

ジオポリマー硬化体の作製法および配合と諸性質

(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○上原元樹
 前田建設工業(株) 正会員 南 浩輔
 前田建設工業(株) 梶田秀幸
 前田建設工業(株) 正会員 舟橋政司

1. 目的

ジオポリマー(以下 GP と略す)硬化体は、種々の産業副産物を有効利用でき、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いる¹⁾。しかし、GP 硬化体の配合は、一般的なセメント硬化体と比較して複雑であり、それにより生成物も異なる。実用化を進めるためには、その配合の考え方を明らかにし、諸性質との関係を明確化する必要がある。また、筆者らは、その作製法に関しても「一般法」や「シリカフェーム(以下 SF と略す)添加法」と異なる手法を提案している²⁾。既報³⁾では、主に一般法で作製した GP コンクリートを中心に乾燥収縮特性や塩分浸透特性について検討した結果を報告したが、本報告では SF 添加法との比較も含めて、配合および作製手法の相違が諸性質に与える影響を検討した。

2. 試料作製および試験

2.1 試料作製

筆者らは GP 硬化体の作製法として「一般法」、「SF 添加法」およびそれらを複合した方法を用いている(図 1 参照)。一般法はケイ酸アルカリ溶液中の Si 成分として水ガラスを用いる方法である。これは Na 成分の割合、あるいは BS 置換量が多い場合は、凝結が早くなり硬化体の作製が難しい。一方、練混ぜ時に Si 成分として SiO₂ 微粉末を添加する SF 添加法は、練混ぜ温度の影響を受けやすく、配合においてアルカリ/水比(AL/W)あるいは BS 置換量が小さいと強度が発現しないなどの問題はあるが、Na 系材料単独、あるいは BS 置換量の多い配合でも凝結が起きにくく硬化体の作製が容易という利点がある。なお、練混ぜ前の溶液に SF を完全に溶かす場合は、水ガラスを作製することと同様であり、一般法と差異はなくなる。本試験では、GP コンクリート(以下 GP-C と略す)に関しては、既に適用範囲が確立している一般法(水ガラスおよび KOH を使用)で、GP モルタル(以下 GP-M と略す)に関しては、その適用範囲を明らかにするために SF 添加法を用いて作製した(表 1)。また、比較のため、種々の配合で、一般法および SF 添加法を用いて GP-M を作製した。

2.2 試験

圧縮強度は JIS A1108:2006 に準じ、80℃、10 時間相当の加温養生後 2 日経過時の φ10×20cm(GP-C)あるいは φ5cm×10cm(GP-M)の円柱供試体を用いて測定した。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))に準じて行った。

全 Cl⁻イオンは 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、可溶性 Cl⁻イオンは JIS A 1154 附属書 2(参考)「硬化コンクリート中に含まれる温水抽出塩化物イオンの分析方法」に準じて算出した。また、表 1 の配合に塩化物イオン量が 2.4kg/m³となるよう NaCl を加えた GP-C を作製し、鉄筋腐食特性(異形鉄筋:SD345,D19)を検討した。硬化体の pH 測定では、骨材が入らないよう粉砕した 75 μm 以下の粉末試料に対して、固液比 1:1 の割合となるよう純水を加え、pH 計で測定した。

一 般 法	溶液	溶液以外
	水ガラス→Na ₂ O, SiO ₂ , H ₂ O NaOH 溶液→Na ₂ O, H ₂ O KOH 溶液→K ₂ O, H ₂ O	FA+BS 骨材 混和剤
SF 添 加 法	溶液	溶液以外
	NaOH 溶液→Na ₂ O, H ₂ O KOH 溶液→K ₂ O, H ₂ O SF 粉体→SiO ₂	FA+BS 骨材 混和剤
配合記載(一般法, SF 添加法とも同じ)		
アルカリ/水(モル比)→(Na+K)/H ₂ O→AL/W ケイ素/アルカリ(モル比)→Si/(Na+K)→Si/AL 単位純水量→H ₂ O/m ³		

図 1 ジオポリマー作製法の概要

表 1 GP-C と GP-M の配合例

試番 GP-C	AL/W	Si/AL	BS 置 換率 vol.%	圧 縮 強度 MPa	試番 GP-M	AL/W	Si/AL	BS 置 換率 vol.%	圧 縮 強度 MPa
	モル比					モル比			
1	0.10	0.30	20	40.7	6	0.174	0.254	13	59.3
2	0.15	0.30	0	28.7	7	0.174	0.304	13	58.1
3	0.15	0.30	20	61.7	8	0.174	0.355	13	54.0
4	0.15	0.30	30	79.0	9	0.174	0.254	22	94.9
5	0.20	0.30	20	78.0	10	0.174	0.304	22	92.7
					11	0.174	0.355	22	87.5

注: 配合の詳細は上原他, 土木学会講演要旨集, pp.97~98, (2014)³⁾

キーワード: ジオポリマー, フライアッシュ, 高炉スラグ, SF 添加法, 可溶性塩分, 塩分浸透

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

3. 結果と考察

表1に配合と硬化体の圧縮強度を示す。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強度が大きくなる。なお、本試験の配合では Si/AL の影響は小さかった。図2は GP-C 及び GP-M の塩水浸漬試験結果である。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深さは小さかった。可溶性塩分の割合は、GP-C では塩分浸透の少ない領域が含まれ配合によるばらつきが多いが、GP-M では70~80%程度であり、配合による差は小さかった。

図3は同一配合で「一般法」および「SF 添加法」により作製した GP-M の塩水浸漬試験の結果である。本配合領域における各試料の圧縮強度は作製法による相違が少なく、同一配合でほぼ同強度であるが、やや SF 添加法の塩分浸透が速かった。これは、²⁹Si-NMR スペクトル解析で「一般法」の方が「SF 添加法」に比べ、ポリマー化がより進行する結果が得られていることに関連しているものと考えられる。

表2は NaCl を添加して作製した GP-C の1年間経過時の自然電位測定結果と鉄筋腐食減量を測定した結果である。自然電位では Cl を添加した試料で、より卑な値を示し、AL/W が大きい試料では貴側の値を示した。これは、図4に示すとおり AL/W 及び BS 置換量が大きくなると pH が高くなる傾向であることに起因している可能性が示唆される。ただし、Cl 無添加試料では逆の傾向を示すことや、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 硬化体は加水状態での pH の変化が大きいことが予想されることから、今後詳細に検討していく必要がある。なお、Cl 添加試料では鉄筋のリブ部にわずかに腐食が認められたが、腐食量は表2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。各配合におけるペーストの pH の相違は、FA が多い方がアルミノケイ酸塩構造を生じるときに消費されるアルカリ量が大きく、pH が低くなるものと推察される。

4. まとめ

配合および作製法の異なる GP-C、GP-M を作製し、その諸特性を検討した。その結果、可溶性塩分の全塩分に占める割合は、配合および作製法による相違は小さかった。ただし、「SF 添加法」は「一般法」と比較して、同配合で、やや塩分浸透抵抗性が小さくなることから、AL/W および BS 置換量が大きい領域で用いることが良いものと考えられる。鉄筋腐食特性に関して、配合による大きな差は現在の所、得られていない。今後、より促進した条件で試験を行い、GP 硬化体における塩分量と鉄筋腐食との関係、亜硝酸 Na の防錆効果などを明らかにしていく予定である。

参考文献:

1) M.Uehara et al. Clay Science, Vol.14, No.3, pp.127-134, 2009
2) 佐藤隆恒他, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.2023-2028, 2013
3) 上原元樹他, 土木学会全国大会講演要旨, pp.97-98, 2014

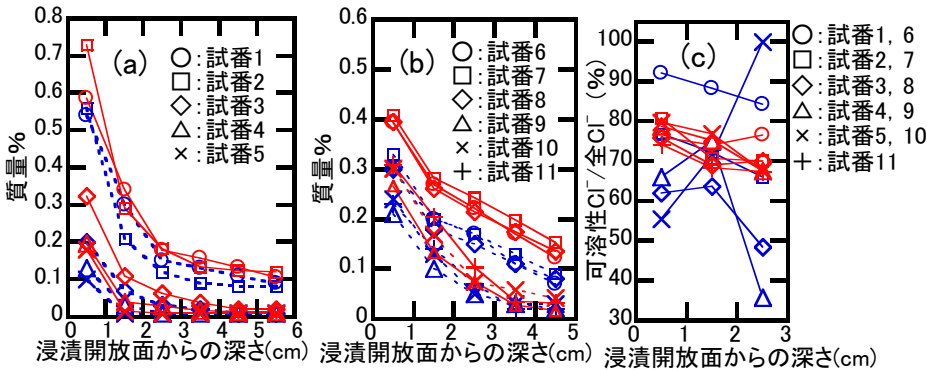


図2 GP-C および GP-M の塩水浸漬試験結果
(a)(b)赤-実線:全 Cl⁻量, 青-破線:可溶性 Cl⁻量, (c)青:GP-C, 赤:GP-M

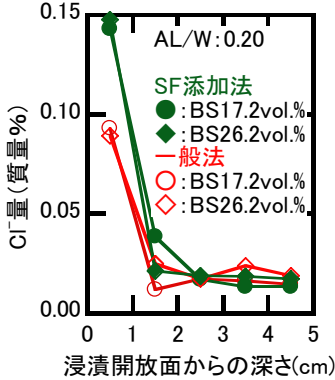


図3 作製法による塩水浸漬試験結果の相違

表2 GP-C における鉄筋の腐食減量

試番	1		2		3		4	
NaCl 添加	有	無	有	無	有	無	有	無
腐食減量(質量%)	0.38	-	-	-	-	-	-	-
自然電位 mV vs. Ag/AgCl	-328.6	-40.7	-259.4	-25.3	-249.0	-51.1	-146.8	-91.5

注: 試番は、表1参照 Cl=2.4kg/m³ -:0.1%以下

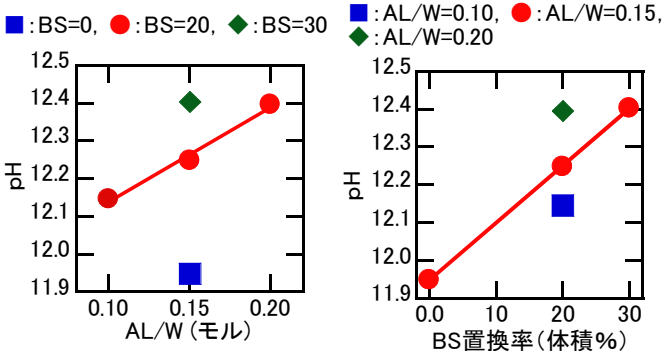


図4 GP-C の硬化体中の pH