

論文 フライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーコンクリートの性能に及ぼす収縮低減剤の影響に関する研究

岡田 朋久^{*1}・李 柱国^{*2}・橋爪 進^{*3}・永井 伴英^{*4}

要旨: 本研究では、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を用いたジオポリマーコンクリート(FA-BFS系 GP-C)を対象として、各種収縮低減剤が、そのフレッシュ性状、圧縮強度、乾燥収縮、耐硫酸性および凍結融解抵抗性に及ぼす影響を調べた。その結果、特定のエステル誘導体またはポリエーテル誘導体を主成分とする収縮低減剤を添加することによって、FA-BFS系 GP-Cのフレッシュ性状、強度発現性および耐硫酸性を大きく阻害せず、収縮ひずみを大幅に低減し、凍結融解抵抗性を向上させることを明らかにした。

キーワード: ジオポリマーコンクリート、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、収縮低減剤、常温養生

1. はじめに

ジオポリマー(以下、GPと記す)は、メタカオリンなどの活性フィラー(以下、AFと記す)がアルカリ溶液(以下、GPWと記す)で刺激されることによって、従来のセメントを使用しなくても硬化する無機材料である。GPは、従来のコンクリートに比べ、CO₂排出量を大幅に低減することができ、低環境負荷材料として注目されている¹⁾。また、GPは、常温で硬化可能であり、耐酸性・耐硫酸塩腐食性に優れ、アルカリ骨材反応・ブリーディングを生じず、更に重金属イオンと放射線物質を固定する機能を有する^{2), 3)}。このため、コンクリートの環境負荷削減と廃棄物の利用拡大を図るために、次世代の建設系材料として、現在国内外でGPの製法と性能について活発に研究が行われている。

AFとして、フライアッシュ(以下、FAと記す)や高炉スラグ微粉末(以下、BFSと記す)などを単独で使用できる。FAを単独で使用する場合、常温養生下の凝結は遅く、強度発現性は低いため、FAの大量処理と常温硬化の両方の観点からすると、FAとBFSを併用したFA-BFS系GPを製造することが好ましい。しかし、GPの縮重合反応に伴って脱水が生じるため、水分の逸散によってジオポリマーコンクリート(GP-C)の乾燥収縮は凝結段階から発生し、常温養生の場合には乾燥収縮率が大きい^{4), 5)}。従来のコンクリート用収縮低減剤は、GPに適用可能であるが、高い添加率が必要となり、強度発現を阻害するおそれがある⁶⁾。この状況を踏まえて、著者らは、先のFA-BFS系GP-Cに適用しうる凝結遅延剤⁷⁾の開発に加えて、さらに乾燥収縮低減剤^{8), 9)}を開発し、その適用性と使用効果を検証した¹⁰⁾。

本研究では、乾燥収縮低減剤を添加したFA-BFS系

表-1 使用材料

成分	記号	種類	物性	
活性フィラー	AF	FA	フライアッシュ 密度 2.28g/cm ³ , 比表面積 3670cm ² /g	
		BFS 4000	高炉スラグ微粉末 密度 2.89g/cm ³ , 比表面積 4120cm ² /g	
		BFS 3000	高炉スラグ微粉末 密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 3200cm ² /g	
アルカリ溶液	GPW	JIS 1号水ガラスと苛性ソーダの水溶液	密度 1.315g/cm ³	
細骨材	S	三重県産川砂	表乾密度 2.60g/cm ³ 吸水率 1.46%	
粗骨材	G	三重県産石灰碎石	表乾密度 2.70g/cm ³ 吸水率 0.40%	
GP用遅延剤	LST	主成分:L-酒石酸ナトリウム	食品添加物規格 密度 1.78g/cm ³	
GP用収縮低減剤		CA	主成分: ポリエーテル誘導体	重量平均分子量: 400 密度 0.93g/cm ³
		CB	主成分: ポリエーテル誘導体	重量平均分子量: 200 密度 1.10g/cm ³
		CC	主成分: エステル誘導体	重量平均分子量: 530 密度 1.15g/cm ³

GP-Cのフレッシュ性状と硬化後の力学性能、体積変化、耐硫酸性および凍結融解抵抗性などを測定し、開発した乾燥収縮低減剤がFA-BFS系GP-Cの各種性能に与える影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した材料を表-1に示す。本研究では、事前に表乾調整を行った川砂と石灰碎石を使用した。また、FAは

*1 東邦化学工業(株) 研究開発本部千葉研究所 主任研究員 修士(理学) (正会員)

*2 山口大学大学院 創成科学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東邦化学工業(株) 研究開発本部千葉研究所 副所長 博士(工学) (正会員)

*4 (一社) 三重県建設資材試験センター 研究員 修士(工学) (正会員)

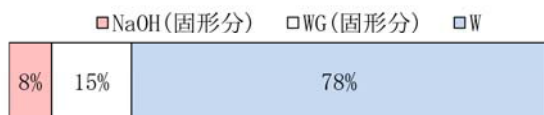


図-1 アルカリ溶液 (GPW) の組成 (wt%)

JIS II種相当品を使用し、BFSは、比表面積が4000cm²/g級と3000cm²/g級の粉末度の異なる2種類のものを使用した。GP用凝結遅延剤として、L-酒石酸ナトリウムを主成分とした有機化合物(以下、LSTと記す)を一部のシリーズに用いた。GP用収縮低減剤として、ポリエーテル誘導体を主成分とした有機化合物を2種類(以下、それぞれCA、CBと記す)、エステル誘導体を主成分とした有機化合物を1種類(以下、CCと記す)を使用した。GP-CのAF質量に対して、上記の混和剤を外割添加した。本実験で使用した収縮低減剤は、セメントコンクリート用として一般的に使用されている収縮低減剤よりも、分子量が小さいものであり、特にエステル誘導体を主成分としたCCは、セメントコンクリート用としては、殆ど収縮低減効果が認められないものである。しかし、GPモルタルに添加した事前試験結果において、一定の収縮低減効果が認められた為、本実験に使用した。

アルカリ溶液(GPW)の調製については、まず、水酸化ナトリウムに水(W)を加えて、10Mの水酸化ナトリウム水溶液(NaOHaq)を調製した。次に、NaOHaqと水ガラス1号(WG)およびWを図-1に示す割合で混合して、アルカリ溶液(GPW、密度:1.315g/cm³)を作製した。GP-Cの調合を表-2に示す。混和剤の添加の效果に及ぼすBFSの粉末度の影響を確認するために、2種類の基準調合を用いた。

2.2 練混ぜおよびフレッシュ時の性状測定

GP-Cの練混ぜには強制二軸ミキサを用いた。混和剤は、それぞれGPWに溶解して添加した。GP-Cの練混ぜは、図-2の手順で行った。GP-Cは練混ぜ終了後、JIS A 1101に準拠し、スランプの測定を行い、JIS A 1118に準拠し空気量を測定した。また、JIS A 1156に準拠しGP-Cの温度を測定した。

表-2 FA-BFS系GPコンクリートの基準調合

No	GPW/AF (wt%)	WG/NaOH (vol)	BFS/AF (wt%)	単位質量(kg/m ³)					
				GPW	FA	BFS		S	G
						4000	3000		
1	50.0	2.50	30	200	280	120	0	762	1000
2	50.0	2.50	30	200	280	0	120	763	1000

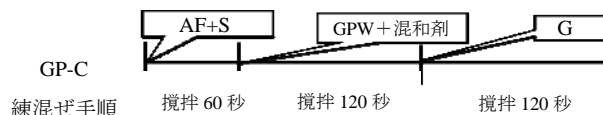


図-2 練混ぜ手順

2.3 供試体の作製、養生および強度試験

GP-Cは、練り混ぜた直後に、2層に分けて、振動棒で締め、φ10cm×20cmのプラスチック製の円柱型枠に充填して、圧縮強度用の供試体を作製した。調合No.1の供試体は材齢1日で、調合No.2の供試体は材齢5日で脱型し、20±2℃、R.H.60±5%の室内で、所定の材齢まで常温養生を行った。尚、調合No.1の供試体では、脱型まで上面および脱型後の表面を気中暴露とした。調合No.2の供試体では、脱型まで上面を養生テープで封緘し、脱型後の表面を気中暴露とした。所定の材齢に達した時点で、研磨機で加圧面を研磨し、JIS A 1108の手順に従って圧縮強度を測定した。材齢3、7、28日で各3本の供試体の試験を行い、その平均値を圧縮強度とした。

2.4 長さ変化の測定

表-3に長さ変化試験の条件を示す。供試体は、2.3節で述べた方法で作製した円柱供試体である。供試体の作製、養生及び測定は、20±2℃、R.H.60±5%の室内で行った。試験手順を図-3に示す。調合1のGP-Cでは、供試体の作製段階に一部の供試体の中心部に検長50mmの自己温度補償型埋込みゲージを設置し、更に、作製してから3~6H後にすべての供試体を脱型し、検長90mmの自己温度補償型ひずみゲージを供試体表面の長軸方向に配置した。測定は、養生テープで供試体の全表面を密封後に開始し、5日後に養生テープを除去し、材齢4Wまで測定を継続し

表-3 試験条件

シリーズ	調合番号	BFSの粉末度	収縮低減剤の種類	遅延剤の添加有無	脱型時期	常温養生方法			ひずみゲージ設置位置		供試体本数	長さ変化の計測期間
						環境条件	養生方法(封緘期間)	封緘養生期間	表面(PL90)	内部(埋込み)		
1R-B	No.1	4000級	—	LST	当日(4~6時間後)	温度 20±2℃	脱型後全面に養生テープを貼付	5日	●	●	各1本	4W
1R-CA			CA						●	●		
1R-CC			CC						●	●		
2-B	No.2	3000級	—	—	5日後	相対湿度 60±5%	未脱型のまま上面に養生テープを貼付	—	●	●	各1本	6W
2-CA			CA						●	●		
2-CB			CB						●	●		

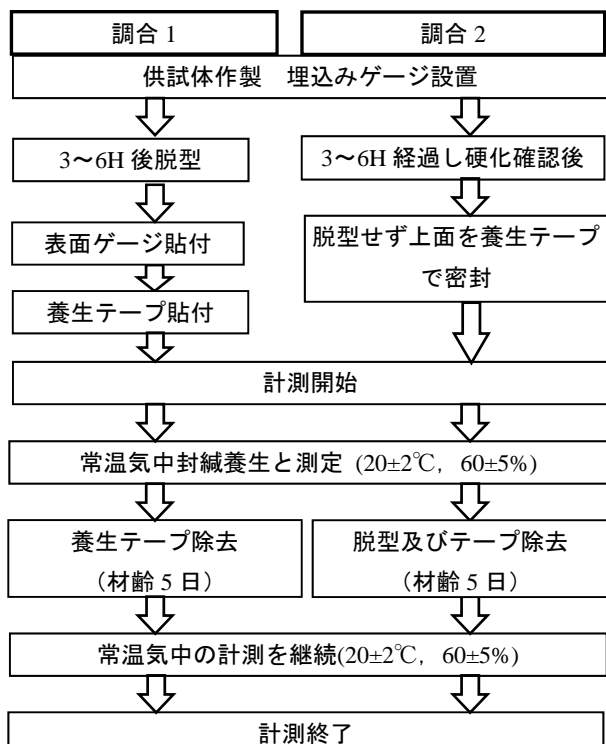


図-3 試験手順

た。一方、調合 No.2 の場合、供試体作製より 3~6H 後に硬化を確認し、未脱型のまま上面を養生テープで密封後、測定を開始し、5 日後に脱型、材齢 6W まで測定を継続した。

2.5 耐硫酸性試験

濃度が 5% の希釈硫酸を試験液とした。試験液を試験槽に入れ、 $20\pm 2^\circ\text{C}$ に温度調整後、pH 試験紙で pH 値を測定した。試験液の pH 値は、試験開始時の値(pH0.2~0.4)を保つように、適宜測定し調整した。浸漬期間は、8 週間とし、その間の試験液は、供試体の浸漬開始から、1, 2, 3, 4, 6 週時点で全量入れ替えた。供試体は、2.3 節で述べたものとし、供試体の浸漬前の質量を測定し、試験液を入れた試験槽に、供試体の間隔をあけ、打込み面を上にして完全に浸漬した。所定の浸漬期間 (1, 2, 3, 4, 8 週) に達した時点で試験液から供試体を取り出し、水道水で洗浄しながら、表面の脆弱な部分をワイヤブラシ等で取り除いた。その後、供試体の表面を乾燥した清潔な布で拭い、質量測定を行った。また、浸漬期間 8 週のための侵食深さの測定を実施した。

2.6 凍結融解抵抗性試験

凍結融解試験は、供試体の養生方法は異なるが、それ以外は、JIS A 1148 の A 法に準じて実施した。供試体は、 $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱供試体とした。GP-C 試料を鋼製型枠に 2 層に分けて詰め、棒状パイプレーターで締め固め、シリーズ毎に 1 本作製した。供試体の養生は、供試体の上面を気中暴露で、 $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、R.H.60±5% の室内において気中養生とし、材齢 5 日で脱型、材齢 28 日まで常温養生

とした。凍結融解試験は、試験機の都合で、材齢 4 ヶ月で開始した。尚、材齢 28 日から試験開始までは、室内にて自然保管を行った。凍結融解の 1 サイクルは、 5°C から -18°C に下がり、再び 5°C に上がるものとして、30 サイクル毎に質量減少率及び相対動弾性係数の測定を行った。凍結融解試験は、サイクル数の合計が 300 サイクルまで、あるいは、相対動弾性係数が 60% 未満となるまで継続した。試験中における測定は、試験槽から取り出した供試体の表面を軽くこすり、水洗い後表面の水をふき取って、速やかに供試体の質量を測定した。測定後は速やかに供試体を試験槽内に戻し、凍結融解サイクルを再開した。

3. 実験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状に及ぼす影響

調合 No.1 の GP-C には LST を 5% 添加した(シリーズ名に R が付いている)が、調合 NO.2 の GP-C には LST を添加しなかった(シリーズ名に R が付いていない)。収縮低減剤を添加しないシリーズ 1R-B、CA や CC を 3% 添加したシリーズ 1R-CA と 1R-CC、混和剤を添加しないシリーズ 2-B および CA や CB のみを 3% 添加したシリーズ 2-CA と 2-CB の空気量及び GP-C の温度を図-4 に、スランプ、スランプフローの測定結果を図-5 に示す。図-4 に示すように、収縮低減剤の添加有無によらず、GP-C の空気量は 1.1~1.5% の範囲で大きな違いを示しておらず、混和剤の影響は認められなかった。また、GP-C の温度

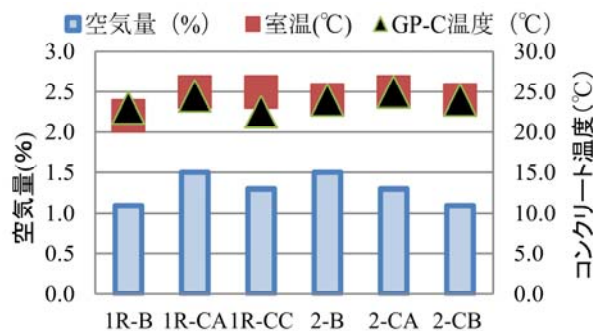


図-4 GP-C のフレッシュ性状 (空気量、温度)

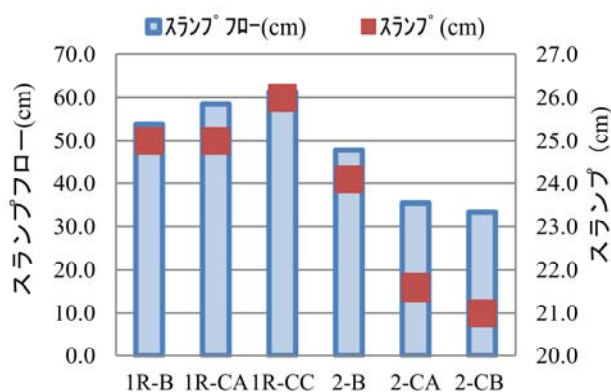


図-5 GP-C のフレッシュ性状 (流動性)

と測定時の室温を比較するとほぼ変わらなかった。これらの結果より GP 用収縮低減剤 CA, CB, CC の添加は GP-C の空気量や練混ぜ中の温度に大きな影響を及ぼさないことが確認された。

また、図-5 に示すように、調査 No.1 の GP-C に遅延剤と収縮低減剤を併用した場合、練上がり直後のスランブフローは、収縮低減剤無添加の場合に比べ、若干大きくなる傾向が認められた。しかし、GP-C に遅延剤を添加せず、収縮低減剤のみを添加した調査 No.2 の場合、練上がり直後のスランブおよびスランブフローは、収縮低減剤無添加の場合に比べ、小さくなる傾向が認められた。

一方、調査 No.1 に比べ、3000cm²/g 級 BFS を用いた調査 No.2 の方がスランブ及びスランブフローは低下した。この理由は、混和剤の添加の有無や BFS の比表面積の違いなどの要因が複合し、練混ぜ中の AF の反応程度が異なるため考えられる。

3.2 圧縮強度に及ぼす影響

図-6 に、収縮低減剤を添加しなかったシリーズ 1R-B, CA や CC を 3% 添加したシリーズ 1R-CA と 1R-CC, 混和剤を添加しないシリーズ 2-B, CA や CB のみを 3% 添加したシリーズ 2-CA と 2-CB の圧縮強度を示す。同図に示すように、調査 No.1 より、遅延剤を添加しなかった調査 No.2 の方が圧縮強度は大きかった。筆者ら⁷⁾は、遅延剤を添加し、常温養生を行った場合に圧縮強度が低下すると報告している。このことから、4000cm²/g 級 BFS を使った調査 No.1 より、3000cm²/g 級 BFS を用いた調査 No.2 の圧縮強度が増加したのは、遅延剤が未添加であることが主な理由と考えられる。

調査 No.1 の GP-C に遅延剤と収縮低減剤を併用した場合、3~7 日材齢では 1R-B の方が、1R-CA や 1R-CC の供試体よりも、圧縮強度は 1.1~1.2 倍程度高かった。しかし、28 日材齢において、1R-CA や 1R-CC の圧縮強度は、収縮低減剤無添加の場合より 1.1~1.2 倍高くなった。このような薬剤の添加による強度の変化については、現状ではその理由は不明であるが、収縮低減剤の添加によって硬化体の組成が変化している可能性などが考えられ、今後、硬化体の組成分析など、詳細な検討を行う予定である。しかし、以上の結果より LST を添加した GP-C の供試体に、CA や CC を更に添加しても 28 日材齢の圧縮強度は低下しないことがわかった。

一方、調査 No.2 の GP-C の場合、7 日材齢の圧縮強度は、収縮低減剤を添加しなかった 2-B の方が、収縮低減剤 CA を添加したシリーズ 2-CA より 1.1 倍、収縮低減剤 CB を添加したシリーズ 2-CB より 1.6 倍高かった。しかし、28 日材齢において、シリーズ 2-CA の圧縮強度は、シリーズ 2-B より圧縮強度が 1.1 倍高くなったのに対し、シリーズ 2-CB の圧縮強度はシリーズ 2-B より低く

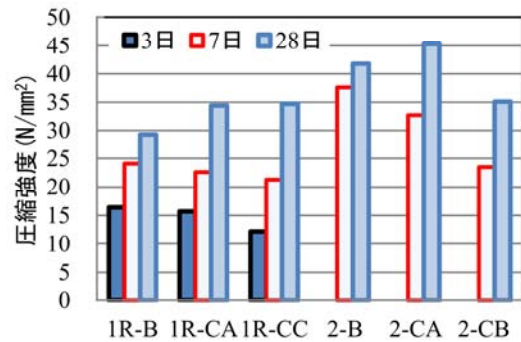


図-6 常温養生した GP-C の圧縮強度

なった。以上の結果より、CA タイプの収縮低減剤の添加は GP-C の圧縮強度の発現を阻害しないが、CB タイプの添加は、GP-C の圧縮強度の若干の低下を引き起こすことがわかった。

3.3 乾燥収縮に及ぼす影響

図-7(a), (b), (c)に、調査 No.1 による 3 シリーズの GP-C の常温下の収縮ひずみの測定結果を示す。3 シリーズに LST を 5% 添加した。また、シリーズ 1R-CA と 1R-CC には収縮低減剤 CA や CC を 3% 添加した。

収縮低減剤を添加しなかったシリーズ 1R-B は、内部にも表面にも -1150×10^{-6} 程度の乾燥収縮を生じた(図-7(a)を参照)。また、養生テープによる封かん養生の期間においても収縮が発生することが認められた。

一方、遅延剤 5% と GP 用収縮低減剤 3% を併用したシリーズ 1R-CA(図-7(b)を参照)と 1R-CC(図-7(c)を参照)は、封かん養生の期間に長さの変化が、シリーズ 1R-B に比べ、かなり小さい値となった。これは、CA や CC の添加により、若材齢時の体積変化が抑制されたためであると考えられる。埋め込みゲージで測定した値が表面ゲージで測定した値よりも大きい結果となったのは、若材齢において供試体表面に若干の膨張を生じたためであるが、膨張発生の理由は現状でその詳細は不明である。ポリエーテル誘導体を主成分とした CA を添加した供試体の 28 日材齢収縮ひずみの埋め込みゲージによる測定値は、 -400×10^{-6} 程度であり、収縮低減剤無添加の場合に比べ、7 割程度に収縮ひずみを低減することが認められた。また、エステル誘導体を主成分とした CC を添加した GP-C の 28 日材齢の埋め込みゲージ測定値は、 -200×10^{-6} 程度となり、収縮低減剤無添加の場合に比べ、8 割程度に収縮ひずみを低減した。

図-8 に、調査 No.2 の GP-C に混和剤を添加しないシリーズ 2-B および CA や CB のみを 3% 添加したシリーズ 2-CA と 2-CB の埋め込みゲージによる収縮ひずみの測定結果を示す。調査 No.2 の GP-C に収縮低減剤のみを添加した場合、収縮ひずみは、収縮低減剤無添加の場合には 42 日材齢の測定値が -1000×10^{-6} 程度であったが、ポリエーテル誘導体を主成分とした CA を添加した供試体の収

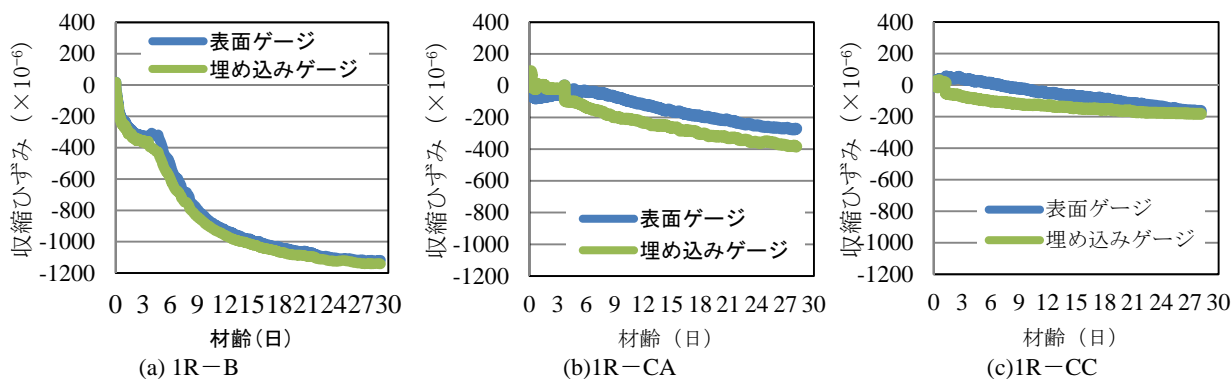


図-7 常温養生した GP-C の収縮ひずみ (調査 No. 1)

縮ひずみは 42 日材齢で -700×10^{-6} 程度となり、収縮低減剤無添加の場合に比べ、3 割程度の収縮ひずみを低減した。また、ポリエーテル誘導体を主成分とした CB を添加した場合は、28 日材齢で -200×10^{-6} 程度の収縮ひずみを示し、収縮低減剤無添加の場合に比べ、8 割程度の収縮ひずみを低減した。ただし、図-6 に示すように、CB を使用した場合は、収縮低減剤無添加の場合に比べ、強度低下が起る可能性がある為、添加率に注意が必要である。

3.4 耐硫酸性に及ぼす影響

図-9 に、調査 No.1 の GP-C に収縮低減剤を添加しないシリーズ 1R-B および CA や CC を 3% 添加したシリーズ 1R-CA, 1R-CC の浸漬期間 8 週の質量減少率と侵食深さを示す。8 週の質量減少率は、収縮低減剤無添加の場合が 8.4% であったのに対し、CA を添加した場合は 9.4%、CC を添加した場合は 10.3% であった。収縮低減剤を添加したことで、質量減少率は若干大きくなる傾向が見られるが、その差は大きくはない。また、同浸漬期間の侵食深さについては、収縮低減剤無添加の場合は 2.6mm、CA を添加した場合は 2.0mm、CC を添加した場合は共に 2.6mm であり、大きな違いは見られなかった。以上から収縮低減剤の添加が、GP-C の耐硫酸性に与える影響はさほど大きくないと考えられる。

3.5 凍結融解抵抗性に及ぼす影響

調査 No.1 の GP-C に混和剤を添加しないシリーズ 1R-B および LST5% と CA や CC を 3% 併用したシリーズ 1R-CA, 1R-CC の凍結融解試験の結果を図-10 と図-11 に示す。図-10 に示す通り、収縮低減剤無添加の場合およびエステル誘導体を主成分とした CC を添加した場合は、測定開始前の供試体に比べ、各サイクルにおける質量の減少は認められなかった。また、ポリエーテル誘導体を主成分とした CA を添加した場合、測定開始前の供試体の質量に対し、120 サイクル以降に質量がわずかに減少しているが、その程度は 1.0~2.0% 程度である。以上の結果より、収縮低減剤の添加は、凍結融解サイクルの繰り返しによる GP-C の質量変化に大きな影響を及ぼさないことが確認された。

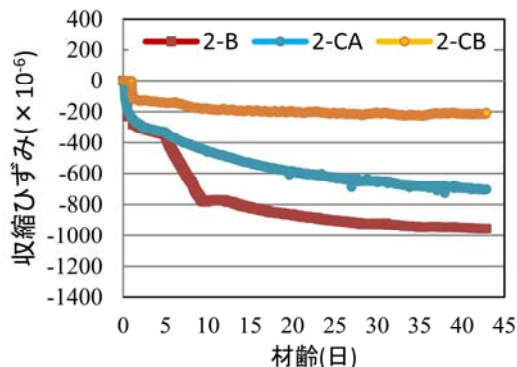


図-8 GP-C の収縮ひずみ (調査 No. 2)

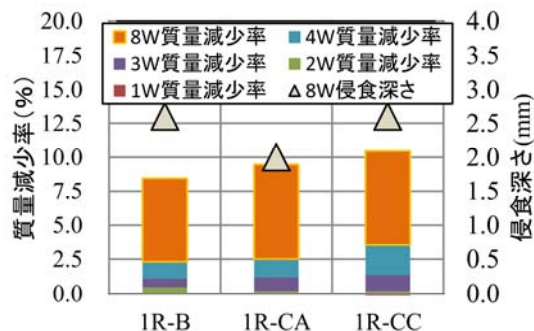


図-9 GP-C の耐硫酸性

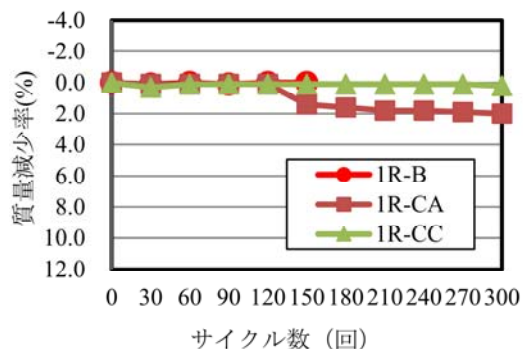


図-10 GP-C の凍結融解サイクル数と質量減少率の関係

また、図-11 に示す通り、収縮低減剤無添加の場合、相対動弾性係数は 120 サイクルで 60% 未満となっている。しかし、収縮低減剤 CA または CC を 3% 添加した場合は、300 サイクルで相対動弾性係数は 60% 以上の値となって

おり、収縮低減剤を添加によって、凍結融解抵抗性が大幅に向上することが認められた。この理由は、現状において不明であるが、圧縮強度の場合と同様に、収縮低減剤の添加によって硬化体の組成や空隙構造が変化している可能性などが考えられる。

4. まとめ

本研究では、FA-BFS系GP-Cの各種性能に及ぼす有機系収縮低減剤の影響について検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 特定のエステル誘導体やポリエーテル誘導体を主成分とした収縮低減剤の添加は、GPコンクリートの空気量には大きな影響を及ぼさないが、流動性には影響を及ぼし、BFSの比表面積によって、収縮低減剤無添加のものより流動性が大きくなることも、逆に小さくなることもある。
- (2) 特定のエステル誘導体やポリエーテル誘導体を主成分とした収縮低減剤の添加は、GPコンクリートの強度発現に影響を及ぼすが、本研究の範囲で、その影響を定性的に把握するには至っていない。
- (3) 特定のエステル誘導体やポリエーテル誘導体を主成分とした収縮低減剤の添加は、GPコンクリートの耐硫酸性に大きな影響を及ぼさない。
- (4) 特定のエステル誘導体やポリエーテル誘導体を主成分とした収縮低減剤の添加は、GPコンクリートの乾燥収縮を大幅に低減できる。
- (5) 特定のエステル誘導体やポリエーテル誘導体を主成分とした収縮低減剤の添加は、GPコンクリートの凍結融解抵抗性を向上させる。

今後、収縮低減剤が硬化体の組成や空隙構造に及ぼす影響、更には、AFの種類と割合およびアルカリ溶液の構成と濃度を変えて、GP-Cへの収縮低減剤の適用効果および作用機構について考察を行う予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり、名古屋大学名誉教授・(一社)三重県建設資材試験センター理事長 谷川恭雄先生のご助言を頂きました。また、(一社)三重県建設資材試験センター 高垣内仁志氏・日口義雄氏・佐脇純治氏、山口大学大学院 李莎氏・北田達也氏ならびに(一社)建材試験センター 杉原大祐氏のご協力を得ました。ここに、付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 李柱国：ジオポリマーコンクリートの環境影響に関する定量的考察、「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集、

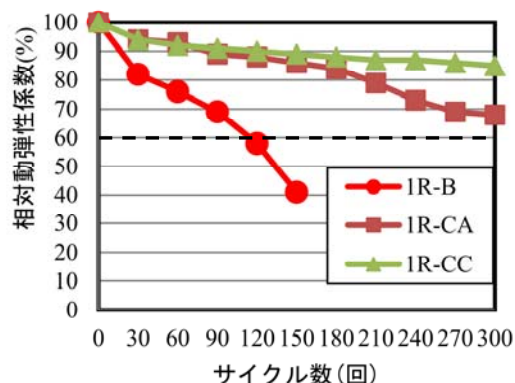


図-11 GP-Cの凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

pp.43-50, 2016.6

- 2) J. Davidovits : Properties of geopolymer cements, *Proceedings of 1st International Conference on Alkaline Cements and Concrete* (Kiev, Ukraine), pp.131-149, 1994.
- 3) Z. Li, T. Ohnuki, and K. Ikeda : Development of paper sludge ash-based geopolymer and application to treatment of hazardous water contaminated with radioisotopes, *Materials* (Special Issue of Advances in Geopolymers and Alkali-Activated Materials), Vol.9, No.8, paper No.633, pp.1-17, 2016.7
- 4) 永井伴英, 李柱国, 高垣内仁志, 岡田朋久：ジオポリマーコンクリートの乾燥収縮特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, 2016
- 5) 河尻留奈, 国枝稔, 上田尚史, 中村光：ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1943-1948, 2011
- 6) V. Bílek, et al.: Some Issues of Shrinkage-reducing admixture application in alkali-activated slag systems, *Materials*, Vol. 9, No.462, pp.1-12, 2016
- 7) 岡田朋久, 李柱国, 橋爪進, 永井伴英：凝結遅延剤を添加したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No.1, pp.2295-2300, 2016.7
- 8) 李柱国, 岡田朋久, 北里慎悟, 橋爪進, 菅彰：ジオポリマー用収縮低減剤及びジオポリマー硬化体, 特願 2016-96908, 2016.5.13
- 9) 李柱国, 岡田朋久, 北里慎悟, 橋爪進, 菅彰：ジオポリマー用混和剤及びジオポリマー硬化体, 特願 2016-96909, 2016.5.13
- 10) 岡田朋久, 李柱国, 橋爪進, 北里慎悟：ジオポリマーの乾燥収縮による体積変化を制御する添加剤に関する研究, 「建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題」に関するシンポジウム論文集, pp.67-72, 2016.6.