い強度範囲 (10~70N/mm<sup>2</sup>) において、その諸物性と耐久性を確認した。得られた知見を以下に示す。

- (1) GP 配合が持つポテンシャルを効果的に引き出すためには初期の加温温度と時間が重要となる。
- (2) GP ベース配合の強度が高い場合、Ca 系混和材の置換率の増加に伴う圧縮強度の増進効果は小さい。
- (3) GP 硬化体の圧縮強度と静弾性係数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、静弾性係数の特性値は、圧縮強度 ( $f'_{c,m}$ ) を指標とする指数関数で表すことができる。
- (4) GP 硬化体の引張強度は圧縮強度の 1/17~1/9 程度であり、概ねセメント系材料と同等の強度特性を有する。
- (5) GP モルタルは中性化試験において、促進期間の経過に伴う明確な中性化域の確認ができない。
- (6) GP モルタルを繊維補強することで乾燥収縮を低減することが可能である。
- (7) Ca 系材料の添加と共に GP 配合成分の Si/アルカリ比を制御することで、GP 硬化体の耐凍害性を効果的に向上させることが可能である。

## 謝辞

本研究の成果の一部は、(公財)鉄道総合技術研究所との共同研究による。研究の実施にあたり、上原元樹氏、佐藤隆恒氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 相原直樹, 辻村太郎, 上原元樹, 土屋広志: 鉄道用

材料の LCA による環境評価, 鉄道総研報告, Vol.23, No.6, pp.5-10, 2009.6

- 2) 上原元樹: ジオポリマー法による環境負荷低減コンクリートの開発, 鉄道総研報告, Vol.22, No.4, pp.41-46, 2008.4
- 3) 池田 攻: ジオポリマーバインダーによる鉱物質粉体の常温固化と材料化, 資源と素材, Vol.114, pp.497-500, 1998
- 4) 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
- 5) (社)土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2008.3
- 6) 小阪義夫, 谷川恭雄, 太田福男: コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響 第 1 報: モデル解析法による検討, 日本建築学会論文報告集, 第 228 号, 1975.2
- 7) 奥山英俊, 長井宏平, 佐藤靖彦: 付着モルタルが再生コンクリートの力学特性に及ぼす影響の解析的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1235-1240, 2003
- 8) 南 浩輔ほか: ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究 (1)ジオポリマーモルタルおよび短繊維補強ジオポリマーモルタルの基礎物性, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.67, V-438, pp.875-876, 2012.9
- 9) 舟橋政司ほか: ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究 (2)短繊維を混入したジオポリマーモルタルの曲げ破壊性状, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.67, V-439, pp.877-878, 2012.9
- 10) 松林 卓ほか: ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究 (3)鉄筋を配置したジオポリマーモルタルはりの曲げ挙動, 土木学会年次学術講演会概要集, Vol.67, V-440, pp.879-880, 2012.9
- 11) 出雲健司, 名和豊春: 二つの異なる温度環境下でのフライアッシュを使用したモルタルの収縮ひずみ挙動, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.221-236, 2003.8
- 12) 上原元樹, 佐藤隆恒: 高炉スラグを添加したフライアッシュ・ベース・ジオポリマー硬化体の諸性質, 第 123 回無機マテリアル講演要旨, pp.76-77, 2011
- 13) 上原元樹, 佐藤隆恒: 高炉スラグの添加が石炭灰ジオポリマー硬化体の塩化物イオン浸透性に与える影響, 第 125 回無機マテリアル講演要旨, pp.64-65, 2012