

ジオポリマー硬化体の配合と諸性質

(公財)鉄道総合技術研究所
前田建設工業(株)
前田建設工業(株)
前田建設工業(株)

正会員 ○上原 元樹
正会員 南 浩輔
正会員 松林 卓
梶田 秀幸

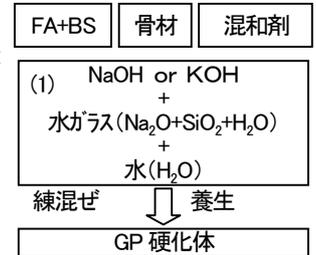
1. 目的

ジオポリマー(以下, GP)硬化体とはフライアッシュ(以下, FA)などの非晶質粉体とケイ酸アルカリ溶液(以下, ASS)との反応で非晶質ポリマーが生じて硬化したものである。その製造時に多くの CO₂ を発生するポルトランドセメントを使用しないため, CO₂ 低減効果に優れ, かつ産業副産物を有効利用できる点や陽イオン交換能を有する点で注目されている⁽¹⁻⁶⁾。しかし, その硬化体の配合は複雑であり, それと諸特性との相関は明確になっておらず GP 硬化体の評価が混乱する要因となっている。そこで, 筆者らは, 種々の配合の GP 硬化体を作製し, それら硬化体の配合と諸特性の関係を検討している。

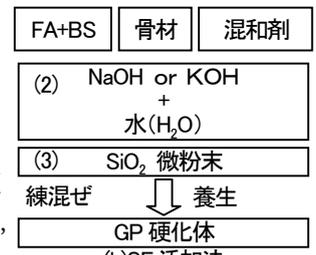
2. 試料作製

2.1 GP 硬化体の作製法

GP 硬化体の作製法の概要を図1に示す。一つはASS中のSi成分として水ガラスを用いる一般的な方法, 一つは筆者らが提案した水ガラスの代わりにシリカフューム等のSiO₂微粉末(以下, SF)を用い, 練混ぜ時に添加して溶解させるSF添加法である。一般的な方法では, アルカリ源としてNaを単独使用した場合, 短時間かつ常温で凝結が起きるなど可使時間のコントロールが難しいが, SF添加法では短時間での凝結が起きにくく硬化体作製が容易である。ただし, 練混ぜ温度が低い, アルカリ量が少ない, あるいは高炉スラグ(以下, BS)置換率が小さい場合, SFの溶解が進まず, 一般法と比較して強度が低下する傾向となる。



(a)一般的な方法



(b)SF添加法

図1 ジオポリマー作製法の概要

2.2 GP 硬化体の配合の考え方

GP 硬化体の配合は, ASS 溶液における AL/W (図1(1)あるいは(2)中のアルカリ成分であるNaやKと水のモル比), Si/AL(図1(1)あるいは(2)+(3)中のSi成分とアルカリ成分であるNaやKとのモル比), 単位水量(図1(1)あるいは(2)中の立米あたりのH₂O量)と, 粉体量, 骨材量で決定される。

2.3 GP コンクリートの作製

一般法で可使時間を得るためにアルカリ成分の一部をKOHとし, 種々のAL/WおよびBS置換率のGPコンクリートを養生条件80°C, 12h相当で作製した。配合に際してはBS置換率をFAの体積を基準とした内割りとし, 細骨材, 粗骨材量を固定とした(表1)。

2.4 GP モルタルの作製

SF添加法で, K成分を使用せずに必要な可使時間が得られるため, アルカリ成分全てをNaとした。また, SFは練混ぜ時に溶解するため, その単位量計算にはNaOH溶液に所定量のSFを混ぜたケイ酸Na溶液の実測密度を用いた。養生条件は上記GPコンクリートと同様とし, Si/ALおよびBS置換率を変えたものを作製した(表2)。

2.5 試験方法

圧縮強度(JIS A1108:2006)と割裂引張強度(JIS A1113:2006)は, 加温養生後2日経過時のφ10×20cm

(コンクリート)あるいはφ5cm×10cm(モルタル)の円柱供試体を用いた。モルタルの曲げ強度は, 4cm×4cm×16cmの角柱供試体をJIS A1106:2006の中央点載荷法に準じて測定した。また, 乾燥収縮率は加温養生後脱型したφ10×20cmの円柱供試体を7日間水

表1 GP コンクリートの配合とフレッシュ性状

試番	配合条件			単位量(kg/m ³)						フレッシュ性状	
	AL/W	Si/AL	BS置換率	FA+BS	S	G	ASS	A1	A2	S.L.F (cm)	Air (%)
1	0.10	0.30	20vol%	436	757	892	193	8.71	0.52	68.5×69.4	4.8
2	0.15	0.30	0vol%	418			209	8.37	0.75	70.5×69.5	5.3
3	0.15	0.30	20vol%	436			209	8.71	0.50	68.6×69.6	4.8
4	0.15	0.30	30vol%	444			209	8.88	0.43	68.6×67.6	4.7
5	0.20	0.30	20vol%	436			224	8.71	0.35	65.7×66.4	4.0

AL/W:ASS中のアルカリ/水比, Si/AL:ASS中のSi/アルカリ比, FA:フライアッシュ(JIS I種), BS:高炉スラグ微粉末4000プレーン), S:細骨材, G:粗骨材, ASS:ケイ酸アルカリ溶液(「KOH溶液+水ガラス+純水」を配合条件に応じて混合), A1:流動遅延剤, A2:助剤

表2 GPモルタルの配合とフレッシュ性状

試番	配合条件			単位量(kg/m ³)					モルタルフロー(mm)
	AL/W	Si/AL	BS置換率	FA+BS	S	AS	SF	A1	
6	0.174	0.254	13vol%	661	1286	250	29	129	232×232
7	0.174	0.304	13vol%	660	1284	250	34	128	229×229
8	0.174	0.355	13vol%	658	1282	250	40	128	222×222
9	0.174	0.254	22vol%	673	1286	250	29	129	230×228
10	0.174	0.304	22vol%	672	1284	250	34	128	229×232
11	0.174	0.355	22vol%	670	1281	250	40	128	227×231

AL/W:(AS+SF)中のアルカリ/水比, Si/AL:(AS+SF)中のSi/アルカリ比, FA:フライアッシュ(JIS I種), BS:高炉スラグ微粉末4000プレーン), S:細骨材, AS:アルカリ溶液(「NaOH粉末+純水」を配合条件に応じて混合), A1:流動遅延剤

キーワード:ジオポリマー, フライアッシュ, 細孔径分布, 高炉スラグ, 環境負荷低減

連絡先:〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 TEL042-573-7338

中浸漬後、20℃、相対湿度 60%の環境に静置し、ダイヤルゲージ法にて測定した。浸漬試験は、加温養生後 2 日経過時の試料を JSCE-G572-2013(浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法(案))に準じて行った。各試料の細孔径分布量は水銀ポロシメーターで測定した。

3. 結果と考察

表 1 および 2 に各試料のフレッシュ性状を示す。GP コンクリートに関しては、適切な配合を行うことでフレッシュ性状をコントロールすることが可能であった。図 2 は表 1 に示す配合を用いて一般的な方法で作製した GP コンクリートの圧縮強度、割裂引張強度、図 3 は表 2 に示す配合を用いて SF 添加法で作製した GP モルタルの圧縮強度と曲げ強度を図示したものである。図 2 から同一 BS 置換率なら AL/W に応じて、同一 AL/W なら BS 置換率に応じて圧縮および引張強度が大きくなることを確かめた。一方、図 3 から Si/AL が大きくなると、BS 置換率に関わらず、やや圧縮強度が低下する傾向が認められること、曲げ強度に関しては BS 置換率により最も大きくなる Si/AL 配合が異なった。この結果は、佐藤他(2013)⁵⁾における一般法で作製した GP モルタルの試験結果とは異なる結果であり、配合における Si/AL 比が GP の性状に与える効果は構成材料(例えば BS 置換の有無)や一般法、SF 添加法等の製造方法を含め、より詳細に検討を進めていく必要がある。

図 4 は GP コンクリートの乾燥収縮測定結果である。同一 BS 置換率では、AL/W の大きなものほど乾燥収縮が小さかったが、BS 置換率に対する乾燥収縮量の相違は明確ではなかった。なお、乾燥収縮試験時の質量減少量は試番 2 > 1 > 4 > 3 > 5 の順であった。

図 5 は GP コンクリートの塩水浸漬試験結果(3ヶ月经過時)である。同一 AL/W ならば BS 置換率が大きいほど、同一 BS 置換率の場合、AL/W が大きいほど塩化物イオンの浸透速度が小さかった。

図 6 は GP 硬化体の細孔径分布を測定した結果である。BS の置換により、試番 2 に認められる 40nm および 130nm 近傍の細孔半径を示す細孔が減り、より微細な細孔が増加した。これは GP ペーストの NMR 測定結果において、BS 置換でアルミノシリケート構造の他に C-S-H が生じると考えられることから、それにより緻密化したものと推察される。したがって、乾燥収縮において BS を使用しない試番 2 は大きな細孔が多く、水分逸脱量が多かったものの、毛細管張力が小さく乾燥収縮への影響は小さかったものと考えられる。また、BS 置換ほど顕著な相違ではないが、試番 1,3,5 と AL/W が大きくなると微細な細孔が増加し、総細孔容積は減少することもわかった。これら大細孔の減少は塩化物イオン浸透量を抑制するのに効果的であるが、BS20%置換 GP コンクリートでも AL/W=0.10 では、相当量塩化物イオンの浸透が進んだことから、これら耐久性を確保するためには、反応に必要なアルカリ量を確保するため、ある程度大きな AL/W とすることが必要と推察される。一方、試番 6-8 における Si/AL 比に関しては、細孔分布に与える影響は小さかった。ただし、SF 添加法の場合、SF が溶解する量が明確ではないことから、必ずしも所定の Si/AL 比になっているとは限らない。また、一般法において Si/AL 比で劣化性状が異なることもわかっていることから、Si/AL 比に対する挙動は「一般法」と「SF 添加法」で異なることも推察される。

参考文献

- (1)上原「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」、鉄道総研報告第 22 巻 4 号, pp41-46, 2008 年
- (2)一宮他「ジオポリマーモルタルの配合ならびに製造法に関する基礎的研究」、コンクリート工学年次論文集第 33 巻 1 号, pp575-580, 2011 年
- (3)南他「ジオポリマー硬化体の諸物性に関する基礎的研究」、コンクリート工学年次論文集第 35 巻 1 号, pp1957-1962, 2013 年
- (4)Motoki Uehara *et al.*, "Ion-exchange properties of hardened geopolymer paste prepared from fly ash", Clay Science, Vol.14, No.3, pp127-134, 2009.
- (5)佐藤他「石炭灰を原料とした短繊維補強ジオポリマー短まくらぎの試作」、コンクリート工学年次論文集第 35 巻 1 号, pp2023-2028, 2013 年
- (6) Motoki Uehara *et al.* "Inhibition of alkali-silica reaction by H⁻-type geopolymer from fly ash", The 2nd Asian Clay Conference, 2012

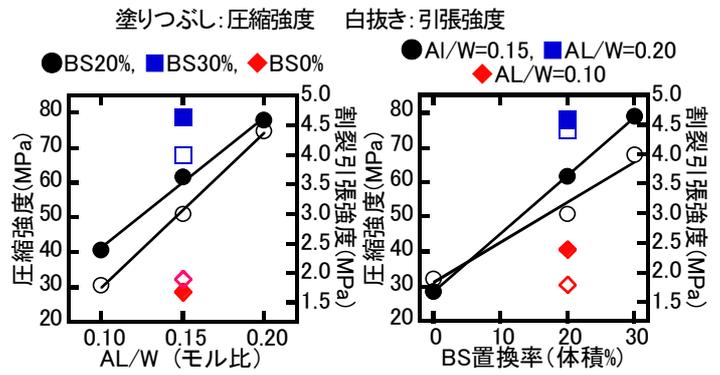


図 2 GP コンクリートの配合と強度

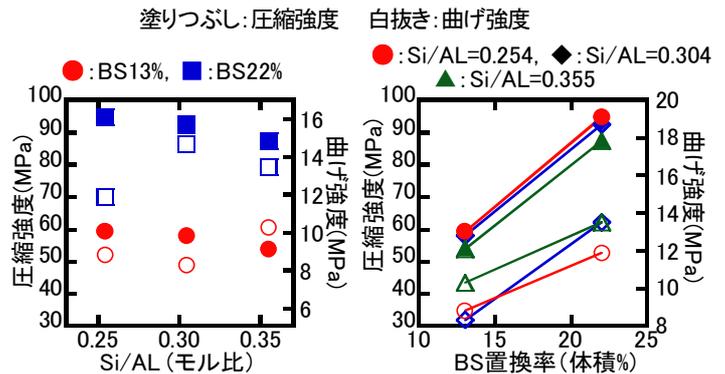


図 3 GP モルタルの配合と強度

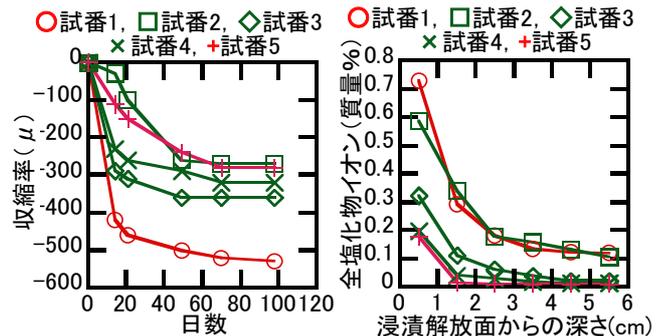


図 4 GP コンクリートの乾燥収縮

図 5 GP コンクリートの塩水浸漬試験結果

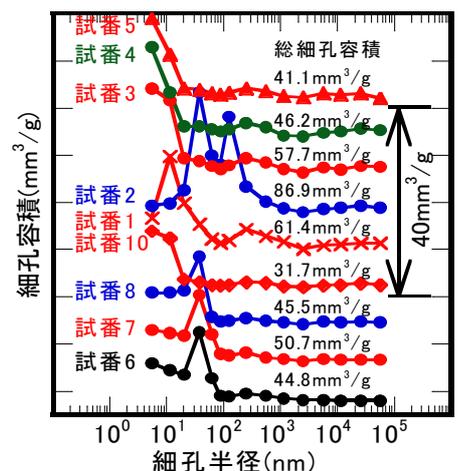


図 6 GP 硬化体の細孔分布分析結果