

論文 ジオポリマー硬化体の配合・作製法と諸性質

上原 元樹*1・南 浩輔*2・平田 紘子*3・山崎 淳司*4

要旨: 高炉スラグで置換したフライアッシュを主原料としたジオポリマー硬化体の諸性質とその配合、作製法との関係を検討した。その結果、作製法により生成物に大きな違いはないが、シリカフェーム添加法では低アルカリかつ高炉スラグ置換率の小さい領域で一般法と比較して強度が小さくなった。また、配合において高炉スラグの置換率が大きく、アルカリ濃度が高いとき、細孔が緻密化し強度や塩化物イオン浸透抑制効果が大きくなることがわかった。一方、ケイ酸アルカリ溶液におけるケイ素量は、他の配合組成と比較して、本試験の範囲内では強度や細孔構造に与える影響が小さかった。

キーワード: ジオポリマー、配合、SF 添加法、塩化物イオン、乾燥収縮、フライアッシュ、高炉スラグ

1. はじめに

ジオポリマー（以下 GP と略す）硬化体とはフライアッシュ（以下 FA と略す）などの非晶質粉体とケイ酸アルカリ溶液との反応で非晶質ポリマーが生成して硬化したものである¹⁾。これは、CO₂低減効果に優れている点、種々の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新材料の観点からも注目されて研究が進められている^{2,3)}。近年、種々の配合の GP 材料が研究されているが、その研究例の多くは、高炉スラグ（以下 BS と略す）で一部置換した FA を主原料として、NaOH 等の高アルカリ溶液と水ガラスを使用して作製する手法である。しかし、GP 硬化体の配合と諸性質との相関は複雑であり、明確になっていない。したがって、GP 硬化体の実用化を進めるためには、その配合の基本的な考え方を明らかにし、それら配合と諸性質との関係を明確にする必要がある。そこで、本研究では、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性質の関係を検討した。また、筆者らは、一般的な水ガラスを使用する方法に加えて、ケイ素源となる材料として、水ガラスの代わりにシリカフェーム（以下 SF と略す）粉体を試料混合中に加えることで、凝結開始までの時間を延伸する手法を開発している⁴⁾。そこで、これら作製手法の相違が諸性質に与える影響も合わせて検討した。

と水(H₂O)を成分として構成される NaOH 溶液あるいはカリウム(K)と H₂O を成分とする KOH 溶液、および Na、ケイ素(Si)、H₂O を成分とする水ガラスである。したがって、溶液の記述は、アルカリ成分として Na と K のモル数を足したものと H₂O のモル数との比、すなわちアルカリ/H₂O 比（モル比）と、Si とアルカリ成分のモル数の比（Si/アルカリ比（モル比））、そして単位容積あたりの H₂O 量（単位水量）で全記述が可能である。

一方、粉体部分に関しては、同一粉体ならば上記溶液配合のアルカリ/H₂O 比に圧縮強度が比例することなどがわかっている⁵⁾。ただし、粉体の化学組成と反応性との相関は必ずしも明確ではないため、現在、GP 硬化体の配合記述において、BS の置換率を記述する以外は、粉体の化学組成を考慮していない。

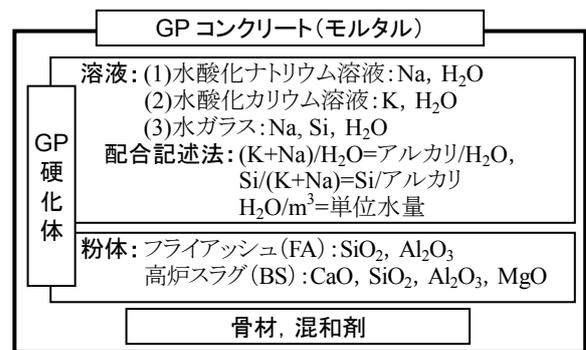


図-1 GP 硬化体の構成成分と溶液配合の記述法

2. 試料調製

2.1 配合の基本的な考え方

GP 硬化体の特性は、「溶液部の構成材料」と「粉体部の構成材料」が相互に複雑に影響するが、その全容は未だに明らかになっていない（図-1 参照）。

まず、溶液部分であるが、主な材料はナトリウム(Na)

2.2 作製法

現在、筆者らは大きく分けて二つの方法で GP 硬化体を作製している。一つは、図-1 に示したとおり Si 供給源として水ガラスを使用する方法（以下、「一般法」と記す）、他の一つは Si 源として水ガラスの代わりに SF 等の

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 博士 (工学) (正会員)

*2 前田建設工業 (株) 技術研究所 工修 (正会員)

*3 早稲田大学 理工学術院 創造理工学部

*4 早稲田大学 理工学術院 創造理工学部 教授 博士 (工学)

SiO₂ 微粉末を用い、練混ぜ時に添加して溶解させる筆者らが提案した「SF 添加法」である⁴⁾。一般法では、アルカリ源として K 成分を用いず Na 成分を単独使用した場合、配合によっては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。そのため、幅広い配合に対応するためには KOH 溶液を併用することが多い。しかし、KOH 溶液は NaOH 溶液より高価であり、かつ同様のアルカリ量とするためには、NaOH に対しておよそ 1.4 倍量が必要となる。一方、SF 添加法では、凝結が起ころづらく、アルカリ源として Na 成分単独でも GP 硬化体の作製が容易である⁴⁾。

2.3 GP コンクリートの作製

GP コンクリート（以下 GP-C と略す）は、GP-C としでの基本的な物性を把握するために、水ガラスを用いる一般的な作製法である「一般法」を用いて作製した。ここで、十分な可使時間を得るために Na 系の水ガラスに加えるアルカリ水酸化物は KOH として、種々のアルカリ/H₂O 比および BS 置換率で GP-C を作製した（表-1）。養生温度は 80℃、12h 相当である。

表-1 GP-C の配合

試番	配合条件				単位量(kg/m ³)						
	AL/W	Si/AL	水量 kg/m ³	BS 置換率	FA	BS	S	G	ASS	A1	A2
1	0.10	0.30	139	20%	335	101	757	892	193	8.71	0.52
2	0.15	0.30	133	0%	418	0	757	892	209	8.37	0.75
3	0.15	0.30	133	20%	335	101	757	892	209	8.71	0.50
4	0.15	0.30	133	30%	293	151	757	892	209	8.88	0.43
5	0.20	0.30	127	20%	335	101	757	892	224	8.71	0.35

AL/W:アルカリ/H₂O のモル比, Si/AL:Si/アルカリのモル比, FA:フライアッシュ (JIS I 号), BS:高炉スラグ微粉末(4000 プレーン), S:細骨材, G:粗骨材, ASS:「48%KOH 溶液+JISIII 号水ガラス+純水」を配合条件で混合, A1:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系), A2:助剤

表-2 GP-M の配合

試番	配合条件				単位量(kg/m ³)						
	AL/W	Si/AL	水量 kg/m ³	BS 置換率	FA	BS	S	AS	SF	A1	
6	0.174	0.257	189	13%	570	103	1311	263	29.6	13.1	
7	0.174	0.302	189	13%	569	103	1307	262	34.6	13.0	
8	0.174	0.355	188	13%	567	102	1303	261	40.5	13.0	
9	0.174	0.257	189	22%	512	175	1311	263	29.6	13.1	
10	0.174	0.302	188	22%	510	174	1307	262	34.6	13.0	
11	0.174	0.355	188	22%	508	174	1303	261	40.5	13.0	

AL/W:アルカリ/H₂O のモル比, Si/AL:Si/アルカリのモル比, FA:フライアッシュ (JIS I 号), BS:高炉スラグ微粉末(4000 プレーン), S:細骨材, AS:「市販 NaOH 粉末+純水」を配合条件で混合, A1:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系)

2.4 GP モルタルの作製

GP モルタル（以下 GP-M と略す）供試体は、将来的にコンクリートにおいても Na 系材料だけで幅広い配合範囲で作製することを考慮して「SF 添加法」を用いて作製した（表-2）。SF 添加法を用いたことで、K 成分を使

用せずとも十分な可使時間が得られるため、アルカリ成分は全て NaOH とした。ここで、SF の溶解量は練混ぜ時の温度に依存する。そのため、その単位量の計算には、練混ぜ時の温度相当の NaOH 溶液に所定量の SF を混ぜたときの溶液の実測密度を用い、練り上がり温度は 30℃ 以上になるようにした。養生条件は上記 GP-C と同様とし、Si/アルカリ比と BS 置換率を変えたものを作製した。

その他、種々の比較用に表-1 および表-2 の配合に準じて、GP-M や GP 硬化体を SF 添加法あるいは一般法で作製し、各種試験用途に使用した。

3. 分析

10φ×20cm の GP-C 供試体および 5φ×10cm および 4×4×16cm の GP-M 供試体を用い、養生脱型後、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」、および JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準拠し、圧縮強度、引張強度、曲げ強度を測定した。なお、GP-M の曲げ強度試験は中央載荷法により実施した。

乾燥収縮量は蒸気養生脱型後 10φ×20cm の円柱供試体を 7 日間水中浸漬後、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。

蒸気養生後 2 日の 10φ×20cm(GP-C) および 5φ×10cm(GP-M) の円柱供試体の開放 1 面以外をコーティングし、JSCE-G 572-2010 に準じて塩水に浸漬し、3 ヶ月あるいは 8 ヶ月経過時に開放面から 1cm 毎に全塩化物イオンおよび可溶性塩化物イオン量を 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。

さらに、各試料の細孔径分布量を水銀ポロシメーター

アルカリ/H₂O 比=0.10:●○, =0.15:▲△, =0.20:◆◇
Si/アルカリ=0.35(固定)

(a)塗りつぶし:SF 添加法, (b)白抜き:一般法

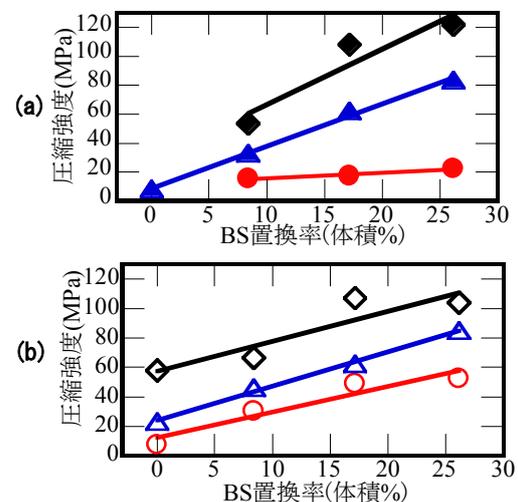


図-2 GP-M の作製法と圧縮強度

により測定した。また、GP-C や GP-M と同様の配合で作製した GP 硬化体の局所構造を固体核磁気共鳴 (MAS NMR) 測定装置で検討した。

4. 結果と考察

4.1 配合, 作製法と強度

図-2 は、一般法および SF 添加法における作製法の相違が圧縮強度に与える影響を調べたものである。アルカリ/H₂O 比, BS 置換率が大きい領域では同等の強度が得られるが, アルカリ/H₂O 比あるいは BS 置換率が小さい領域では, SF 添加法の供試体の強度が小さくなった。この理由は検討中であるが, アルカリ濃度が低いと SF が溶解しづらいことに加え, BS 置換率が小さいと, C-S-H の生成が少なく Si 成分が消費されず, SF の溶解が進行しないためと推察している。

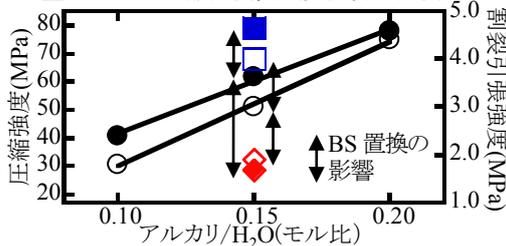
表-3 GP-C および GP-M のフレッシュ性状

試番	1	2	3	4	5	
S.L.F(cm)	69.5× 68.5	70.5× 69.5	69.6× 68.6	68.6× 67.6	66.4× 65.7	
Air(%)	4.8	5.3	4.8	4.7	4.0	
試番	6	7	8	9	10	11
モルタルフロー (15打)(mm)	232× 232	229× 229	222× 222	230× 228	232× 229	232× 227

表-3 に表-1 と表-2 で作製した GP-C および GP-M のフレッシュ性状を記す。混和剤によりに空気量, フロー値ともに十分にコントロールすることが可能である。

図-3 は, 表-1 で作製した GP-C の圧縮強度および割裂引張強度であり, 図-4 は表-2 で作製した GP-M の圧縮強度と曲げ強度を表す。図-3 から同一 BS 置換率

BS=0 体積%: ◆◇, =20 体積%: ●○, =30 体積%: ■□
塗りつぶし: 圧縮強度, 白抜き: 引張強度



アルカリ/H₂O 比=0.10: ◆◇, =0.15: ●○, =0.20: ■□
塗りつぶし: 圧縮強度, 白抜き: 引張強度

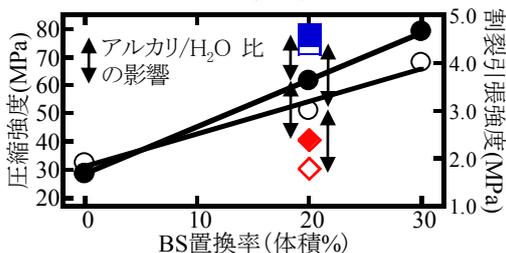
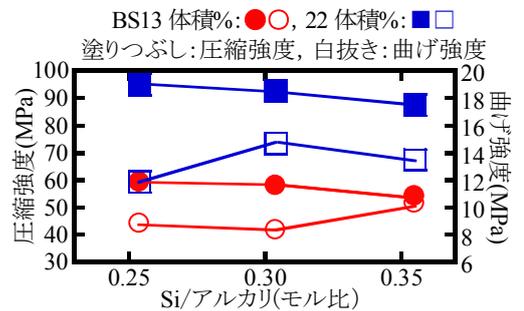


図-3 GP-C の配合と強度

ならアルカリ/H₂O 比に応じて, 同一アルカリ/H₂O 比なら BS 置換率に応じて圧縮および引張強度が大きくなるのがわかった。また, 圧縮強度に対する引張強度の比は, BS 置換率が増加すると, 今回の試験ではやや低下する傾向が認められたが, アルカリ/H₂O 比に対しては, むしろ大きくなる傾向が認められた。一般的に割裂引張試験における引張強度は誤差が大きいため, 絶対値としての評価は難しいが, 後で示すようにアルカリ/H₂O 比が大きいときは, いわゆるアルミノケイ酸塩構造が増加するのに対して, BS 置換率の増加は BS 起源のいわゆる C-S-H が増加するといった, 生成物質が異なることに起因して, 上記傾向が認められるものと考えられる。



Si/アルカリ比=0.254: ●○, =0.304: ◆◇, =0.355: ▲△
塗りつぶし: 圧縮強度, 白抜き: 曲げ強度

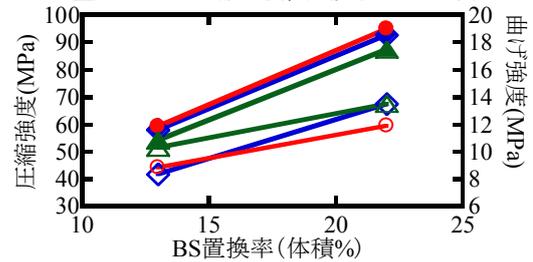


図-4 GP-M の配合と強度

図-4 から SF 添加法の場合, Si/アルカリ比が大きくなると, 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, 一方, 曲げ強度に関しては BS 置換率により最も大きくなる Si/アルカリ比の配合が異なることがわかった。佐藤他(2013)⁴⁾では, 一般法で作製した GP-M において曲げ強度は Si/アルカリ比=0.35 で最も大きくなることを報告しているが, その結果とは若干異なっていた。ただし, Si/アルカリ比の変化に対する各強度の影響は小さく, 空気量, 水分量, 混和剤量によるフレッシュ状態における粘性の差等, 細かな性状の相違により曲げ強度は変わるため, さらに詳細な検討が必要である。

4.2 塩水浸漬試験結果

GP 硬化体は, 全て K 系の材料を利用して作製する場合, 全て Na 系を利用して作製する場合, その両方を混合して使用する場合がある。流動性などフレッシュ性状の点で K 系材料が優れているが, 同一配合ならば強度に

において大きな差がないことは既にわかっている⁵⁾。一方、イオン交換能を有する GP 硬化体において、K 系 GP 硬化体では K と Na のイオン交換反応により、塩化物イオンの浸透が促進されることも懸念される。そこで、まず Na 系および K 系材料のみで各 GP-M を作製し、その塩水浸漬試験を行った。

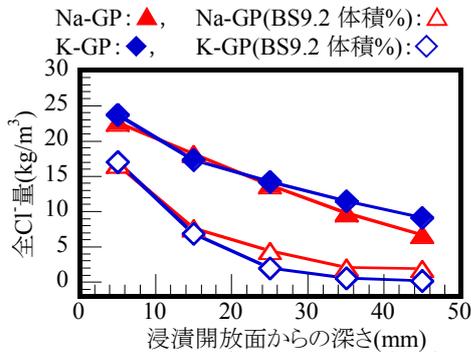


図-5 K-GP-M および Na-GP-M の塩化物イオン浸透特性
アルカリ/H₂O 比=0.25, Si/アルカリ比=0.33, 単位水量 170kg/m³, BS 置換率 9.2 体積%

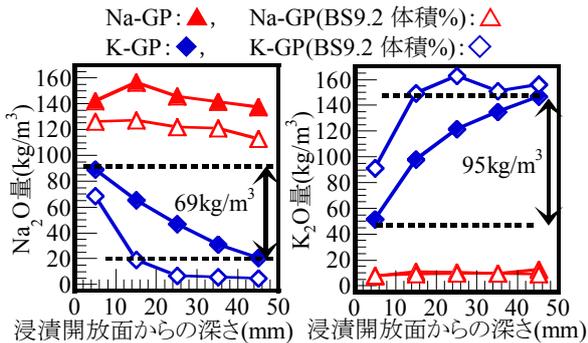


図-6 K-GP-M および Na-GP-M の Na₂O および K₂O 浸透特性
アルカリ/H₂O 比=0.25, Si/アルカリ比=0.33, 単位水量 170kg/m³, BS 置換率 9.2 体積%

図-5 は一般法で作製したアルカリ源を全て K あるいは Na とした GP-M の塩水浸漬試験 8 ヶ月経過時の結果である。図から BS を使用していない GP-M の塩化物イオン浸透は大きい。BS で 9.2 体積%置換した GP-M は、塩化物イオン浸透深さが小さかった。ここで、図-6 の K-GP 試料 (図中◆, ◇) において、Na 浸透領域における Na₂O 増加量 69kg/m³ と K₂O 減少量 95kg/m³ をモル換算すると、K₂O が 1008 モル/m³, Na₂O が 1113 モル/m³ とほぼ同量であった。したがって、いわゆるイオン交換反応により、GP-M の K 成分が Na 成分と等量交換していることがわかった。ただし、K-GP および Na-GP に関して、塩化物イオン浸透挙動に大きな差はなく、GP 硬化体において作製イオン種の影響は小さく、K と Na のイオン交換が塩化物イオンの浸透に影響しないことがわかった。また、BS の置換効果に関しても Na および K-GP

において大きな差がないことがわかった。

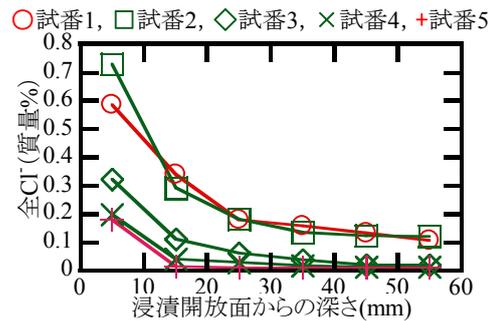


図-7 GP-C の塩水浸漬試験結果 (表-1 の配合で作製)

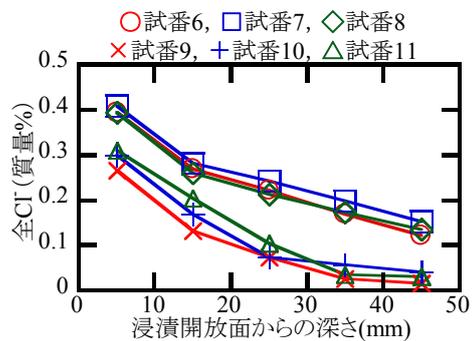


図-8 GP-M の塩水浸漬試験結果 (表-2 の配合で作製)

図-7 は表-1 の配合において一般法で作製した GP-C、図-8 は表-2 の配合において SF 添加法で作製した GP-M の塩水浸漬試験結果 (3 ヶ月経過時) である。GP-C では、同一アルカリ/H₂O 比ならば BS 置換率が大きいほど、同一 BS 置換率の場合、アルカリ/H₂O 比が大きいほど塩化物イオンの浸透速度が小さかった。一方、SF 添加法でも同様の結果が得られており、Si/アルカリ比の小さい方がやや浸透が抑制される傾向があるようだがその影響は小さかった。

表-4 塩水浸漬 GP 硬化体の可溶性塩化物イオン量

試番	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
a/b(%)	92	77	62	66	56	76	81	76	79	80	74

注 a/b(%) : 可溶性塩化物イオン/全塩化物イオン(%)

表-4 は浸漬開放面から最も浅い領域の可溶性塩化物イオン量の全塩化物イオンに対する割合を記したものである。図-9 は、浸漬開放面から最も浅い領域の各試料における粉末 X 線回折図である。BS 置換率が大きくアルカリ量が多いとき、やや可溶性塩化物イオン量が減少するが、その差は小さい。図-9 から結晶質物質は骨材および FA 起源の鉱物であり、フリーデル氏塩のような、いわゆる Cl を固定する結晶質物質は認められなかった。未同定の物質がわずかに存在するが、図に示していない

塩化物イオンが浸透していない領域でも同様に認められており、特に塩化物イオンとは関連していないものと推察される。したがって、FA あるいは BS 起源で生じる非晶質物質が少量の塩化物イオンを固定化するが、フリーデル氏塩等が生じるポルトランドセメント硬化体と比較して Cl を固定する量は少ないものと考えられる。

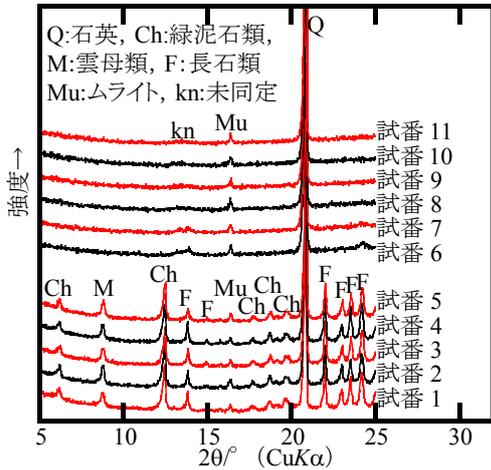


図-9 塩水浸漬 GP-C, GP-M の粉末 X線回折図
表-1 および表-2 の配合で作製。図-7 および
図-8 における浸漬開放面から最表面部

4.3 乾燥収縮特性

図-10 は GP-C の乾燥収縮測定結果である。同一 BS 置換率では、アルカリ/H₂O 比の大きなものほど長さ変化率が小さかったが、本試験の配合では 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。また、BS 置換のない試料では質量減少率は大きかったが、乾燥収縮量は必ずしも大きくなかった。これは、後に示す細孔の大

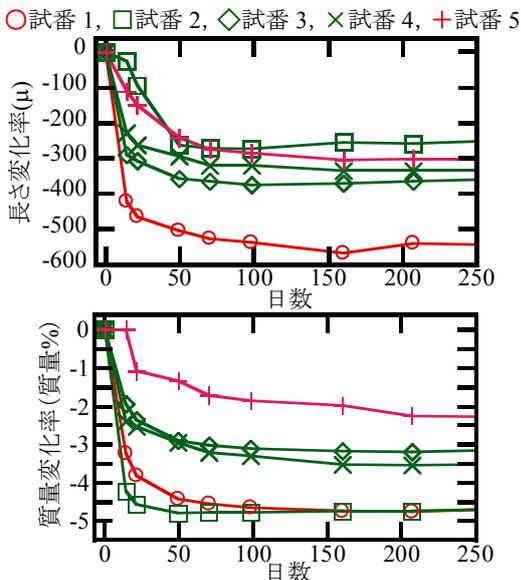


図-10 GP-C の乾燥収縮試験結果
表-1 の配合で作製

きさに関連しているものと推察される。

4.4 GP 硬化体の細孔組織および生成物

図-11 は表-1 および表-2 の配合により作製した GP 硬化体の細孔径分布を水銀圧入法により測定した結果である。BS の置換により、40nm および 130nm の細孔半径を示す細孔が減り、より微細な細孔が増えること、総細孔容積が減少することがわかった。また、アルカリ/H₂O 比も BS 置換ほど顕著ではないが、それが大きくなると微細な細孔が増加して総細孔容積は減少した。したがって、本試験の配合では BS 置換の乾燥収縮に与える影響に関して明確ではなかったが、多くの場合、BS 置換やアルカリ/H₂O 比を大きくすることで緻密化し、塩化物イオン浸透量は小さくなり、乾燥収縮なども小さくなる傾向と考えられる。ただし、BS 無置換の試番 2 のように、非常に大きな細孔を持つ場合、水分逸脱量が多いものの、毛細管収縮が小さく乾燥収縮量がむしろ小さくなる場合もある。一方、SF 添加法で作製した試番 6 から 8 において、Si/アルカリ比の影響は他の要因と比較して本試験の配合内 (Si/アルカリ比=0.25~0.35) では小さかった。ただし、本試験配合の範囲外では、Si/アルカリ比の大小が乾燥収縮量に大きく影響するデータも得られており細孔構造に影響するものと考えられることから、今後作製法による相違にも注意しながら詳細に検討する必要がある。

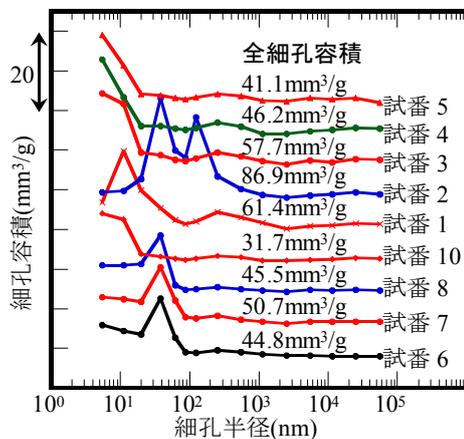


図-11 GP-C および GP-M の細孔分布分析結果

図-12 は GP 硬化体の生成物の構造を確かめるため、SF 添加法および一般法で作製した同一配合の GP 硬化体 (配合は図-2 においてアルカリ/H₂O=0.20, BS=17.2 体積%と同じ) および表-1 で作製した GP-C と同一配合の GP 硬化体を一般法で作製した²⁹Si NMR スペクトル図 (CP MAS 法および MAS 法) である。なお、Al に関して²⁷Al NMR スペクトルを測定したが、ほぼ全てが四配位の Al として存在していることを確かめた。ここで、SF 添加法と一般法で、SF 添加法の方のピークがややブロードであるが、その位置に大きな差はなく、作製法に

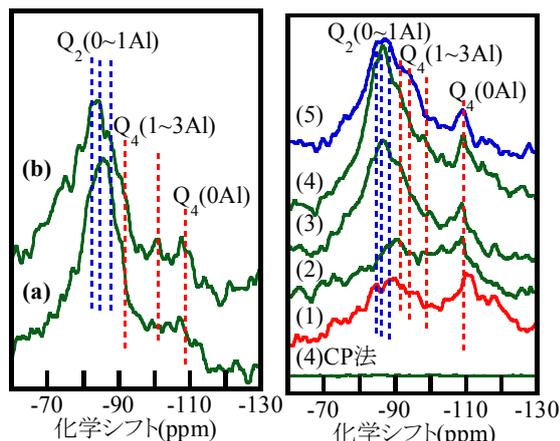


図-12 GP硬化体の²⁹Si-MAS NMRおよび²⁹Si-CPMAS NMRスペクトル図

(a)一般法, (b)SF添加法, アルカリ/H₂O=0.20, Si/アルカリ=0.35, BS=17.4体積%
(1)~(5)は表-1の試番1~5と同一配合。(4)CP法は表-1の試番4をCP法で測定。他はMAS法。

より生成物そのものの構造に大きな相違はないことが確かめられた。SF添加法で作製した試料のピークがよりブロードなのは、一般法の方がより反応が進行し、結晶質に近づいているためと推察される。

ここで、²⁹Si NMR スペクトルのピークはQ_nで表される。QはSiO₄四面体を、nは縮重度を表し、n個のO原子が隣接するSiによって共有されていることを表す。FAを原料とするGP硬化体は4つの酸素が全て共有されているゼオライトのような3次元構造のQ₄で表される。また、SiO₄四面体にO原子を共有して1個のAlO₄四面体が結合するとQ₄(1Al)、順に2,3,4個結合した場合をQ₄(2~4Al)と表し、NMRスペクトルはAl結合量に応じて低磁場シフトする⁵⁾。一方、BSのアルカリ刺激で-80~-85ppm付近に、Siの一部をAlが置換するカルシウムシリケート水和物(C-S-H, SiをAlが一部置換すると考えられることからC-S(A)-Hと記す)に起因するQ₂(0~1Al)のピークが生じることが知られている⁶⁾。図-12を見ると同一アルカリ量では、BS置換率が増えるにつれて、-80~-85ppm付近のピークが増大し、C-S(A)-Hが生じていることがわかる。一方、同一BS置換率でアルカリ量が多くなると、このBS起源のピークが増大と共にQ₄(1~3Al)のアルミノシリケート構造を示す物質が増加している。このことから、いわゆるFAをBSで置換したGP硬化体は、FAから生じるアルミノケイ酸塩構造とBSから生じるC-S(A)-Hの混合物であることがわかった。ただし、Wang(2003)⁶⁾によるとBS単独のアルカリ刺激物質であるC-S(A)-Hは水和物であることから、CP法でピークが得られることが特徴とされている。しかし、本試験では図-12から明らかなようにピークが得られていない。したがって、従来から知られているBS単独のアルカリ

刺激物質とは、水和量が少ない等、細部で異なる可能性も示唆されるが、詳細はさらに検討する必要がある。

5. まとめ

アルカリ/H₂O比, Si/アルカリ比, およびBS置換率の異なるFAを主原料としたGP硬化体を、Si成分として水ガラスを用いる「一般法」および、SF微粉を練混ぜ時に溶かす「SF添加法」で作製した。以下に、その配合と作製法に対する諸性質との関係を検討した結果を記す。

- (1) アルカリ/H₂O比およびBS置換率の大きい成分領域でSF添加法の適用が可能であることがわかった。
- (2) 同様の強度が得られる範囲内において、作製法により、生成物の構造に大きな相違はなかった。
- (3) BS置換により40nmおよび130nmの大きな細孔が減少することで、各種強度、塩化物イオン浸透抵抗性が増大し、乾燥収縮特性にも影響が認められた。
- (4) アルカリ/H₂O比が大きくなると、細かな細孔が増えることで、各種特性の向上が認められた。
- (5) アルカリ/H₂O比が大でQ₄構造が、BS置換率が大でQ₂構造が増加し、生成物の相違により曲げ強度や引張強度に与える影響が異なっていた。
- (6) 本試験の範囲では各種強度や細孔構造に与えるSi/アルカリ比の影響は、その他要因と比較して小さかった。

参考文献

- 1) Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., and Deventer J.S.J., The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete', Cement and Concrete Research, Vol.37, pp.1590-1597, 2007
- 2) 上原元樹, 佐藤隆恒, 大内悠人, 山崎淳司: フライアッシュを原料としたH⁺型ジオポリマーの作製とイオン交換特性, 粘土科学, 第53巻, 第1号, pp8-15, 2014
- 3) 原田耕司, 一宮一夫, 津郷俊二, 池田攻: ジオポリマーの諸特性に関する一考察, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp1894-1899, 2012
- 4) 佐藤隆恒, 束原実, 大木信洋, 上原元樹: 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, Vol.35, No.1, pp2023-2028, 2013
- 5) 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.
- 6) Wang S. D. and Scrivener K. L.: ²⁹Si and ²⁷Al NMR study of alkali-activated slag, Cement and Concrete Research, Vol.33, (2003) pp769-774, 2003