

論文 再生粗骨材を用いたジオポリマーコンクリートに関する実験的研究

李 柱国*1・高垣内 仁志*2・杉原 大祐*3・李 薛忠*4

要旨: 中・低品質再生骨材 M, L の利用拡大とジオポリマーセメント(GP)の実用化を促進するために, 本研究では, GP を結合材とし再生粗骨材 M, L を用いたコンクリート(RAGP-C)の各種性能を考察し, RAGP-C に使われる水ガラスによる再生骨材の改質効果を検討した。その結果, 1) RAGP-C の凝結は砕石を用いたコンクリート(RA-C)より若干早い。2) M級と L 級に拘わらず, 高強度 RAGP-C を作製し, 乾燥収縮を 800 μ 以内に制御できる。3) 活性フィラーを適切に使えば, M級を用いた RAGP-C の耐凍害性が高い。4) RAGP-C と RA-C は共に中性化抵抗性が低い。5) 水ガラスの吸着によって再生骨材の密度が増加し, 吸水率は減少する。

キーワード: コンクリート, ジオポリマー, 再生骨材, 改質, 力学性能, 耐久性

1. はじめに

現在, 解体したコンクリート塊の 9 割以上は道路用路盤材や埋戻し材等として再利用されている。しかし, 高度経済成長期に建設された各種構造物の供用年数が終了し, コンクリート解体量が増加していること, 道路用骨材の需要量が減少することから, 近い将来にコンクリート解体量が道路用骨材の需要量を上回ることが予想されている。また, 天然骨材の不足は深刻な問題になっている。したがって, 廃コンクリート塊を新設コンクリートに再利用することが, 持続可能な建設産業を実現するための最重要な課題の一つである。

しかし, 破碎・分級などの簡易処理でコストが低い中・低品質再生骨材 (JIS M, L 級) は, その表面に付着するモルタルやペースト分が多いため, 密度が小さく, 吸水率が大きい(3%以上)。再生骨材 M, L 級を用いたコンクリートの強度は小さく, 乾燥収縮の増大と耐凍害性の低下が特に懸念されている。そのため, 設計基準強度が 30MPa 以下であり, 乾燥収縮と凍結融解の影響を受けないコンクリートに再生骨材 M, 無筋非構造コンクリートに再生骨材 L しか使用できず, 2 種類の再生骨材の利用量はまだまだ少ない。再生骨材 M, L 級を大量に利用しない限り, 再生骨材の使用が普及できないと思われる。廃コンクリートのリサイクルを実現するためには, 再生骨材 M, L を用いたコンクリートの性能を向上させることが極めて重要な課題である。

一方, 近年廃棄物を主原料とし, CO₂ 排出量が少ないジオポリマーセメント(GP)が低炭素結合材として注目されている。流動性と圧縮強度が同等であれば, GP コンクリート(GP-C)の CO₂ 原単位は, ポルトランドセメントを用いたコンクリート(OPC-C)の 3~6 割である¹⁾。また, GP は, 酸や熱に対して高い抵抗性を有している他, 重

金属と放射性元素を固定する能力があり, アルカリシリカ骨材反応が殆ど生じない^{2),3)}。そこで, GP を結合材とすると, 再生骨材の付着ペーストは六価クロム等の重金属を含有する問題が解消され, 放射能に汚染された震災地のコンクリート塊やアルカリシリカ反応への対策を講じなかったコンクリート塊で製造された再生骨材(RA)はコンクリートに使用されやすくなる。しかし, 水ガラスや苛性ソーダ水溶液または両者の混合水溶液などを使うため, GP は, 高いコストという短所がある。

また, けい酸塩系表面含浸材(ケイ酸リチウムや水ガラスを主成分とする水溶液)は, その乾燥固化物および Ca(OH)₂ との反応生成物によってコンクリートの空隙を充填する改質効果があり, コンクリートの防水や表面保護工法に以前から広く使われている。したがって, 再生骨材を GP-C に利用すれば, GP に用いる水ガラスがコンクリート内部で再生骨材を改質すると予想している。

上記の背景を踏まえて, 再生骨材 M, L を用いたコンクリートの性能を向上し, 低品質骨材の利用によって GP-C のトータルコストを削減することを目指して, 本研究では, GP に使われるアルカリ溶液による再生骨材の改質効果を検討し, 再生粗骨材 M, L を用いた GP-C の各種性能を考察する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 骨材

洗浄した海砂を細骨材とした。また, 再生粗骨材 M2005 と再生骨材 L 2005(L 級)を使った。M級の原石は石灰岩であるが, L 級は多数の排出源のコンクリート塊から製造されたものであるため, 原石の岩種は多様であり, 深成岩の閃緑岩が主である。性能の比較実験では砕石を使

*1 山口大学大学院 創成科学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

*2 (一社) 三重県建設資材試験センター 修士(工学) (正会員)

*3 (一財) 建材試験センター 西日本試験所 修士(工学) (正会員)

*4 山口大学大学院 創成科学研究科 大学院生 修正(工学) (学生会員)

った。使用した骨材の性質を表-1 に示す。

(2) 活性フィラー

活性フィラーとして、JIS 規格品 3000 級の高炉スラグ微粉末(BFS)および JIS 規格品 II 種のフライアッシュ(FA)を使用した。BFS と FA の化学組成と物理性質を表-2 に示す。

(3) アルカリ溶液

市販の JIS 2 号ケイ酸ナトリウムとモル濃度が 10M の苛性ソーダ水溶液を 2:1 の体積比で混合したもの(ここに、GP1 と記す)を GP-C に使用した。また、再生骨材のアルカリ溶液の浸漬改質実験では、アルカリ溶液 GP1 のほかに GP2 も用いた。GP2 は、市販の JIS 1 号珪酸ナトリウムを 1:1 の体積比で水によって希釈した水ガラス水溶液とモル濃度が 10M の苛性ソーダ水溶液を 3:1 の体積比で混合したものであった。

(4) 混和剤

常温養生した FA-BFS 系 GP-C の乾燥収縮は大きく、耐凍害性は低い。ポリエーテル誘導体を主成分とし、密度が 0.93 g/cm³ である GP 専用収縮低減剤(CA)は、FA-BFS 系 GP-C の乾燥収縮を低減するだけでなく、細孔分布の改善によって耐凍害性を確保できる⁴⁾。従って、RA を用いた GP-C(ここに、RAGP-C と略称)を常温養生する場合には収縮低減剤を添加したが、従来の OPC-C に使われる AE 剤を高温養生の場合に使用した。

2.2 再生骨材の浸漬実験

再生骨材を GP のアルカリ溶液に浸漬することで、その性質がどのように変化するかを考察するために、絶乾状態の再生粗骨材を、温度が 20±3℃のアルカリ溶液 GP1 と GP2 に 7 日間浸漬させた。その後は、浸漬した再生骨材をビニール袋に装入して 20±3℃の気中に 3 週間

表-1 用いた骨材の品質

材料	記号	種類	性質
碎石	G	碎石 2005	表乾密度 2.73g/cm ³ , F.M. 6.68, 実積率 59.2%
再生粗骨材 (RA)	M	再生骨材 M2005	絶乾密度 2.40g/cm ³ , 表乾密度 2.50 g/cm ³ , 吸水率 4.01%, F.M.6.93
	L	再生骨材 L2005	絶乾密度 2.33 g/cm ³ , 表乾密度 2.50, 吸水率 5.69%, F.M.6.51
細骨材	S	海砂	表乾密度 2.57 g/cm ³ , 吸水率 1.36%, F.M.2.90, 実積率 66.7%

保管した。

2.3 コンクリート供試体の作製と養生

再生コンクリートの調合を表-3 に示す。表乾状態の骨材を使った。コンクリートミキサーを用い、活性フィラーと細骨材を 1 分間混合し、次にアルカリ溶液 GP1 を加えてさらに 2 分間混ぜ、最後に粗骨材を投入して 3 分間練り混ぜた。その直後に、スランブと空気量を測定した。また、スランブ試験用の突棒を用いてコンクリート試料面を突き刺し、圧痕が明瞭に残るまでの時間を計測し、アルカリ溶液の投入からの経過時間を可使時間とした。

コンクリート試料を円柱と角柱型枠に充填した後に、テーブルバイブレータで締め固めた。シリーズごとに、直径 100mm×高さ 200 mm の円柱供試体を高温養生用 6 本と常温養生用 3 本の計 9 本、100×100×400mm の角柱供試体を 3 本作製した。作製した供試体の養生は常温養生と高温養生の 2 つの方法で行った。前者は温度 20℃の養生槽における気中養生で、後者は温度 80℃で 8 時間養生後に気中養生を続ける方法であった。常温養生・高温養生共に材齢 1 日で脱型を行った。養生方法にかかわらず、全養生期間はコンクリート保水養生テープで試験体を封蔵した。

表-2 活性フィラーの化成組成と物理性質

成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	その他	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
FA	59.1	3.48	23.91	7.37	1.07	1.68	1.06	0	1.27	1.06	2.3	4392
BFS	30.4	46.9	13.6	0.37	0.6	0.28	4.95	0.04	0.67	2.19	2.9	3200

表-3 再生骨材コンクリートの調合

No.	養生温度-粗骨材種類	GP1/AF (%)	s/a (%)	BFS/AF	FA/AF	単位質量(kg/m ³)					
						GP1	AF	S	G/M/L	混和剤	
										CA	AE 剤
1	N-G	0.5	0.42	0.4	0.6	220	440	738	1000	13.2	---
2	H-G		0.42	0.3	0.7	250	500	725		---	1
3	N-M		0.41	0.4	0.6	220	440	692		13.2	---
4	H-M		0.37			220		590		---	0.88
5	N-M		0.40	0.3	0.7	220		654		13.2	---
6	H-M		0.37			220		580		---	0.88
7	H-M		0.36	0.2	0.8	220		570		---	0.88
8	N-L		0.39			220		633		13.2	---
9	H-L		0.36	0.4	0.6	220		560		560	---

[注] N: 常温養生, H: 高温養生, GP1: アルカリ溶液, AF: 活性フィラー(FA と BFS), S: 海砂, s/a: 細骨材率, G: 碎石, M: 再生骨材 M, L: 再生骨材 L, CA: 収縮低減剤

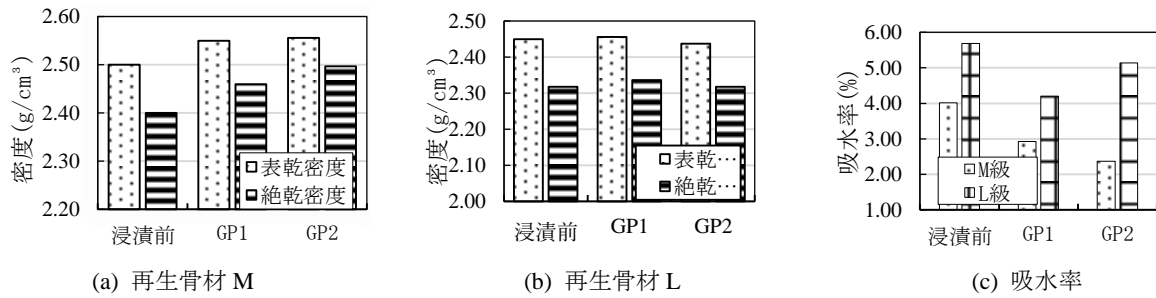


図-1 アルカリ溶液の浸漬による再生骨材の密度と吸水率の変化

2.4 試験項目と方法

(1) 再生骨材の密度・吸水率試験

JIS A1110 に準じて GP1 と GP2 に浸漬前後の再生骨材 M と L の密度・吸水率をそれぞれ測定した。

(2) 再生骨材表面の SEM による観察と XRD 分析

GP のアルカリ溶液に浸漬する前後に再生骨材 M と L の表層構造と化学成分の変化を解明するために、走査型電子顕微鏡(SEM)によって観察し、再生骨材に付着したモルタルに対して X 線回折分析(XRD)を行った。

(3) 力学性能試験

JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)に準じて材齢 28 日に圧縮試験を行い、圧縮強度とヤング係数を測定した。また、常温養生の場合は材齢 91 日にも圧縮強度の測定を行った。試験結果は 3 本の平均値とした。

(4) 促進中性化試験

角柱供試体を用いて 28 日材齢から JIS A 1153(コンクリートの促進中性化試験方法)に準じて、温度 20°C、相対湿度 60%、CO₂ 濃度 10%の条件で促進中性化試験を行い、1 週間ごとに中性化の深さを測定した。

(5) 乾燥収縮試験

100×100×400mm の角柱供試体を用いて JIS A 1129-1 コンパレータ方法に従って乾燥収縮試験を行った。材齢 7 日で基長を測定し、基長測定後、温度 20±2°C、相対湿度(60±5)%の試験室に保管して、1 週間ごとに長さや質量を測定した。

(6) 凍結融解抵抗性

角柱供試体を 28 日間気中封緘養生した後に、JIS A 1148 (コンクリートの凍結融解試験方法)の A 法(水中凍結融解試験法)に従って耐凍害性試験を行い、相対動弾性係数と質量変化を測定した。

3. 再生骨材の改質効果

3.1 再生骨材の密度・吸水率の変化

GP1 と GP2 に浸漬する前後の再生骨材 M と L の密度と吸水率を図-1 に示す。GP2 に再生骨材 L を浸漬した後の密度を除き、表乾と絶乾密度は、いずれのアルカリ溶液の浸漬後に M 級・L 級共に高くなった。逆に、吸水率はいずれのアルカリ溶液で浸漬した後に小さくなった。GP1 を使った場合、L 級の吸水率は 5.7%から 4.2%に低

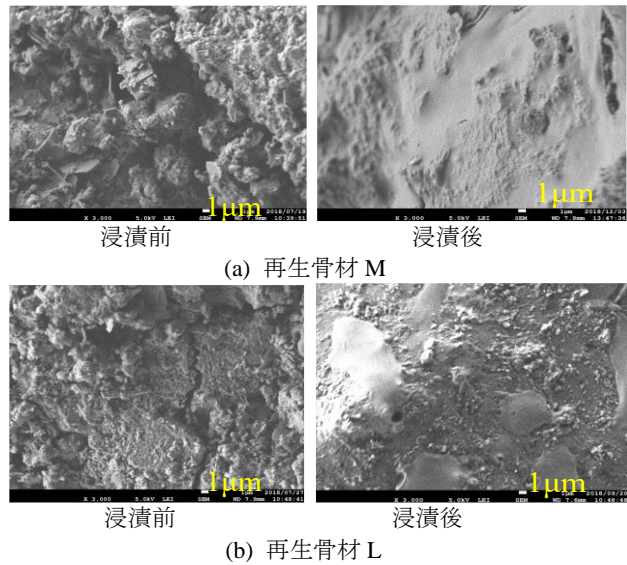


図-2 再生骨材の表面の SEM 画像(×3000)

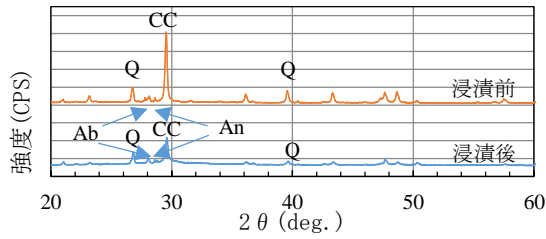
減した。これは、アルカリ溶液が再生骨材に付着したモルタルやセメントペーストに浸透し、水ガラスと Ca(OH)₂ の反応が生じ、モルタルやセメントペーストが緻密になったためであると考えられる。GP1 は GP2 より安定な改善効果を示したため、GP-C 実験に GP1 を使用することにした。

3.2 再生骨材の表層構造の変化

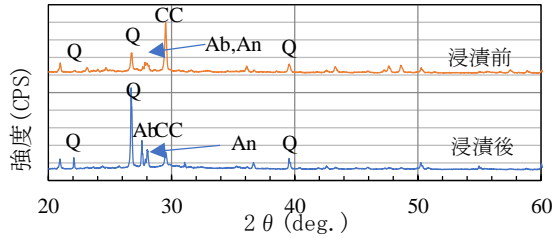
浸漬前後の再生粗骨材の表面の SEM 画像を図-2 に示す。M 級と L 級は浸漬前に表面が粗くひび割れがあり、緻密ではなかったが、浸漬後には表面が滑らかになり、ひび割れが見えなくなった。

3.3 再生骨材の表層の化学組成の変化

GP1 の浸漬前後の XRD 分析結果を図-3 に示す。同図によれば、M 級と L 級は、浸漬前に共に方解石と石英を含有していた。方解石 (CaCO₃) は原石に起因するほか、付着セメントペースト中の Ca(OH)₂ が空気中の CO₂ と反応して生じたものである。しかし、アルカリ溶液に浸漬すると、M 級と L 級は共に方解石が多く減少して、灰長石は増加した。これは CaCO₃ がアルカリ溶液との反応性があるためである⁵⁾。L 級の場合に、曹長石、灰長石および石英の増加と方解石の減少が M 級より多かったのは、L 級に付着したセメントペーストが多かったためである。



(a) 再生骨材 M



(b) 再生骨材 L

[注] CC: 方解石(CaCO₃), Q: 石英, Ab: Albite, NaAlSi₃O₈(曹長石), An: Anorthite, CaAlSi₂O₈(灰長石), 記号を表記していないピーク:CC

図-3 再生骨材の浸漬前後の XRD 分析結果

表-4 RAGP-C のフレッシュ性質

No.	Sl. (cm)	Sf. (mm)	空気量(%)
1	13.5	270	1.6
2	24	490	2.0
3	22	400	1.1
4	24.8	475	3.9
5	20	340	1.3
6	25.3	490	3.5
7	25	485	2.5
8	21.2	330	1.4
9	24.5	450	3.6

[注] Sl:スランブ, Sf:スランブフロー

4. 再生骨材コンクリートの各種性能

4.1 フレッシュ性状

RAGP-C のスランブ, スランブフローおよび空気量の試験結果を表-4 に示す。また, 可使時間の測定結果を図-4 に示す。スランブについては No.2 と No.6 の比較および No.1, 3, 8 の比較を行うと, RAGP-C の流動性は低下することが認められなかった。しかし, No.3, 4, 8, 9 を比べると, L 級を使ったほうが, M 級より流動性は若干低い傾向が見られた。また, 通常セメント・コンクリートの添加率の 10 倍で AE 剤を添加して空気量は増えたが, 5.0%以下であった。AE 剤を添加した場合に比べ, 収縮低減剤を添加した場合の空気量と流動性は小さかった。しかし, BFS の混合率の影響はあまり見られなかった。

一方, 図-4 によると, RAGP-C の可使時間は BFS の混合率の影響を大きく受け, BFS の混合率は大きいほど可使時間が短いことがわかった。また, 実験結果にばらつきがあり, 断言できないが, 砕石を用いた GP-C に比べ, RAGP-C の可使時間は短い可能性が高く, L 級を用いた RAGP-C の可使時間は, 石灰岩の原石である M 級を用いた RAGP-C より長いことがわかった。

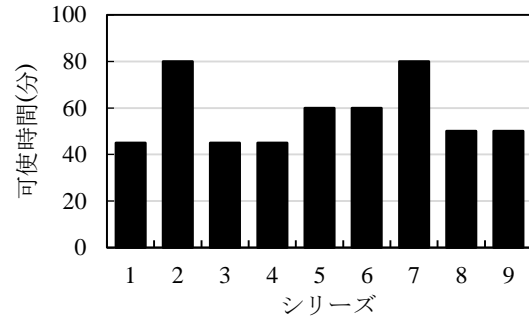
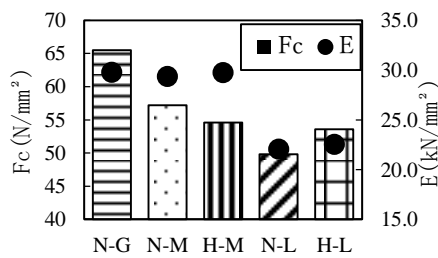
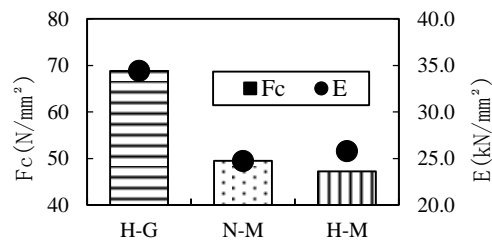


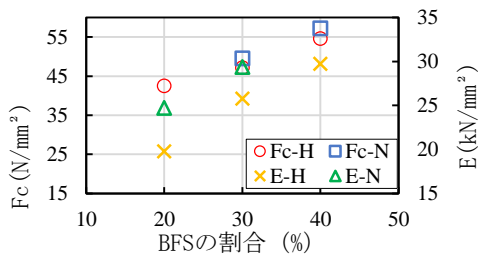
図-4 RAGP-C の可使時間



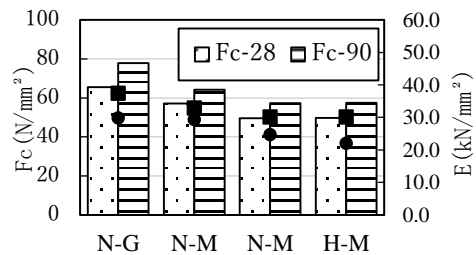
(a) 骨材種類と養生温度の影響(BFS 混合率 40%)



(b) 骨材種類と養生温度の影響(BFS 混合率 30%)



(c) BFS 割合の影響(再粗骨材 M 級)



(d) 常温養生材齢の影響

図-5 RAGP-C の圧縮強度 (Fc) とヤング係数 (E)

4.2 力学性能

RAGP-C の圧縮強度(Fc)とヤング係数(E)の試験結果を図-5示す。図-5(a), (b), (c)中の結果は28日材齢の結果であるが、図-5(d)は常温養生材齢28日と91日のFc, Eを比較しているものである。図-5(a), (b)によると、M級のRAGP-Cの高温養生強度は常温養生に比べ若干小さかった。現在、理由は不明である。全体の傾向として、RAGP-CのFcとEは碎石を用いたGP-Cより低く、L級のRAGP-CはM級のRAGP-Cより劣ることがわかった。しかし、RAを使っても、GP-Cの圧縮強度は45MPa以上であった。また、図-5(c)に示すように、BFSの混合率が高いほど、FcとEは共に高かった。なお、図-5(d)によると、養生期間が長くなるほど、FcとEは増加することが認められた。

4.3 中性化抵抗性

RAGP-Cと碎石を用いたGP-Cの8週間までの中性化深さを図-6に示す。同図より、再生骨材を用いたRAGP-Cのほうが中性化深さは、碎石を用いたGP-Cより大きいことが分かった。また、高温養生し、BFSの混合率が少ないシリーズNo.7およびL級を使ったシリーズNo.9の中性化深さは大きかった。特にNo.7の中性化進行は速かった。しかし、今回の実験結果から養生方法と混和剤の影響ははっきり見られなかった。

4.4 凍結融解抵抗性

300サイクルの相対動弾性係数と質量変化率を図-7に示す。図-7(a)より、AE剤を添加したシリーズNo.4, 6, 7(高温養生)と添加しなかったNo.1, 3, 8(常温養生)は、高い相対動弾性係数を有しているが、AE剤を添加したNo.2(高温養生), No.5(常温養生, BFSの添加率30%)の相対動弾性係数は低かった。再試験しても、No.2とNo.5の300サイクルの相対動弾性係数は60%を下回った(再試験の結果をここに省略)。碎石を用い、高温養生したNo.2の耐凍害性が低い理由が現在に不明である。今後引き続き検討を行う。また、No.5の結果によって、BFSの混入率が30%を超えない場合、常温養生したM級のRAGP-Cの耐凍害性が低いことがわかった。なお、No.8, 9の結果によって、BFSの混入率が40%を超えない場合、養生方法によらずL級のRAGP-Cの耐凍害性が低いこと

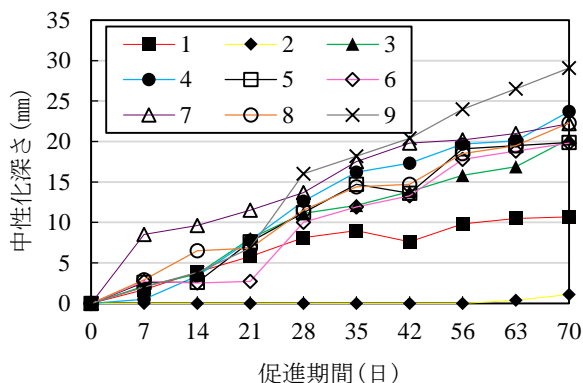
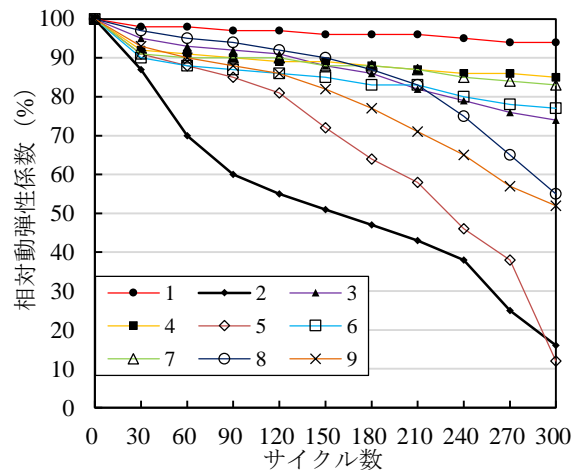


図-6 RAGP-Cの中性化深さと促進中性化期間の関係

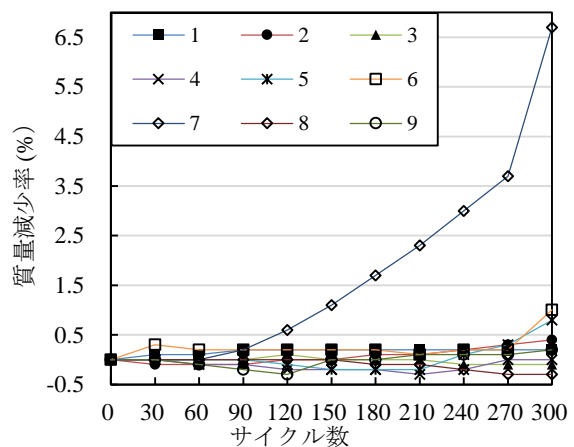
が認められた。全体の傾向として、RAGP-Cの耐凍害性は、碎石を用いたGP-Cより低いといえず、調合と養生方法の次第である。しかし、図-7(b)に示す質量変化率より、シリーズNo.7を除き、他のシリーズの質量変化は殆ど生じなかった。この結果より、GP-Cの耐凍害性の評価に対しては質量減少率の適用性を今後検討すべきであると思われる。

4.5 乾燥収縮

各シリーズの26週の収縮ひずみと質量変化率を図-8に示す。碎石を用いたGP-Cに比べ、RAGP-Cの乾燥収縮は大きかった傾向が見られた。また、常温養生の試験体(No.3, 5, 8)の収縮ひずみは高温養生の場合より大きかった。高温養生の試験体は収縮低減剤を添加しなかったが、収縮ひずみは小さかった。また、M級よりL級のRAGP-Cの収縮ひずみは大きいことが認められた。図-8(a)に示すように、常温養生したL級のNo.8だけの収縮ひずみは、 800×10^{-6} を超えた。即ち、BFSの混入率が40%の場合、常温養生されたL級のRAGP-Cの乾燥収縮は大きかったが、調合の合理化によって常温養生されるRAGP-Cでも6ヶ月材齢の収縮ひずみを 800×10^{-6} 以内に抑える。

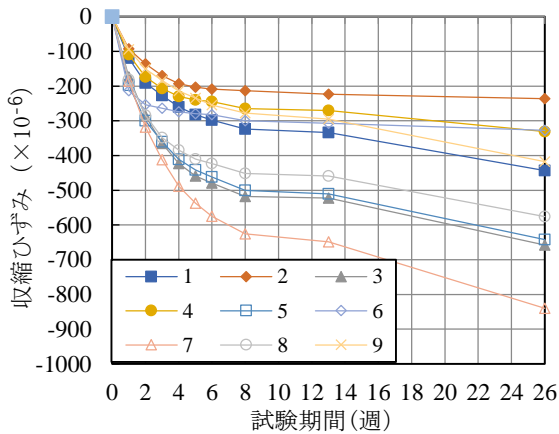


(a) 相対動弾性係数とサイクル数の関係

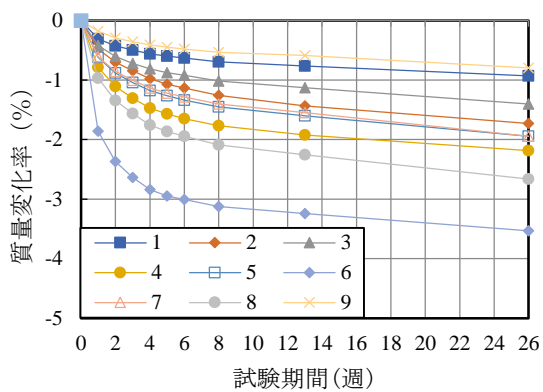


(b) 質量減少率とサイクル数の関係

図-7 RAGP-Cの凍結融解抵抗性の試験結果



(a) 収縮ひずみ



(b) 質量変化率

図-8 RAGP-C の乾燥収縮の試験結果

一方、質量変化率を示す図-8(b)によって、砕石を用いた GP-C と収縮低減剤を用いた RAGP-C の質量減少率は殆ど同じであった。しかし、高温養生され、収縮低減剤を添加しなかった No.4, 6, 7, 9 の質量減少は収縮低減剤を用いたシリーズより多かった。No.3, 4, 5, 6 の結果を比べると、BFS 混合率が高いほど、質量減少率は小さいことがわかった。No.7 は乾燥や凍結融解による質量変化には他のシリーズとかなり違う傾向を示している理由がはっきりされていないが、BFS の混入率が少なく、試験体の緻密性（強度は小さかった）が低くなり、未反応のアルカリ溶液が容易に溶出したためであろうと思われる。

5. まとめ

本研究では、再生骨材 M・L をアルカリ溶液に浸漬した後の性能変化を考察したと共に、再生骨材 M や L を用いたジオポリマーコンクリート(RAGP-C)の各種性能と影響要因について考察を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 再生骨材を水ガラスと苛性ソーダから構成されるアルカリ溶液に浸漬すると、再生骨材は緻密になり密度が増加し吸水率が減少する。また、表面の方解石が減少し曹

長石と灰長石は増加する。

- (2) 砕石の代わりに再生骨材を使用したコンクリートのスランブは低下しないが、可使時間は短くなる。また、収縮低減剤の添加で流動性は低下する
- (3) RAGP-C の圧縮強度(F_c)とヤング係数(E)は砕石を用いた GP-C より低い。が、 F_c が 45MPa 以上のものを製造できる。L 級の RAGP-C は M 級の RAGP-C より力学性能が劣る。また、養生期間が長いほどまたは BFS の混合率は高いほど F_c と E は共に高い。
- (4) 粗骨材の種類にかかわらず、GP-C の中性化抵抗性が低い。凍結融解による質量減少は少なく、相対動弾性係数は高い RAGP-C の調査が存在している。粗骨材の種類、養生方法、BFS 混合率および混和剤は共に RAGP-C の中性化抵抗性と耐凍害性に影響を与えるため、再生骨材を用いた RAGP-C の耐久性が必ずしも劣るわけではない。
- (5) 砕石を用いた GP-C に比べ、RAGP-C の乾燥収縮は大きい。また、M 級より L 級の RAGP-C の収縮ひずみは大きい。しかし、常温養生される L 級の RAGP-C を除き、収縮低減剤の添加で常温養生の場合においても RAGP-C の収縮ひずみを 800×10^{-6} 以内に抑える。

紙面の都合で RAGP-C の耐酸性を別途に報告させていただく。また、今後 RAGP-C の中性化対策について検討する予定である。

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, p.43-50, 2016.6
- 2) 日本コンクリート工学会：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会報告書, 2017.9
- 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, Vol.9, No.8, paper No.633, pp.1-17, Jul.2016
- 4) 岡田朋久・李柱国・橋爪進・永井伴英：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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No.1, pp.2029-2034, 2017.7
- 5) 山口拓臣・李柱国：岩粉を用いたジオポリマーセメントに関する研究, 2017 年度日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.41, pp.41-44, 2018.3