

論文 ジオポリマーコンクリートの性状と鉄筋腐食に関する研究

花岡 大伸^{*1}・高藤 知音^{*2}

要旨：本研究では、フライアッシュベースのジオポリマーコンクリートを作製し、その基本性状と鉄筋の腐食性状について調べた。その結果、高炉スラグ微粉末を 20%置換したジオポリマーコンクリートでは、加熱養生を行わなくとも、封緘養生 28 日で 40N/mm² 程度の圧縮強度が得られた。また、高炉スラグ置換率が大きいほど、塩化物イオンの浸透が抑制され、鉄筋の腐食面積率も小さくなった。さらに、ジオポリマーコンクリートでは、通常のコンクリートに比べて、乾湿による自然電位の変動が大きいことが分かった。

キーワード：ジオポリマーコンクリート、常温養生、鉄筋腐食、自然電位

1. はじめに

一般的なジオポリマー（以下、GP と称す）では、活性フィラー（粉体の結合材）にフライアッシュや高炉スラグ微粉末（以下、GGBS と称す）といった産業廃棄物が使用されている。そのため、セメント製造時に発生する CO₂ を削減できることから、低炭素社会の実現や産業廃棄物の有効利用の観点からも注目されている。また、一般的なセメントコンクリートと同程度、あるいはそれ以上の強度を得ることができる材料であり、環境低負荷型の建設材料のひとつとして期待されている。GP に関するこれまでの研究では、アルカリシリカ溶液の pH や養生温度、高炉スラグ微粉末の置換率などが、強度および物質透過抵抗性に影響するとされており、フライアッシュベースの GP では、GGBS の割合が多くなるほど、強度や塩化物イオンなどの物質透過抵抗性が向上するとの報告が多い^{例え 1,2)}。

鉄筋腐食に関する知見を整理すると、佐藤ら³⁾は、予め塩化物イオンを 2.4kg/m³ 混入させた GP コンクリートで鉄筋の腐食性状を調べ、大気暴露 330 日時点において、鉄筋のリブにごく僅かに腐食が認められる程度であったと報告している。榮徳ら⁴⁾は、塩害環境下に 2 年間暴露したフライアッシュベース GP コンクリート中の鉄筋の腐食性状を調べ、供試体の解体調査では、OPC および GP コンクリートの鉄筋表面に腐食は確認されず、GP コンクリートの鉄筋位置の塩化物イオン濃度は約 2.2kg/m³ であったと報告している。また、一宮ら⁵⁾によると、GGBS 置換率が 10～30% の範囲で高いほど、鉄筋の腐食が抑制されたとしている。その一方で、鉄筋の分極曲線の測定結果から、GP では OPC に比べてカソード反応が活発で、鉄筋表面における酸素供給量が多くなるとの知見も報告^{4,6)}されている。しかしながら、GP に埋設された鉄筋の長期的な腐食性状については、未だ知見が少なく、明らかになっていない部分が多い。

本研究では、フライアッシュベースの GP コンクリートを作製し、その基本性状と鉄筋腐食に関する実験を行った。すなわち、フライアッシュを活性フィラーのベースとし、GGBS を 0%、10% および 20% 置換した GP コンクリートを作製し、流動性、強度、および塩化物イオン透過性について調べた。また、鉄筋腐食試験として、鉄筋の自然電位測定および供試体の解体調査を行い、鉄筋の腐食性状を調べた。

2. 実験概要

2.1 GP コンクリートの配合および作製方法

GP コンクリートの使用材料を表-1 に示す。アルカリシリカ溶液には、3.6mol/L に調整した水酸化ナトリウム水溶液と水ガラス（珪酸ソーダ 1 号）を用いた。また、活性フィラーにはフライアッシュ（密度：2.24g/cm³、比表面積：3530cm²/g）と高炉スラグ微粉末 4000（密度：2.91g/cm³、比表面積：3980cm²/g、石膏無し）を使用した。表-2 に GP コンクリートの配合を示す。粗骨材容積 (V_g) は、土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」⁷⁾ の自己充填性のランク 1 に相当する 280L/m³ に設定し、細骨材率 (s/a) を 0.45 とした。また、活性フィラー (P) に対するアルカリシリカ溶液 (L) の容積比 (L/P) を 0.9、水ガラス (SS) と水酸化ナトリウム水溶液 (SH) の質量比 (SS/SH) を 1.0 とし、全水量（アルカリシリカ溶液に含まれる H₂O）を 194kg/m³ とした。GGBS の置換率は、0%、10% および 20% とし、比較用として、水セメント比 55.0% で、普通ポルトランドセメントを用いた一般的なコンクリート（以下、OPC と称す）も同時に作製した（24-12-25N 相当）。比較用のコンクリートは、表-1 に示す水と骨材を使用して作製し、単位水量 174kg/m³、スランプ 13.5cm、空気量 4.7%、材齢 28 日における圧縮強度は 30.5N/mm² である。

GP コンクリートは、一軸パン型ミキサ（容量 60L）を

*1 金沢工業大学 工学部 環境土木工学科 准教授 博士（工学）（正会員）

*2 元金沢工業大学 工学部 環境土木工学科

表-1 ジオポリマーコンクリートの使用材料

種別	記号	材料	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	吸水率 (%)
水酸化 ナトリウム水溶液	SH	粒状の特級試薬を蒸留水に溶かして 3.6mol/L に調整した NaOH 溶液水	1.14	—	—
水ガラス	SS	J 珪酸ソーダ 1 号	1.70	—	—
活性フィラー	FA	JIS A 6201 フライアッシュ II 種	2.24	3530	—
	GGBS	JIS A 6206 高炉スラグ微粉末 4000 石膏無し	2.91	3980	—
細骨材	S	川砂 (粗粒率 2.67)	2.59	—	2.49
粗骨材	G	川砂利 (粗粒率 6.89, Gmax 25mm)	2.60	—	2.23
水	W	水道水	1.00	—	—

表-2 ジオポリマーコンクリートの配合

配合名	L/P (容積比)	SS/SH (質量比)	GGBS/P (%)	s/a (%)	単位量 (上段 (kg/m ³), 下段 (L/m ³))						
					SS	SH	FA	GGBS	S	G	Air
GGBS-0	0.90	1.0	0	45.0	151	152	556	0	591	728	0
			0		89	134	248	0	229	280	20
10			151		152	511	58	591	728	0	
8.1			89		134	228	20	229	280	20	
20			151		152	466	116	591	728	0	
16.1			89		134	208	40	229	280	20	
GGBS-10											
GGBS-20											

使用し、練混ぜ量を 30L として作製した。活性フィラーと細骨材を 30 秒空練りした後、アルカリシリカ溶液（水ガラスと水酸化ナトリウム水溶液を予め混合した溶液）を投入し、1 分間練り混ぜた後、粗骨材投入後 1 分 30 秒練混ぜて作製した。また、GP 供試体は、高流動コンクリートの強度試験用供試体の作り方（JSCE-515, A 法）に準じ、1 層で静かに上面まで流し込む方法で作製した。その後、全ての供試体は、打込み直後から温度 20℃、相対湿度 60%の常温環境下で封緘養生を行った。

2.2 試験項目

試験項目を表-3 に示す。練混ぜ終了後、JIS A 1150 に準じて、スランプフロー試験を行った。また、温度 20℃、相対湿度 60%の環境で、材齢 28 日、91 日まで封緘養生を行った後、圧縮強度試験（JIS A 1108）、静弾性係数試験（JIS A 1149）および割裂引張強度試験（JIS A 1113）を行った。

非定常電気泳動は、直径 100×高さ 200mm の円柱供試体を作製し、材齢 28 日および 91 において厚さ 50mm の試験片（n=4）を切り出し、NT BUILD 492（Non-Steady State Chloride Migration (Diffusion Coefficient)）⁸⁾に準じて、塩化物イオン拡散係数を求めた。

鉄筋腐食試験に用いた供試体の概要を図-1 に示す。供試体は、図-1 に示すように直径 100mm×高さ 200mm の円柱供試体の中央に D16 鉄筋を 1 本埋設した。また、供試体の暴露は、温度 18.5℃、湿度 56±5%環境とし、供試体の下部 100mm の範囲を塩水（10%NaCl 溶液）に 70 日間浸漬させた。その後、供試体の下部 100mm の範囲を

表-3 試験項目

項目	試験方法	供試体
スランプフロー試験	JIS A 1150	—
圧縮強度試験 (静弾性係数試験)	JIS A 1108	φ 10×20cm 円柱
	JIS A 1149	
割裂引張強度試験	JIS A 1113	
非定常電気泳動試験*	NT BUILD 492	
鉄筋腐食試験*	自然電位測定	
	解体調査	

※OPC でも実施して比較した試験項目

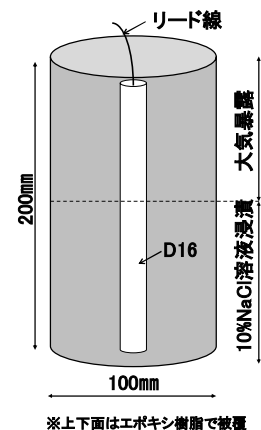


図-1 鉄筋腐食試験の供試体

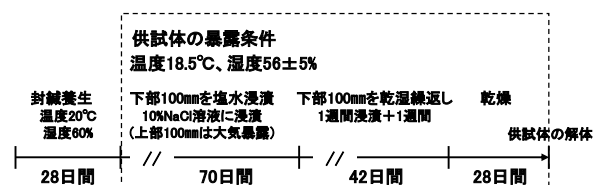


図-2 供試体の暴露条件

塩水浸漬と乾燥の乾湿繰返し（1週間浸漬，1週間乾燥）を42日間行い，最後の28日間は乾燥環境に静置した。供試体の暴露条件を図-2に示す。また，供試体の暴露期間中に鉛照合電極を用いて，週1回程度の頻度で鉄筋の自然電位を測定した。

供試体の暴露終了後には，供試体を解体し，鉄筋の腐食状況の確認と塩分分析試験を行った。鉄筋の腐食評価は，供試体から取り出した鉄筋表面に透明フィルムを巻き付け，発錆箇所をトレースした後，画像処理ソフトを用いて鉄筋の腐食面積率を求めた。

塩分分析は，供試体高さ100mmに位置において，表層付近（深さ0～20mmの範囲），中間付近（深さ20～40mmの範囲）および鉄筋位置その中間部の3か所から試料を採取し，JISA1154（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，電位差滴定法）に準じて，全塩化物イオン濃度を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 スランプフロー

GGBS置換率とスランプフローの関係を図-3に示す。これによると，GGBS置換率が大きいほど粘性が大きく

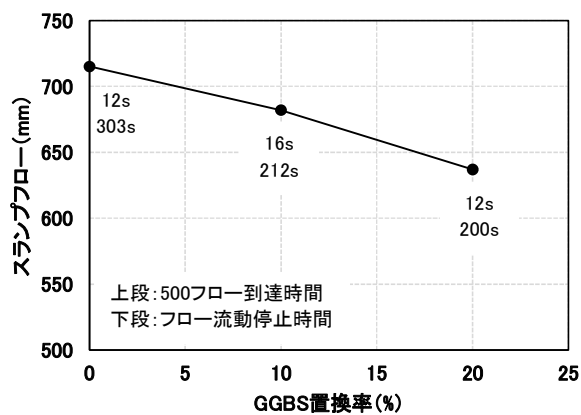


図-3 GGBS 置換率とスランプフローの関係

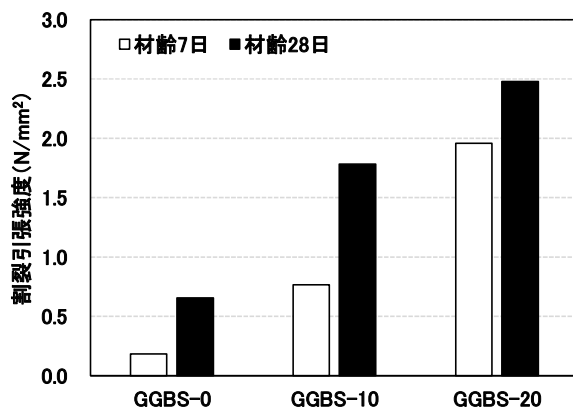


図-5 割裂引張強度

なるため，スランプフローは小さくなり，フロー流動停止時間は短くなった。また，いずれの配合も材料分離はみられず，600mm以上のスランプフローであり，土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」⁷⁾の自己充填性のランクの目安（粉体系）を参照すると，自己充填ランク2に相当する流動性であった。

3.2 圧縮強度，静弾性係数および割裂引張強度

図-4に圧縮強度を，図-5に割裂引張強度を，図-6には圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。これらによると，GGBS置換率が大きくほど，強度および静弾性係数が大きくなっている。本研究では，常温養生（温度20℃，湿度60%）を行ったため，加熱養生に比べて活性フィラーの反応が遅く，いずれの配合においても材齢7日から28日にかけて強度の増進がみられた。また，割裂引張強度は，圧縮強度の1/12～1/16程度であった。ここで，GGBS-20の圧縮強度をみると，材齢28日で40N/mm²程度に達していることが分かる。このことから，GGBSを20%置換したGPコンクリートでは，加熱養生を行わなくとも，封緘養生28日で，40N/mm²程度の圧縮強度が得られることが分かった。

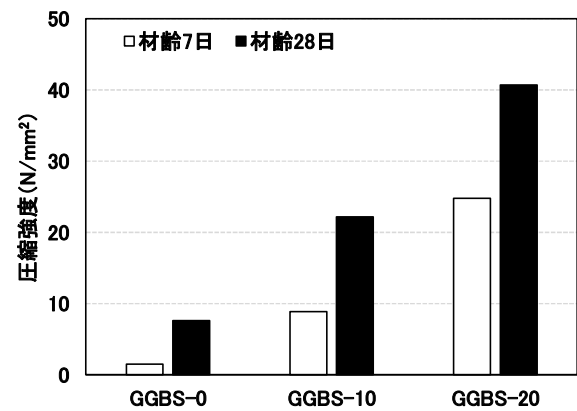


図-4 圧縮強度

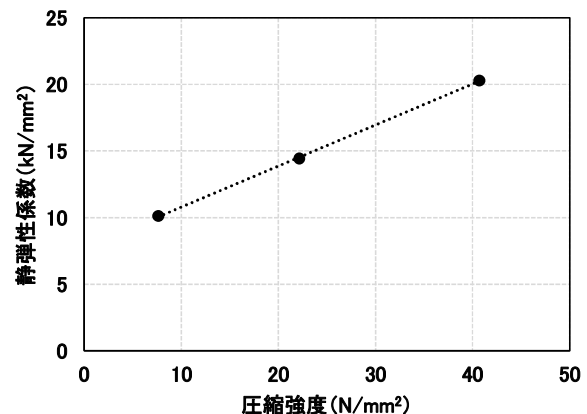


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

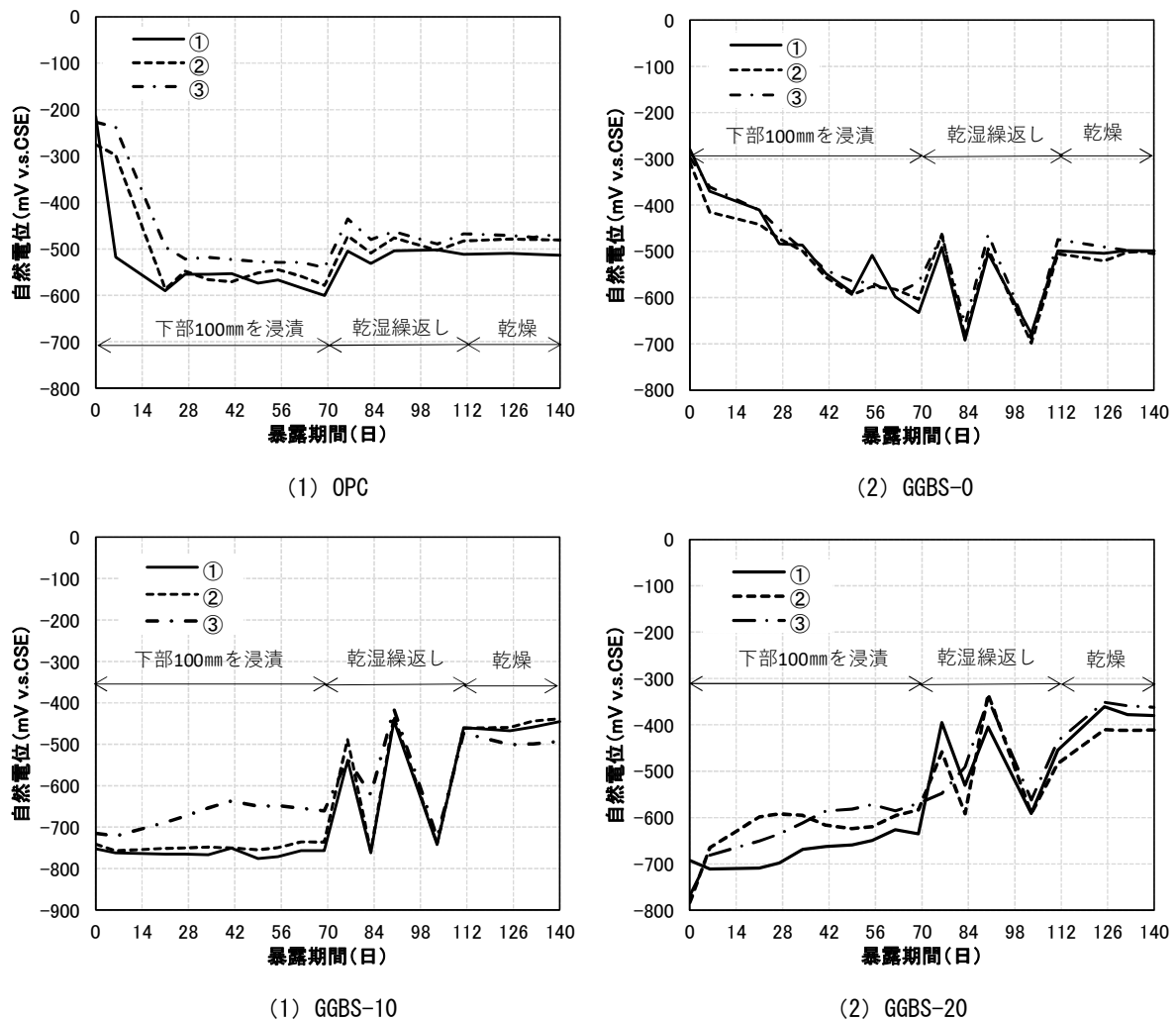


図-7 自然電位の測定結果

3.3 鉄筋の自然電位

図-7 に鉄筋の自然電位の測定結果を示す。まず、OPC の結果をみると、塩水浸漬後から徐々に自然電位が低くなる挙動を示し、塩水浸漬後 14 日目ごろに自然電位の値が安定している。OPC の水セメント比が 55.0% で、鉄筋のかぶり厚が 42mm であったことを鑑みると、14 日程度で鉄筋位置にまで塩分が浸透した可能性は低く、この挙動は、供試体内部が湿潤状態になった影響だと考えられる。また、GGBS-0 も浸漬直後は OPC と似たような自然電位の挙動を示しているが、自然電位の下がり方が OPC に比べて緩やかである。これは、GGBS-0 では塩化物イオン浸透性が大きいため、鉄筋が腐食した可能性も考えられるが、自然電位の測定結果だけでは明確に断定できない。一方、GGBS-10 と GGBS-20 では、塩水浸漬直後から自然電位の値が -700mV 程度と低い値を示している。これは、GGBS を置換した GP の特有の現象とも考えられ、既往の研究⁹⁾においても自然電位の値が低く計測された結果が報告されている。自然電位が低く測定される

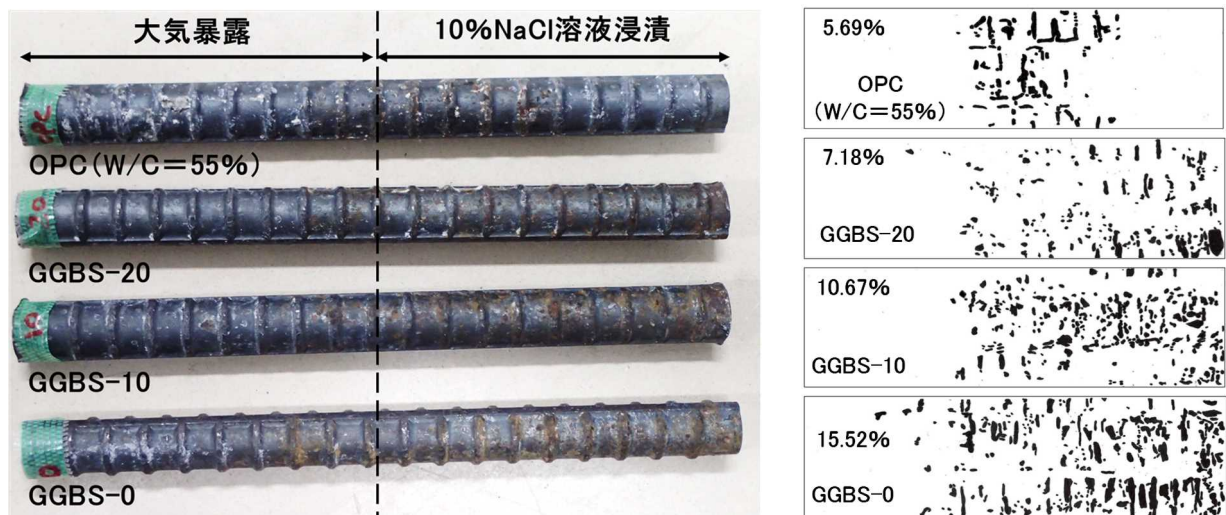
原因として、GP では高い吸水性⁹⁾を持つことや内部に空隙が形成されやすいため、供試体内部が湿潤状態になり易かったことなどが考えられる。

次に、乾湿繰返し期間における自然電位の挙動をみると、いずれの配合も乾燥の影響で、自然電位の値が高くなっていることが分かる。また、乾湿繰返し期間における GP の自然電位は、OPC に比べて変動が大きいことが分かる。これは、乾湿繰返しによる供試体内外への水分の移動が影響していると考えられる。すなわち、GP では OPC に比べて吸水と乾燥の影響を受けやすく、自然電位

表-4 乾湿による自然電位の最大変動値

配合種類	湿潤	乾燥	差
OPC	-509	-472	37
GGBS-0	-698	-464	234
GGBS-10	-758	-415	343
GGBS-20	-591	-344	247

※供試体 3 体のなかで最も変動が大きかった値 (mV)



図中の数字は腐食面積率を示す

図-8 鉄筋の腐食状況および腐食面積率

の測定においてもそれらの影響が大きくなった。表-4に乾湿繰返し期間における自然電位の最大変動値を示す。これによると、湿潤と乾燥による自然電位の差は、OPCの場合は37mV、GGBS-0の場合は234mV、GGBS-10の場合は343mV程度、GGBS-20の場合は247mVであった。このことから、GPではOPCに比べて吸水や乾燥の影響を受けやすく、自然電位の測定値の変動が大きくなるため、環境条件によっては留意が必要になると考えられる。また、暴露期間の最後（乾燥28日後）に測定した自然電位の値は、いずれも-350mVを下回っているため、鉄筋は腐食している可能性が高いと考えられた。

3.4 鉄筋の腐食状況および塩分分析の結果

図-8に供試体から取り出した鉄筋の腐食状況および腐食面積率を示す（いずれもNo.①を解体）。鉄筋の腐食箇所をみると、OPCでは塩水浸漬と大気暴露の境目あたりで鉄筋が腐食していることが認められる。一方で、GPでは塩水浸漬と大気暴露の境目のみならず、塩水に浸漬した範囲においても鉄筋の腐食がみられた。一般的に、水中部や湿度の高い環境では酸素の供給が少なくなり、鉄筋の腐食速度は遅くなることが知られている。GPにおいて塩水浸漬区間でも腐食していた理由は、暴露70日以降の乾湿繰返しと乾燥期間において、供試体の下部が適度に乾燥したことや、GPではOPCに比べて酸素の供給量が多い^{4.6)}ことが考えられる。さらに、OPCに比べて鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高いことなども影響している。

また、GGBS置換率が大いほど、鉄筋の腐食面積率が小さいことが分かる。この理由は、GGBSの置換によって組織が緻密になり、遮塩性などの物質透過抵抗性が向上したためと考えられる。図-9に解体した供試体の塩化物イオン濃度の分布を、図-10には非定常電気泳動

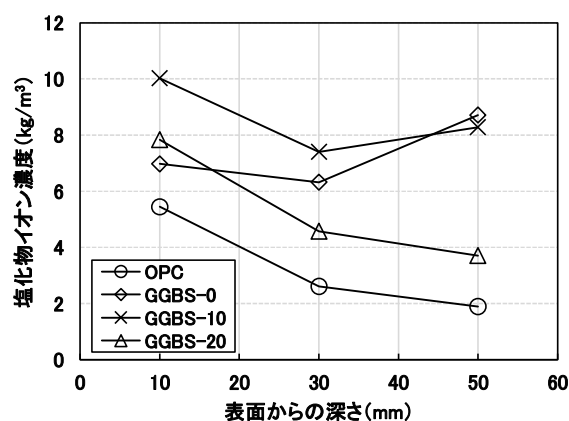


図-9 塩化物イオン濃度の分布

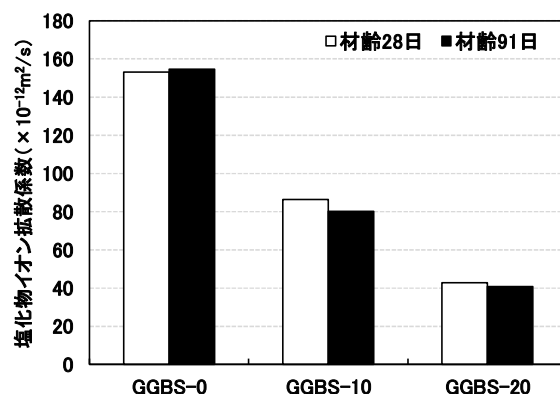


図-10 非定常電気泳動試験で求めた塩化物イオン拡散係数

試験で得られた塩化物イオン拡散係数を示す。これらによると、GGBS置換率が大いほど塩化物イオン拡散係数が小さく、塩化物イオンの浸透が抑制されている。また、GGBS-0、10において、深さ50mmの塩化物イオン濃度が高くなっているのは、供試体が円柱であったため、

多方向から塩分が浸透したためである。鉄筋位置（深さ 50mm）における塩化物イオン濃度をみると、GGBS-0、10 では 8.0kg/m³ 程度、GGBS-20 では 3.7kg/m³ であった。このことから、GGBS-20 における鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度は、少なくとも 3.7kg/m³ より小さい値であることが推察される。

4. まとめ

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) GGBS 置換率が大きいほど、スランプフローは小さくなり、フロー流動停止時間は短くなった。
- (2) GGBS を 20%置換した GP コンクリートでは、加熱養生を行わなくとも、封緘養生 28 日で 40N/mm² 程度の圧縮強度が得られることが分かった。
- (3) GP では OPC に比べて乾湿による自然電位の変動が大きいことが分かった。GP では吸水や乾燥の影響を受けやすく、環境条件によっては留意が必要になると考えられる。
- (4) GGBS 置換率が大きいほど、塩化物イオンの浸透が抑制され、鉄筋の腐食面積率も小さくなった。
- (5) 10%NaCl 溶液に暴露した GP コンクリート中の鉄筋の腐食状況を調べた結果、GGBS を 20%置換した GP コンクリート中铁筋の腐食面積率は OPC よりもやや大きい値であった。また、その時の鉄筋位置における塩化物イオン濃度は 3.7kg/m³ であった。

謝辞

本研究の成果の一部は、土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会（土木学会 361 委員会、委員長：一宮一夫教授）における共通試験の一環として実施した。また、令和 4 年度上田記念財団「社会資本維持補修に関する研究助成」を受けたものである。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 原田耕司，合田寛基，一宮一夫，日比野誠：ジオポリマーの高炉スラグの影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2236-2241，2014.7
- 2) 李備暲，金圭康，濱幸雄，曹俸碩：スラグ基盤ジオポリマーコンクリートの強度発現特性と耐久性評価，コンクリート工学年次論文集 Vol.37，No.1，pp.229-234，2015.7
- 3) 佐藤隆経，上原元樹，南浩輔，山崎淳司：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論文集，Vol.38，No.1，pp.2325-2330，2016.7
- 4) 榮徳雄斗，佐川康貴，原田耕司，富山潤：塩害環境下に 2 年間曝露したフライアッシュベースジオポリマーコンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1367-1368，2021
- 5) 一宮一夫，山本理得，池田攻：ジオポリマー中の鉄筋腐食性評価に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.1084-1089，2022
- 6) 花岡大伸，谷本恒志郎，伊藤翼：ジオポリマーの塩分および水分浸透性と鉄筋腐食の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1361-1366，202
- 7) 土木学会：コンクリートライブラリー136 高流動コンクリートの配合設計・施工指針，2012
- 8) NT BUILD 492 : Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Nonsteady-state Migration Experiments , Nordtest, Finland, 1999
- 9) 一宮一夫，原田耕司，池田攻：フライアッシュ系ジオポリマーの部分吸水と表層の変状の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1810-1815，2020