

論文 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

佐藤 隆恒¹・上原 元樹²・南 浩輔³・山崎 淳司⁴

要旨: 高炉スラグ (BS) で一部置換したフライアッシュを出発材料としたジオポリマー硬化体について種々の配合, 作製法における生成物及びpH等の諸性質を検討した。その結果, BS置換によりケイ酸Ca水和物が生じ, BS置換率が高く, アルカリ/水 (A/W比) が大きい試料ほど, その硬化体pHが高くなった。一方, ケイ素/アルカリの影響は, 本試験配合内において他の要因と比較して小さかったが, それが小さくなるにつれ総細孔容積が減少した。また, 筆者らが提案した「Si成分粉体添加その場溶解法」においてA/W比0.20及びBS35.5vol.%の配合では, 水ガラスを使用する一般法との間に諸性質の大きな相違は認められなかった。

キーワード: ジオポリマー, 高炉スラグ, pH, 鉄筋腐食, 塩化物イオン

1. はじめに

ジオポリマー (以下, GP と記す) とは, フライアッシュ (以下, FA と記す) 等の非晶質粉体とケイ酸アルカリ溶液 (水ガラス+水酸化アルカリ溶液) との反応により重合硬化したものであり, CO₂ 排出量の削減や産業副産物の有効利用の観点から着目されている¹⁾。現在, GP の多くは FA を出発粉体としており, この場合, 非晶質であるがゼオライト類似のアルミノシリケート構造が生じる。しかし, 近年, 強度増進の観点から出発粉体において, FA の高炉スラグ (以下, BS と記す) 置換が行われ, その場合, BS 中のカルシウム (Ca) 成分の影響のため, 生成物が異なることが報告されている²⁾。

筆者らは, これまでに GP-PC まくらぎ等を試作し, それらが要求性能を満たすことを示してきた³⁾。ただし, 初期に試作したものは, 水ガラスを使用する一般的な作製法で, 凝結を防止し可使時間を得るためにカリウム (K) 系材料を使用していた³⁾。しかし, 最近では, ケイ素 (Si) 成分として SiO₂ 粉体を試料混合中に加えることで, 凝結開始時間を延伸させる手法「Si成分粉体添加その場溶解法」の提案により, ナトリウム (Na) 成分の単独使用でも, 高アルカリ成分, かつ高 BS 置換率の配合で作製が可能となってきた²⁾。一方, BS 置換により塩化物イオン浸透の抑制が報告されており, 塩害地域用短まくらぎ等の使用で想定される BS 置換率も高くなっている⁴⁾ことから, 上原他²⁾での報告より高い BS 置換率での諸特性の検討も必要になってきた。このように, 現在では種々の作製法, 配合で GP が作製されており, その生成物も大きく異なるにも関わらず, その詳細はよくわかってい

ない。したがって, GP の実用化を進めるためには, それら作製手法, 配合と諸性質との関係を明確にする必要がある。そこで, 本研究では各種手法で作製した GP における生成物と諸性質の関係を検討した。

表-1 使用材料の緒元

材料名	記号	規格等	
フライアッシュ	FA	I種(JIS A 6201)密度:2.40g/cm ³	
高炉スラグ	BS	4000プレーン(JIS A 6206) 石膏添加:無 密度:2.91g/cm ³	
細骨材	S	モルタル	福島県産硬質砂岩 絶乾密度:2.60 g/cm ³
		コンクリート	静岡県産珪砂 絶乾密度:2.60 g/cm ³
粗骨材	G	千葉県産砕石 絶乾密度:2.69 g/cm ³	
シリカフューム	SF	JIS A 6207	SiO ₂ =97%計算

2. 試料作製法

2.1 作製法概要

前章で示したように筆者らは二つの手法で GP 硬化体を作製している²⁾。一つは, 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 供給源として水ガラスの代わりにシリカフューム (以下, SF と記す) 等の SiO₂ 微粉末を用い, 練混ぜ時に添加してミキサー内でその場溶解させる「Si成分粉体添加その場溶解法」 (以下, 溶解法と記す) である²⁾。一般法では, アルカリ量の多い領域で, Na 成分を単独使用した場合, 配合によっては常温, ミキサー内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, 広い配合に対応するために KOH 溶液を併用することが多いが, KOH は NaOH より高価である。また, BS 置換率

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 修士 (正会員)
 *2 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 博士 (工学) (正会員)
 *3 前田建設工業 (株) 技術研究所 修士 (正会員)
 *4 早稲田大学 理工学術院 創造理工学部 教授 博士 (工学)

が高い場合は、さらに凝結開始までの時間が短くなり、広い配合範囲で硬化体を作製することは難しい。一方、溶解法では凝結が起こりづらく、高い BS 置換率、Na 成分単独でも GP の作製が容易であることが特徴である。表-1 に本試験で使用した材料の一覧を示す。

2.2 試料作製

(1) GP ペースト

各配合における生成物を検討するために、一般法あるいは溶解法を使用して、表-2 に示す配合で GP ペーストを作製した。なお、本研究の配合記述は、上原他²⁾の配合記述法に則り、アルカリ/水 (モル) 及びケイ素/アルカリ (モル) をそれぞれ A/W 比及び Si/A 比と記す。

一般法において、一般的には市販の水ガラスと水酸化アルカリ溶液を混合してケイ酸アルカリ溶液を作製するが、本試験では種々の Si/A 比の試料を簡便に得るために、NaOH 溶液にシリカ微粉末 (SiO₂=98% 計算) を完全に溶解させることで、ケイ酸 Na 溶液を作製した。FA 及び BS の混合粉体に作製したケイ酸 Na 溶液を加えてミキサーで良く練混ぜ、流動化・遅延剤としてグルコン酸 Na を所定量加えて再度練混ぜた後、型枠に充填・密封し、養生を上昇 80°C/4h, 80°C-10h 一定, 降下 20°C/3h (以下, 80°C-10h と記す) とした。

(2) GP モルタル

GP モルタルを一般法及び溶解法で作製した。各配合を表-3 及び表-4 に示す。なお、表-3 は基本的には鉄筋腐食試験体として作製したものであり、溶解法での実使用を考慮して BS は 35.5vol.% とし、配合・作製法と鉄筋腐食特性との相関を検討している。一方、表-4 は、

表-2 GP ペーストの配合 (溶解法及び一般法)

試番	配合条件			試番	配合条件				
	A/W	Si/A	BS 置換率 (vol.%)		A/W	Si/A	BS 置換率 (vol.%)		
P1	0.15	0.15	0	P16	0.20	0.35	0		
P2			20	P17			20		
P3			40	P18			40		
P4			0	P19			0		
P5		0.25	0.35	20		P20	0.25	0.25	20
P6				40		P21			40
P7				0		P22			0
P8				20		P23			20
P9				40		P24			40
P10				0		P25			0
P11	0.20	0.15	20	P26	0.35	0.35	20		
P12			40	P27			40		
P13			0						
P14			20						
P15			40						

A/W: ケイ酸 Na 溶液成分中の Na と水のモル比

Si/A: ケイ酸 Na 溶液成分中の Si と Na のモル比

注1: 溶解法ではシリカフェーム中の Si と NaOH 溶液中の Na のモル比

注2: 水量 (純水量) は BS 無置換試料において FA に対して質量比 0.29 とした。BS 置換試料においては全粉体に対して BS 無置換試料と同一体積比となるように水量を調整した。

注3: 流動化剤としてグルコン酸 Na を添加した。添加量は BS 無置換試料において、粉体に対する質量比を 2.0% とし、BS 置換試料において全粉体に対する体積比がそれと同じになるよう調整した。

溶解法における配合と強度、その他の諸特性との関係などを精査するために作製したもので、BS 置換率、Si/A 比、A/W 比等を変えて種々の配合で作製した。一般法は NaOH 溶液と JIS1 号水ガラスを混合したケイ酸 Na 溶液を使用して、FA 及び BS の混合粉体をミキサーで攪拌した。一方、溶解法は NaOH 溶液と FA、BS 及び SF の混合粉体をミキサーで攪拌した。養生はそれぞれ 80°C-10h とした。NaCl を所定量添加した鉄筋腐食試験体は 10×10×10cm とし、中央に φ13mm の異形鉄筋 (D13 SD345) をかぶり 43.5mm で配置した。

表-3 溶解法及び一般法で作製した GP モルタルの配合

試番	配合条件				単位量 (kg/m ³)								A1 wt.%	圧縮強度 MPa
	A/W	Si/A	水量 kg/m ³	BS vol.%	FA	BS	S	AS	ASS	SF	GNa			
M1	0.20	0.15	199	35.5	400	267	1334	289	0	21	13	0	119	
M2	0.20	0.15	199	35.5	400	267	1334	289	0	21	13	1.2	119	
M3	0.20	0.15	199	35.5	400	267	1334	289	0	21	13	2.4	122	
M4	0.20	0.25	199	35.5	399	266	1330	287	0	34	13	0	120	
M5	0.20	0.25	199	35.5	399	266	1330	287	0	34	13	1.2	116	
M6	0.20	0.25	199	35.5	399	266	1330	287	0	34	13	2.4	109	
M7	0.20	0.35	199	35.5	397	265	1324	286	0	47	13	0	119	
M8	0.20	0.35	199	35.5	397	265	1324	286	0	47	13	1.2	111	
M9	0.20	0.35	199	35.5	397	265	1324	286	0	47	13	2.4	111	
M10	0.20	0.25	199	35.5	428	285	1427	0	243	0	14	0	120	
M11	0.20	0.25	199	35.5	428	285	1427	0	243	0	14	1.2	117	
M12	0.20	0.25	199	35.5	428	285	1427	0	243	0	14	2.4	111	

試番 M1-9: 溶解法, 試番 M10-12: 一般法, GNa: グルコン酸 Na, AS: 市販 NaOH+純水 (溶解法), ASS: 市販 NaOH+JIS1 号水ガラス+純水 (一般法), S: 細骨材 (密度 2.60g/cm³), A1: 亜硝酸 Na 鉄筋腐食試験用試験体は上記配合に 2.4kg/m³ の Cl 量となるよう NaCl を添加した。

表-4 溶解法で作製した GP モルタルの配合

試番	配合条件				単位量 kg/m ³							強度 MPa	
	A/W	Si/A	水量 kg/m ³	BS vol.%	FA	BS	S	AS	SF	GNa	圧縮	引張	
M13	0.20	0.25	207	35.5	432	288	1187	274	35	28	121	6.6	
M14	0.20	0.30	206	35.5	431	287	1182	273	42	28	124	4.8	
M15	0.20	0.35	205	35.5	429	286	1178	272	49	28	121	4.6	
M16	0.20	0.30	206	21.6	524	175	1182	273	42	28	102	5.0	
M17	0.20	0.30	206	14.5	572	117	1182	273	42	28	86	5.2	
M18	0.15	0.25	207	35.5	439	293	1213	251	27	29	108	5.3	
M19	0.15	0.30	207	35.5	438	292	1209	251	32	29	99	4.8	
M20	0.15	0.35	206	35.5	437	291	1207	250	37	29	86	4.5	
M21	0.15	0.30	207	21.6	533	178	1209	251	32	29	82	4.4	
M22	0.15	0.30	207	14.5	581	119	1209	251	32	29	74	4.8	

AS: 市販 NaOH 粉末+純水, S: 細骨材 (密度 2.60g/cm³)

(3) GP コンクリート

一般法により GP コンクリートを作製した。その配合を表-5 に示す。48% KOH 溶液と JIS3 号水ガラスを混合したケイ酸アルカリ溶液を使用し、FA 及び BS の混合粉体をミキサーで練混ぜた。養生は 80°C-10h とした。NaCl を所定量添加した鉄筋腐食試験用試験体は 10×10×40cm とし、かぶりが 30.5mm 及び 50.5mm の位置に φ19mm の異形鉄筋 (D19 SD345) を配置した。

表-5 一般法で作製した GP コンクリートの配合

試番	配合条件				単位量 kg/m ³								強度 MPa	
	A/W	S/A	水量 kg/m ³	BS vol.%	FA	BS	S	G	ASS	A2	A3	圧縮	引張	
C1	0.10	0.30	139	20	335	101	757	892	193	8.71	0.52	41	1.8	
C2	0.15	0.30	133	0	418	0	757	892	209	8.37	0.75	29	1.9	
C3	0.15	0.30	133	20	335	101	757	892	209	8.71	0.50	62	3.0	
C4	0.15	0.30	133	30	293	151	757	892	209	8.88	0.43	79	4.0	
C5	0.20	0.30	127	20	335	101	757	892	224	8.71	0.35	78	4.4	
C6	0.15	0.15	133	20	333	101	762	890	202	8.70	0.45	66	4.6	
C7	0.15	0.25	132	20	333	101	762	890	206	8.70	0.45	63	3.7	
C8	0.15	0.35	131	20	333	101	762	890	210	8.70	0.54	69	3.8	
C9	0.20	0.15	128	20	333	101	762	890	216	8.70	0.64	78	5.1	

FA:フライアッシュ, BS:高炉スラグ, S:細骨材
 G:粗骨材, GNa:グルコン酸 Na
 AS:48%KOH 溶液+JIS3 号水ガラス+純水,
 A2:流動化剤・遅延剤(オキシカルボン酸塩系),
 A3:助剤
 鉄筋腐食試験用試験体は上記配合に 2.4kg/m³ の Cl 量となるよう NaCl を添加した。

3. 分析

表-2 で作製した GP ペーストについて、粉末 X 線回折で生成物を同定した。また、硬化体の pH は、75 μm 未満に粉砕した試料と純水を固液比 1 : 1 にて 25°C の環境下で 1 分間攪拌し、濾過した溶液を測定した。

表-3 及び表-5 で作製した試験体の鉄筋腐食は市販の鉄筋腐食診断器を使用して自然電位を測定した。

GP モルタル及びコンクリートは 10 φ × 20cm の試験体を使用して、養生脱型後 JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、JIS A1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠して圧縮強度、割裂引張強度を測定した。塩水浸漬試験では、GP モルタル及びコンクリート共に 10 φ × 20cm 試験体の両端を切断し開放面以外を樹脂コーティングし、JSCE-G 572-2010 に準じて 10% の塩水に浸漬させ、3 ヶ月経過時に開放面から 1cm 毎に全塩化物イオン量を 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。

また、各試料の水銀ポロシメーターによる細孔径分布測定を日本コンクリート工学会「コンクリートの試験・分析マニュアル」に従い、前処理としてアセトン浸漬 24 時間、真空乾燥 24 時間行い測定範囲 3.5~7500nm、圧力範囲 0~200MPa で実施した。

4. 結果と考察

4.1 圧縮強度及び割裂引張強度

本研究で得られた GP モルタルの圧縮強度を表-3 及び表-4 に、割裂引張強度を表-4 に示す。表-3、表-4 から高 BS 置換率及び高 A/W 比で、圧縮強度が大きく

なるのは既存の報告と一致する²⁾。一方、溶解法において Si/A 比が大きくなるほど圧縮強度がやや低下することが報告されている²⁾が、BS 置換率の高い本試験領域では、試番 M1, M4 及び M7 を比較して、ほとんど差は認められなかった。また、それら試料と比較して、一般法で作製した試番 M10 の圧縮強度もおよそ同等であり、既報告²⁾と同様に A/W 比 0.2 程度の高 A/W 比、BS 置換率が高い領域では、一般法と溶解法で作製した試料に大きな相違は認められないことがわかった。また、防錆剤の試験として使用した亜硝酸 Na の添加も、その強度にほとんど影響しないことが確かめられた。

一方、割裂引張強度は、ばらつきが大きいため、その考察は難しいが、試番 M13 から M15、試番 M18 から M20 と A/W 比及び BS 置換率が同一配合で比較すると Si/A 比 0.35<0.30<0.25 の順となり、BS が 35.5 vol.% と多いこの配合範囲では溶解法において Si 成分が少なくなるほど割裂引張強度が大きくなる傾向が認められた。

表-5 に一般法で作製した GP コンクリートの強度を示す。なお、試番 C1 から C5 までは上原他²⁾におけるコ

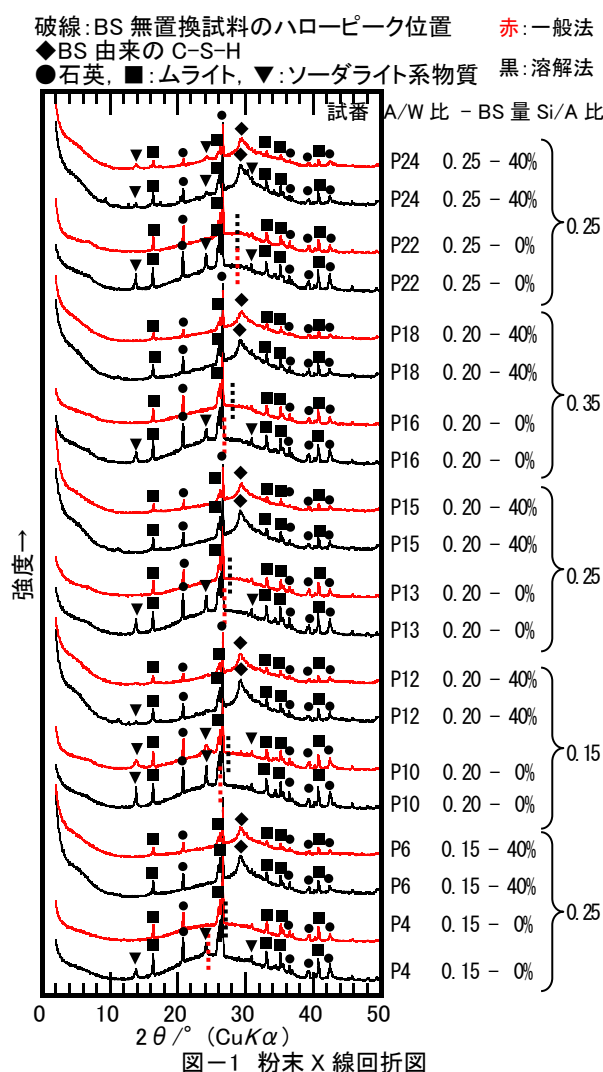
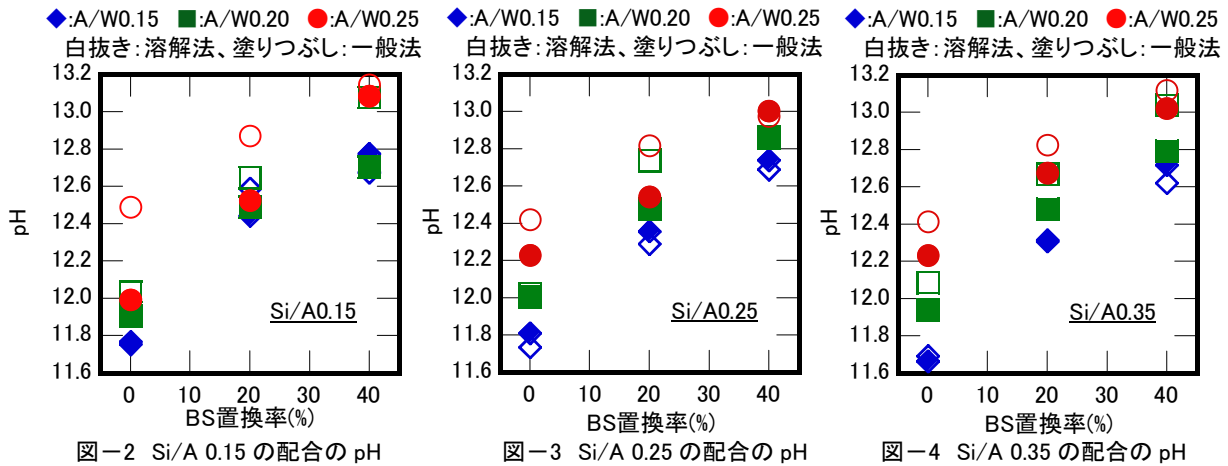


図-1 粉末 X 線回折図



ンクリートと同一試料である。今回は、試番 C6 から C9 で Si/A 比を変化させた試料を作製しているが、ここでも Si/A 比において圧縮強度に大きな差はなかった。また、Si/A 比が 0.15 で大きな割裂引張強度を示しており、一般法において 0.35 近傍で大きな曲げ強度を示すとした佐藤他⁵⁾の報告とは異なる結果となった。これは既報告の BS 置換率が 8.4vol.% と本報告より小さいことに起因していると考えられる。すなわち、BS 置換率により、最適な Si/A 比が異なり、BS 置換率が高くなると必要とする Si 成分が少なくなる可能性が示唆される。

4.2 GP ペーストの構造変化、生成物と pH

図-1 は GP ペーストの粉末 X 線回折図である。BS 無置換試料では高 A/W 比領域で作製した試料ほど $2\theta = 25^\circ$ 近傍の非晶質ハロー（図中の縦破線）が高角度（ 2θ の数値が大きい方）側へ移動した。また、同一配合で比較すると、一般法で作製した試料は、溶解法と比較してやや高角側でハローが認められた。また、そのハローピーク位置の差は、低 A/W 比領域で大きくなる傾向が認められた。一般的にハローピーク的位置は、非晶質構造における Si-O の結合距離などに依存しており、FA 単独の GP は高 A/W 比領域で反応が進行するほど 25° 近傍のハローが高角側へ移動する⁹⁾。したがって、BS 無置換試料では一般法の方が溶解法と比較して反応が進行し、特に低 A/W 比領域でその差が大きくなったものと思われる。この結果は、低 A/W 比領域の溶解法で作製した GP の圧縮強度が一般法のそれと比較して小さくなることに対応し、上原他²⁾の報告と一致する。

一方、BS 置換試料では作製法に関わらず 29° 付近にブロードなピークが認められた。これは BS のアルカリ刺激生成物の Ca シリケート水和物 (C-S-H) の回折位置⁷⁾と同様であることから、その詳細な構造は低結晶質のため不明であるが C-S-H 構造を有する物質の生成が BS 置換により生じているものと推察される。

結晶質生成物では、主として溶解法で作製した BS 無置換試料で、ソーダライト系物質（水酸ソーダライトあ

るいは炭酸ソーダライト）が少量であるが認められた。また、一般法においても Si/A 比が小さい試料でソーダライト系物質が生成したことから、練混ぜ時に溶解している Si 量が少ないときに、ソーダライト系物質が生成しやすいものと推察される。したがって、溶解法では SF 全体が溶解せず、Si/A 比の実配合が小さくなること、また練混ぜ時に溶解量が不均一になりやすく、部分的に配合の偏りができやすいことで、ソーダライト系物質が多く生成するものと考えられる。一方、BS 置換により作製法による生成物等の相違は小さくなった。これらの結果は、BS 置換試料では BS に由来した C-S-H が生成し、Si の溶解が促進することで、一般法と溶解法との相違が小さくなるためと考えられる。この結果は BS 置換率が高く、高 A/W 比領域で両作製法の GP の圧縮強度差が小さくなるという上原他²⁾の報告と一致する。

図-2 から図-4 は、GP ペーストの pH 測定結果である。同じ BS 置換率では高 A/W 比領域で作製した試料ほど pH は高くなった。また、同一 A/W 比の場合、BS 置換率が高いほど pH が高くなった。これは BS 無置換試料ではアルミノシリケート構造が多く生じることで、そのフレームワーク内に Na が取り込まれるが、BS 置換試料ではそれに由来した C-S-H が生成することで細孔溶液中に残存する Na 成分が多くなるためと考えられる。一方、同配合では一般法と比較して溶解法で作製した試料の pH が高くなった。特に BS 置換率の低い領域でその差が大きいことは、粉末 X 線回折結果と一致し、BS が少ないときに溶解法におけるアルミノシリケート構造が生じる反応が進行せず、アルカリ成分がフレームワーク内にあまり取り込まれないためと考えられる。一方、Si/A 比が pH に与える影響は小さかった。

4.3 GP 硬化体の鉄筋腐食特性

表-6 は表-5 の配合で作製した GP コンクリートの 330 日経過時の自然電位測定結果と鉄筋腐食減量（試番 C1 から C3, C5, C6, C8, C9）を測定した結果である。自然電位は NaCl を添加した試料で、より卑な値を示し

た。NaClを加えない試料では、表-6の通り、腐食が認められず、自然電位と配合との相関は特には明瞭ではない。一方、NaClを添加した試料では、試番C1、C3及びC5と高いA/W比の試料で相対的に貴側の値を示した。これは図-2から図-4に示されるようにA/W比が大きくなるとそれらのpHが高くなることから、腐食が抑制される傾向になるものと考えられる。一方、Si/A比がpHに与える影響は小さく、試番C3、C6及びC8を比較して、顕著な傾向は認められなかった。図-2から図-4でBS置換率が高くなるとpHが高くなったが、自然電位に顕著な傾向は認められなかった。その理由は今後詳細に検討する必要があるが、本試験が大気暴露（室内）の試験であり、本試験で使用したGPコンクリートのBS無置換試料は、上原他²⁾で記したように大きな細孔径により硬化体の水分逸散量が多く、本試験では乾燥傾向になっていることに起因している可能性がある。また、過飽和のCa(OH)₂で、ある程度一定のpHが担保されるセメント硬化体とは異なり、GPは加水状態でのpHの変化が大きいことが推察されることから、水分量を考慮した試験で、今後詳細に検討していく必要がある。なお、NaCl添加試料では鉄筋のリブ部にごく僅かに腐食が認められる程度（図-5）で、腐食量は表-6に示すように少なく、配合による腐食状況に大きな差は認められなかった。

表-7は作製手法の相違が鉄筋腐食特性に与える影響を検討するために表-3の配合でNaClを添加して作製したGPモルタルの自然電位測定結果（148日経過時）である。同一配合試料である試番M4（溶解法）とM10（一般法）と比較すると、一般法で作製した試料より溶解法で作製した試料の方がやや貴側となったが大きな相違はなく、本試験で使用したBS35.5vol.%の配合では少なくとも溶解法を選択することで大きく鉄筋腐食特性が一般法と比較して劣ることは無いものと推察される。一方、溶解法で作製したGPにおけるSi/A比の影響は試番M1、M4及びM7と比較するとGPコンクリートの結果と同様に本配合範囲内では小さかった。

セメントコンクリートでは、防錆剤として一般的に亜硝酸LiやCaが使われるが、GPではより安価で入手しやすい亜硝酸Naが使用可能である。そこで、所定量亜硝酸Naを添加してNaClを含有するGPを作製した（試番M5及びM6）。その結果、硝酸Na無添加試料（試番M4）と比較して自然電位は貴側となった。ただし、表-6のコンクリート試験において330日経過時の腐食減量ごく僅かであることから、本試験体の鉄筋腐食もほとんど生じていないと考えられる。GPにおける亜硝酸イオンの効果を明らかにするために、亜硝酸量と塩化物イオン量比の異なる試料を用い、水分量を調整する等で検討する必要がある。

表-6 GPコンクリート（一般法）における自然電位測定結果及び腐食減量（大気暴露 330日経過時）

試番	C1		C2		C3		C5	
	有	無	有	無	有	無	有	無
自然電位	-329	-41	-260	-26	-249	-51	-139	-65
腐食減量	0.38	--	--	--	--	--	--	--
試番	C6		C8		C9			
	有	無	有	無	有	無		
自然電位	-177	-119	-211	-115	-159	-115		
腐食減量	--	--	--	--	--	--		

自然電位:mV vs Ag/AgCl 腐食減量:wt% --:0.1%以下



図-5 鉄筋の腐食状況（試番C1、NaCl添加）

表-7 GPモルタルの自然電位測定結果（大気暴露 148日）

試番	M1	M4	M5	M6	M7	M10
NaCl	有	有	有	有	有	有
自然電位	-245	-225	-168	-170	-246	-268

4.4 GP硬化体の塩水浸漬試験結果

昨年度、上原他²⁾では表-5の試番C1からC5に相当するSi/A比0.30でA/W比及びBS置換率を変化させたGPコンクリートの塩水浸漬試験（3ヶ月浸漬）を行っている。そこで、今回はBS置換率を一定として、Si/A比とA/W比を変えて一般法で作製したGPコンクリートの塩化物イオン浸透特性を検討した（図-6）。同一Si/A比では、昨年度の報告²⁾の通りA/W比が大きい場合に塩分浸透が抑制されている。一方、同一A/W比におけるSi/A比の影響は0.35<0.15<0.25の順に塩分浸透が大きくなる傾向が確認された。本結果は、下記の結果と傾向はやや異なるが、その詳細は今後検討する必要がある。

図-7は表-4の配合において溶解法で作製したGPモルタルの塩水浸漬試験結果（3ヶ月浸漬）である。上原他²⁾では、BS置換率13vol.%と22vol.%の結果を記したが、溶解法の適用範囲は、一般法と比較してよりBS置換率が高い領域であり、また東原他⁴⁾のように塩害地域用短まくらぎでの使用を想定した場合、BS置換率を高くすることが想定される。そこで、BS置換率を35.5vol.%とした各配合の塩分浸透量を測定した。その結果、A/W比及びBS置換率の影響ほど大きくはないが、A/W比0.15及びA/W比0.20の試料共に、Si/A比が0.25<0.30<0.35の順に塩分浸透が大きくなる傾向が確認された。この結果は、後述する総細孔容積の検討結果と一致している。

4.5 GPモルタル・コンクリートの細孔径分布

図-8は、表-4及び表-5の配合により作製したGPモルタル及びコンクリートの細孔径分布を水銀圧入法

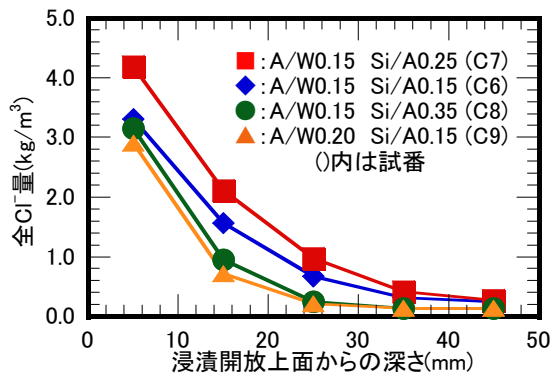


図-6 GP コンクリートの塩水浸漬試験結果

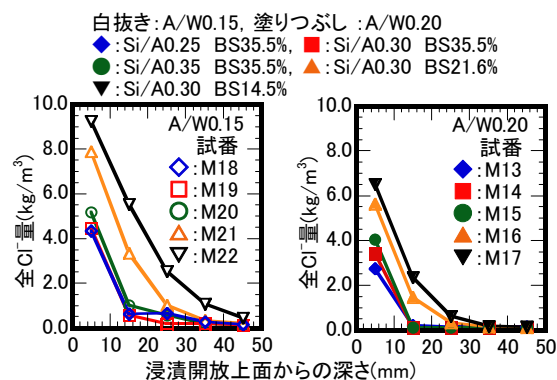


図-7 GP モルタルの塩水浸漬試験結果

で測定した結果である。A/W 比の異なる試番 M14 と M19、BS 置換率の異なる試番 M19、M21 及び M22 を比較すると、既報告²⁾の通り、溶解法において高 A/W 比、高 BS 置換率の試料で、総細孔容積が減少した。一方、溶解法で作製した BS13vol.% の試料は Si/A 比に対して細孔容積の傾向が認められないことが報告されているが²⁾、BS 置換率が 35.5vol.% の本試験では、同一 A/W 比において、Si/A 比が小さくなるほど細孔容積の減少が認められた。また、BS20vol.% で作製した GP コンクリートでも試番 C6、C7 及び C8 の Si/A 比が小さくなるほど細孔容積が減少することがわかった。

以上、本試験における一般法 BS20vol.%、溶解法 BS35.5vol.% の試料では Si/A 比が小さいほど GP が緻密になることがわかった。また、佐藤他⁵⁾及び上原他²⁾の結

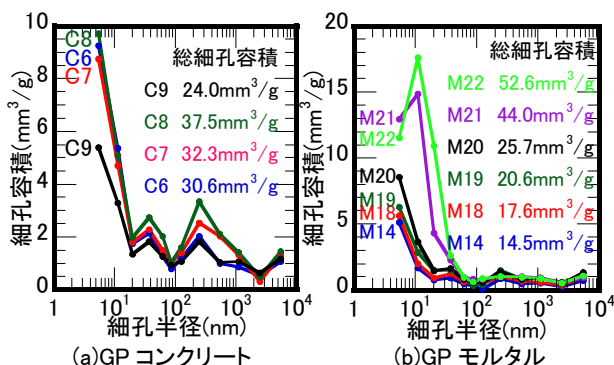


図-8 GP コンクリート及びモルタルの細孔径分布測定結果

果と比較すると BS 置換率の増加により、必要 Si 量が少なくなると考えられるが、Si/A 比の影響は作製法によっても異なることから、各作製法・配合における最適 Si/A 比を明確にするためには更に詳細な検討が必要である。

5. まとめ

本論文では、一般法と溶解法で作製した種々の配合の GP における生成物と諸性質を検討した。その結果を以下に示す。

- (1) BS 置換試料では BS に由来した C-S-H が生じることが、粉末 X 線回折により確かめられた。
- (2) 本試験配合内では、高 A/W 比、高 BS 置換率で GP の pH が高くなることがわかった。
- (3) 高 A/W 比の試料で、やや鉄筋腐食が抑制される傾向が認められたが、BS 置換率や Si/A 比の影響は、本配合では小さかった。
- (4) 本試験の配合における BS 置換率 35.5vol.% の試料では、作製法における諸性質の相違は小さかった。
- (5) Si/A 比の影響は BS 置換率や作製法により異なるが、本試験における BS 置換率 20vol.% (一般法) 及び 35.5vol.% (溶解法) の試料において、Si/A 比が小さくなるほど割裂引張強度が大きくなり細孔容積が減少した。

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.
- 2) 上原元樹, 南 浩輔, 平田紘子, 山崎淳司: 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論文集, Vol.37, No.1, pp.1987-1992, 2015.
- 3) 上原元樹, 東原 実, 横川勝則: ジオポリマー法による環境負荷低減PCまくらぎの作製, 土木学会第64回年次学術講演会講演要旨集, pp.735-736, 2009.
- 4) 東原 実, 大木信洋, 佐藤隆恒, 上原元樹: 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回年次学術講演会講演要旨集, pp.549-550, 2015.
- 5) 佐藤隆恒, 大木信洋, 東原 実, 上原元樹: 石灰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, pp.2023-2028, 2013.
- 6) 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.
- 7) 五十嵐豪, 丸山一平: 普通ポルトランドセメントを用いたセメント硬化体の比表面積と水和反応に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.64, No.1, 2010.