低 A/W 比，高 Si/A 比配合のジオポリマーにおける諸特性

（公財） 鉄道総合技術研究所　正会員　○佐藤隆恒
（公財） 鉄道総合技術研究所　正会員　上原元樹
（株） 安部日鋼工業　正会員　東原　実
（株） 安部日鋼工業　正会員　大木信洋

1 目的

ジオポリマー硬化体（以下，GP）はフライアッシュなどの非晶質粉体とケイ酸アルカリ溶液との重合反応により硬化したものである．これまで筆者らは，Si 成分粉体添加その場溶解法（溶解法）(1)等を用いて種々のアルカリ／水（モル比，以下 A/W 比），ケイ素／アルカリ（モル比，以下 Si/A 比）で，GP を作製してきた．対象は一般的なセメントコンクリートの使用が困難な箇所のコンクリート二次製品で，材料コストの低減要求はそれほど大きくなかった．一方，一般的なコンクリート代替として，より汎用的に GP を使用していくためには，より低コスト化が求められる．そこで，筆者らは，近年，「User-friendly」な系として，Davidovits が提唱する，水酸化 Na を使用せず水ガラスだけで GP を作製する手法を検証した（以下，マイルド法と記す）(2)．この手法は，筆者らの配合記述法で表した場合，A/W 比が低く，Si/A 比が極端に大きな配合に相当する（筆者らにおける一般的な配合：A/W 比 0.1 から 0.2 程度，Si/A 比 0.1～0.4 程度，マイルド法：A/W 比 0.1，Si/A 比=1 以上）．従来，筆者らは高 BS 置換率においては，必要 Si/A 比が小さくなり，低 Si/A 比で諸特性の向上が認められること等を報告している(3)．しかし，いわゆるマイルド法の様に極端に Si/A 比が異なる系の検証をしておらず，生成物他が全く異なることも考えられることから，今回，低 A/W 比，高 Si/A 比で GP 短まくらぎ等を試作し，その物性を検討した．

2 試料作製および試験

2.1 GP モルタルの作製及びGP短まくらぎの試作

まず，マイルド法での作製配合は，以下の要件に対応するよう決定した．すなわち 1)繊維補強短まくらぎを想定して 60MPa 程度の圧縮強度であること，2)コンクリート二次製品を作製できる可使時間を確保できることである．最初に，60MPa の圧縮強度は，処理溶液を 1.5 倍希釈 JIS1 号水ガラスとした場合，FA に対する BS 置換率が 40vol.%以上でクリア出来ることを確かめた．また，溶解法において 1 時間以上の可使時間を確保出来るのと比較して，40vol.%置換試料で 40 分以下と短くなるが，それ以上の置換率では，さらに可使時間が短くなることから 40vol.%の BS 置換率を選定した．表 1 にマイルド法および比較のために溶解法で作製した短まくらぎの配合を示す．なお，流動化剤としてオキシカルボン酸塩系 Na を溶解法と同様に使用したが，この系では本流動化剤において大きな効果は得られていない．短まくらぎの作製には，80℃-10 時間の蒸気養生を行い，繊維補強短まくらぎとして溶解法にて良好な結果が得られている PVA 繊維(4)を使用した．

表 1　マイルド法及び溶解法で作製した GP モルタルの配合

試番	A/W	Si/A	BS vol.%	PVA vol.%	単位量(kg/m³)							W
					FA	BS	SF	S	SP	ASS	AS	
M1	0.107	1.076	40.0	0	383	309	0	1129	12.8	420	0	267
M2	0.107	1.076	40.0	3.0	372	299	0	1092	12.4	409	0	260
M3	0.200	0.150	35.5	3.0	396	264	22.7	1118	26.6	0	99	218

試番 M1 および M2：マイルド法，試番 M3：溶解法
FA：フライアッシュ，BS：高炉スラグ，SF：シリカフューム，ASS：1.5 倍希釈 JIS1 号水ガラス，AS 市販 NaOH+純水，SP：オキシカルボン酸塩系ナトリウム，試番 M3：束原他(5)

2.2 試験方法

供試体は蒸気養生後，7日経過時のものを各試験に供した．圧縮強度はJIS A1108：2006 に準じ，割裂引張強度は JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準じて測定した．塩水浸漬試験は，JSCE-G572-2003(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))に準じて塩水に浸漬し，2ヶ月あるいは3ヶ月経過時に，全塩化物イオン(Cl^-)および可溶性Cl^-量をJIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準じて測定した．細孔径分布量は水銀ポロシメーターで測定した．一方，試作した短まくらぎについては，レール位置

キーワード：ジオポリマー，フライアッシュ，水ガラス，短まくらぎ
連絡先：〒185-8540　東京都国分寺市光町 2-8-38　TEL042-573-7338

断面の曲げ試験と埋込栓引抜き試験を行った.

3 結果と考察

図 1 に表 1 の配合で, マイルド法及び溶解法を用いて作製した GP モルタルの各種強度を示す. マイルド法作製試料の圧縮強度は 62MPa と, 同様の BS 置換率で作製した溶解法試料と比較して小さくなった. 一方, 繊維補強した試料の割裂引張強度は, 溶解法の 10.3MPa と比較して, 6.5MPa と繊維補強効果は小さかった.

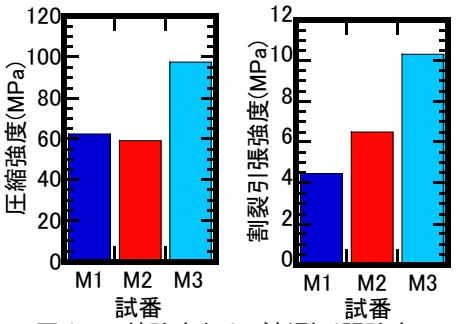

図 1 圧縮強度および割裂引張強度

作製法による GP の諸特性の違いを塩水浸漬試験で検討した. その結果, マイルド法で作製した試番 M1 は, Cl^-の浸透量が大きかった. 一方, マイルド法と溶解法の試料の細孔径分布は, 図 3 のようにマイルド法で作製した試料の総細孔容積がやや大きかったが, 目立った大きな径の細孔は認められなかったことから, その詳細は明らかではなく, 今後さらに検討する必要がある.

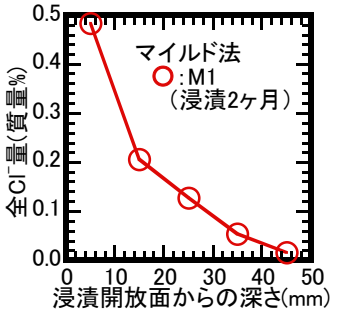

図 2 GP モルタルの塩水浸漬試験結果

図 4 はマイルド法および溶解法で作製した GP ペーストの粉末X線回折図である. 溶解法と比較すると, C-S-H のブロードなピークが小さかった. 一方, 非晶質構造に起因するハロー(幅広い山のようなピーク)位置に大きな相違は認められなかったが, 溶解法の方がハローの強度が大きく, 生成物に相違が認められた. ただし, 現在の所, その詳細は, 不明なため今後 ^{29}Si-NMR や ^{27}Al-NMR で検討していく予定である.

表 1 試番 M2 および M3 の配合で繊維補強-鉄筋減量 GP 短まくらぎを試作した結果を示す. 溶解法で作製した繊維補強-鉄筋減量 GP 短まくらぎは, 一般的な鉄筋量である市販短まくらぎの最高スペックのもの同等程度の性能を有する [5]のと比較して, 表 3 に示すとおりマイルド法で作製した短まくらぎの耐荷重は小さくなった. これは, 繊維補強効果が, 図 1 に示すように大きくなかったことが一因と推察される. ただし, 曲げ試験および埋込栓引抜試験の両方で, その保証荷重においてひび割れが生じないことから, 要求性能を満たすことは確かめられた.

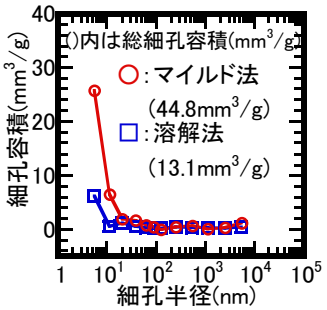

図 3 GP の細孔分布分析結果

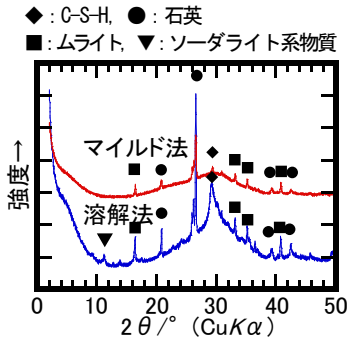

図 4 GP ペーストの粉末X線回折結果

4. まとめ

筆者らがこれまで検討してきた GP 硬化体（溶解法）と比較して A/W 比が低く, Si/A 比が極端に高い配合で作製した GP の諸特性を検討した. その結果, 塩分浸透特性等の耐久性や試作した短まくらぎの強度特性等において, 溶解法で作製した GP と比較して, やや劣る結果となったが, その用途によっては, 将来的に活用可能と考えられる. 今後, その生成物, 各種特性等をさらに明らかにし, その使用可能範囲等を明らかにしていきたい.

表2 マイルド法で作製した繊維補強短まくらぎの性能試験結果

項目	曲げ試験(kN)		埋込栓引抜き試験(kN)	
	ひび割れ発生荷重	保証荷重(29.4kN)	ひび割れ発生荷重	保証荷重(29.4kN)
試番M2	44.7 (0.78)	合格	41.7 (0.60)	合格
束原他[5]	61.3 (1.07)	合格	64.0 (0.91)	合格

保証荷重時にひび割れが発生しないものは合格.
( )内は市販コンクリート短まくらぎの数値に対する比.

参考文献

(1)上原他, ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質, コンクリート工学年次大会, 2015.
(2)Davidovits, Geopolymer cement based on European coal fly ashes, The European Research Project GEOASH, 2014.
(3)佐藤他, 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 等諸性質との関係, コンクリート工学年次大会, 2016.投稿中
(4)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大会, 2013.
(5)束原他, 繊維補強ジオポリマー短まくらぎの実用化に向けた試作, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015.