

論文 廃ガラスカレットを細骨材に用いたモルタル供試体の長期暴露性状

佐藤 重悦*1・徳重 英信*2

要旨: 廃ガラスカレットをコンクリート用細骨材として利用するために、これを細骨材として全量用いたモルタルの強度およびアルカリシリカ反応性試験を行った。さらにアルカリシリカ反応抑制対策として、セメントの一部を高炉スラグ微粉末およびフライアッシュに置換したモルタル供試体を作製して、積雪寒冷地において15年間の屋外暴露試験を行った。この暴露供試体の外観観察、質量減少率、動弾性係数および色彩色差計による表面色測定の結果、上記のアルカリシリカ反応抑制対策が有効であることおよび供試体表面の明度が劣化に対する指標になり得ることが示唆された。

キーワード: 廃ガラスカレット, ASR, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 明度, 質量減少, 動弾性係数

1. はじめに

国内におけるガラス瓶の出荷量は平成23年実績で152.7万トン、そのうちガラス瓶用カレットおよびその他の用途への再商品化量は106.4万トンとなっており、リサイクル率は約70%である。残りの30%は、市町村の回収時に色分けできずに資源化できないものや回収されないワンウェイ瓶などであり、廃棄されている¹⁾。これまで廃ガラスカレットをコンクリート用骨材として用いる研究・開発は様々なもの²⁾があり、ガラスカレット骨材のアルカリシリカ反応（以下、ASR）の検討が行われているが、実環境で用いた場合の性状については殆ど明らかになっていない。著者らはこれまで促進試験を中心とした廃ガラスカレットを用いたコンクリートならびにモルタル（以下、カレットモルタル）のASRの挙動と混合セメントの使用によるASR抑制効果などの基礎的検討を行ってきているが、カレットモルタルの水結合材比が低い場合には、混合セメントの使用によるASR抑制効果は認められるものの、さらなる改善が必要であることが明らかとなっている³⁾。

そこで本研究では、カレットモルタルまたはカレットコンクリートの無筋コンクリートへの適用を想定して水

結合材比を60%とし、砕砂や川砂を用いた普通モルタルと細骨材の全量に廃ガラスカレットを用いたカレットモルタルの強度およびモルタルバー法による膨張率を比較・検討した。またASR抑制を目的として、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混和した供試体を作製し、15年間の屋外暴露試験を行い、非破壊試験とともに表面色の測定による劣化程度の評価に関して検討した。

2. 実験の概要

2.1 材料

結合材は、普通ポルトランドセメントC(密度3.15g/cm³, 比表面積3,310cm²/g)、高炉スラグ微粉末BS(密度2.90g/cm³, 比表面積4,430cm²/g)およびJIS2種相当のフライアッシュFA(密度2.33g/cm³, 比表面積3,840cm²/g, 強熱減量1.4%)を使用した。細骨材は、砕砂(表乾密度2.67g/cm³, 吸水率2.24%, 粗粒率3.12)、川砂(表乾密度2.53g/cm³, 吸水率3.47%, 粗粒率2.65)および主としてソーダガラスの瓶を秋田市が回収・破碎した5mm以下の未洗浄カレット(表乾密度2.50g/cm³, 吸水率0.40%, 粗粒率2.82)を使用した。混和剤は、天然樹脂酸塩を主成分とするAE剤を5%希釈溶液として使用した。

表-1 モルタルの配合

配合種別	水結合材比 W/B(%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤 AE (kg/m ³)
			水 W	セメント C	混和材 BS	混和材 FA	細骨材 S (砕砂)	細骨材 S (川砂)	細骨材 S (カレット)	
NC	60	18.0	257	428	0	0	1,141	0	0	0.257
NR	60	9.0	287	478	0	0	0	1,194	0	0.287
K	60	14.0	269	449	0	0	0	0	1,121	0.269
KB	60	13.0	271	271	180	0	0	0	1,128	0.271
KF	60	10.0	278	371	0	93	0	0	1,160	0.278

*1 秋田大学大学院 工学資源学研究科 (学生会員)

*2 秋田大学大学院 工学資源学研究科教授 博士(工学) (正会員)

2.2 モルタルの配合

供試体は、砕砂を用いた砕砂モルタル (NC)、川砂を用いた川砂モルタル (NR)、廃ガラスカレットを細骨材に用いたカレットモルタル (K)、ASR 抑制効果を期待して配合 K のセメント質量の 40%を高炉スラグ微粉末 BS で置換したカレットモルタル (KB) および配合 K のセメント質量の 20%をフライアッシュ FA で置換したカレットモルタル (KF) を水結合材比 W/B=60%、フロー値 210 の配合としてそれぞれ作製した。モルタルの配合を表-1 に示す。なお、これらのモルタルはスランプ 8cm の土木用コンクリートのモルタル分を想定した。

2.3 アルカリシリカ反応性試験および強度試験

細骨材として廃ガラスカレットを使用した場合は、ASR により有害な膨張を引き起こすことが懸念される。このため、JIS A 1146 (モルタルバー法) に準じて、表-1 に示すモルタルの試験を行った。供試体の寸法は 40×40×160mm であり、膨張率の測定は JIS A 1129-2 (コンタクトゲージ方法) により行った。また、アルカリシリカ反応性試験終了後 (材齢 182 日) の供試体を用いて、JIS R 5201 に準じて曲げ強度および圧縮強度の測定を行った。

2.4 屋外暴露試験と測定項目

アルカリシリカ反応性試験の結果「無害でない」と判定された細骨材 (川砂および廃ガラスカレット) を用いた表-1 の配合について、JIS A 1132 に準じてモルタル角柱供試体 (100×100×400mm) を 2 本ずつ作製した。材齢 1 日まで実験室内に静置後脱型し、材齢 14 日まで標準養生を行った後、秋田県大館市の RC 建物の西側に面した 3 階屋上に暴露した。モルタル供試体の暴露状況を写真-1 に示す。暴露開始後 10 年までは年 1~3 回の頻度、その後 15 年経過時に写真撮影による外観観察、質量減少率および JIS A 1127 に準じて動弾性係数を測定した。外観観察時には、供試体側面の L*a*b*表色系における色差を色彩色差計 (三刺激値タイプ) により一面あたり 3 箇所 (測定径 50mm の領域) で測定した。各測定値は、同配合の供試体 2 本の平均値である。



写真-1 モルタル供試体の暴露状況

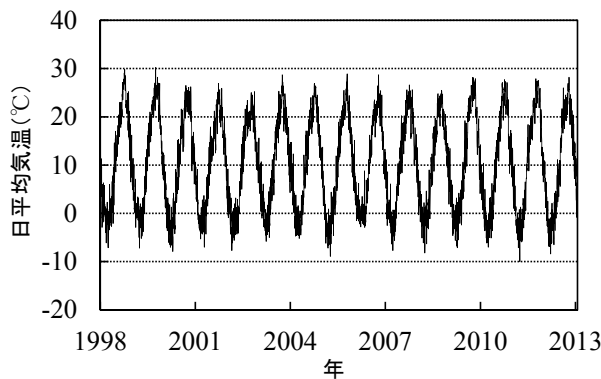


図-1 暴露地点 (秋田県大館市) の日平均気温の変化

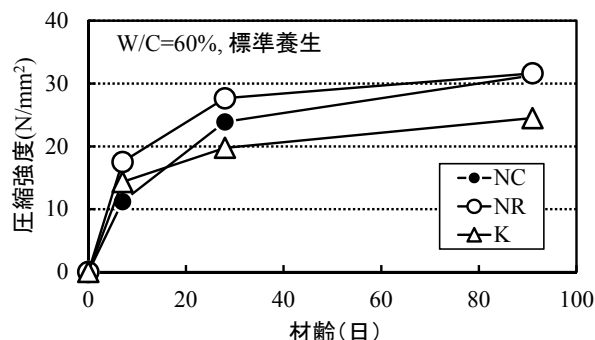


図-2 細骨材種別ごとの圧縮強度と材齢の関係

暴露期間中の秋田県大館市の日平均気温の変化⁴⁾を図-1 に示す。暴露期間 15 年間の日平均気温の平均値は 10.3°C、最高気温の平均値は 30.2°C、最低気温の平均値は -10.0°Cであった。また、この期間中の最高気温は 37.5°C、最低気温は -19.0°Cであり、凍結融解環境下であるが、冬期積雪時の供試体は積雪内の設置となっている。各供試体は測定・観察の 1 週間程度以上前に実験室内に搬入して、気乾状態で測定・観察した。

3. 実験結果および考察

3.1 カレットモルタルの強度特性

標準養生における細骨材種別ごとのモルタルの圧縮強度と材齢の関係を図-2 に示す。細骨材に砕砂、川砂およびカレットを用いた表-1 の配合 NC, NR および K の標準養生における 91 日圧縮強度は 31.3N/mm²、31.6N/mm² および 24.5N/mm² となった。配合 NC および NR に比し K の強度は約 22%低下したが、細骨材に用いた廃ガラスカレット骨材の表面が平滑であり、砕砂や川砂を用いた場合に比較して、骨材とセメントペーストの付着が低下したことが影響したものと考えられる。

3.2 カレットモルタルのアルカリシリカ反応性試験結果

モルタルバー法による配合種別ごとのモルタルの膨張率と材齢の関係を図-3 に示す。材齢 182 日における配合 NC, NR および K の膨張率は 0.000%、0.166%および

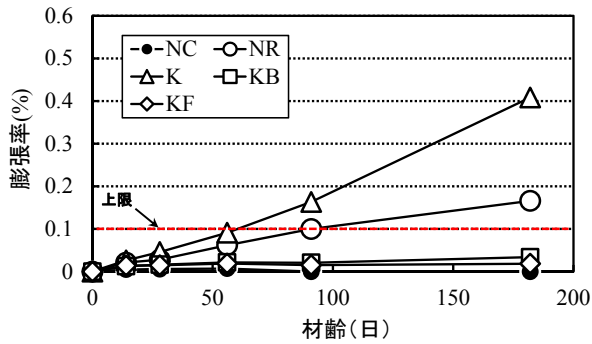


図-3 配合種別ごとの膨張率と材齢の関係

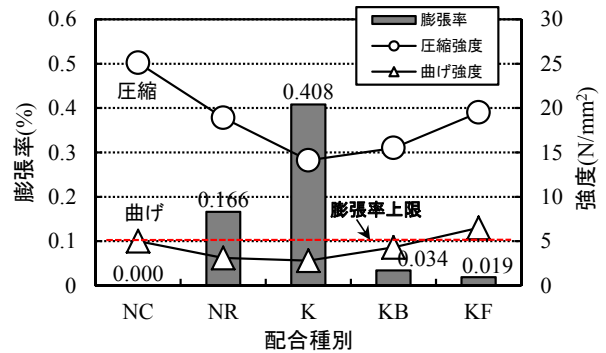


図-4 膨張率と膨張率測定後の強度

0.408%となり、配合 NR および K の膨張率はアルカリシリカ反応性の判定基準である 0.100%を超え「無害でない」となった。これに対し、セメント質量の 40%および 20%を高炉スラグ微粉末およびフライアッシュで置換した配合 KB および KF の膨張率は 0.034%および 0.019%となり「無害」と判定され、セメントの一部を高炉スラグ微粉末およびフライアッシュで置換することによる ASR 抑制効果が確認された。

配合種別ごとのモルタルのアルカリシリカ反応性試験終了時の膨張率、ならびに膨張率測定後の強度を図-4 に示す。膨張率測定後の配合 NC, NR および K の曲げ強度は 5.0N/mm², 3.1N/mm² および 2.8N/mm² となり、配合 NC に比し NR および K はそれぞれ約 38%および 44% 小さくなった。これに対し、配合 KB および KF の曲げ強度は 4.3N/mm² および 6.5N/mm² となり、配合 NC に比し KB は約 14%小さく、KF は約 30%大きくなった。一方、膨張率測定後の配合 NC, NR および K の圧縮強度は 25.1N/mm², 18.9N/mm² および 14.1N/mm² となり、配合 NC に比し NR および K はそれぞれ約 25%および 44% 小さくなった。また、配合 KB および KF の圧縮強度は 15.5N/mm² および 19.5N/mm² となり、配合 NC に比し KB および KF は約 38%および 22%小さくなった。

以上の結果より、セメントの一部を高炉スラグ微粉末およびフライアッシュで置換することにより、カレットモルタル（配合 K）の曲げおよび圧縮強度は改善され、

その効果は特にフライアッシュで置換した配合 KF の曲げ強度において大きく、配合 K の 2.3 倍、砕砂を用いた配合 NC の 1.3 倍を呈する結果となった。

3.3 カレットモルタルの長期暴露試験結果

(1) 質量減少率および相対動弾性係数の経時変化

屋外暴露試験におけるモルタルの質量減少率の経時変化を図-5 に示す。暴露材齢 15 年における配合 NR, K, KB および KF の質量減少率はそれぞれ、5.4%、2.3%、2.9%および 3.7%であった。供試体の質量は、測定時の含水状態によって若干の増減を繰り返しながら徐々に減少している。暴露開始から 2 年目程度まではいずれの供試体も標準養生から屋外に暴露されたことにより、乾燥を受けて質量が減少したものと考えられるが、特に配合 NR については、他の供試体の細骨材が廃ガラスカレットであり吸水率がほぼ 0%であるのに対して川砂を用いているために、骨材中の水分の逸脱が支配的となったことが影響したものと考えられる。さらに供試体表面には、凍結融解作用によると思われるスケーリングがみられたことから、これも質量減少の一因と考えられる。

屋外暴露試験におけるモルタルの相対動弾性係数の経時変化を図-6 に示す。暴露材齢 15 年における配合 NR, K, KB および KF の相対動弾性係数はそれぞれ、98%、49%、80%および 97%となり、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの ASR 抑制効果が確認された。配合 NR および K の相対動弾性係数は、暴露開始からほと

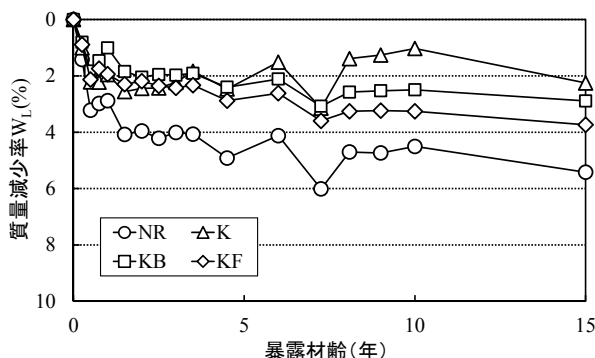


図-5 暴露試験における質量減少率の経時変化

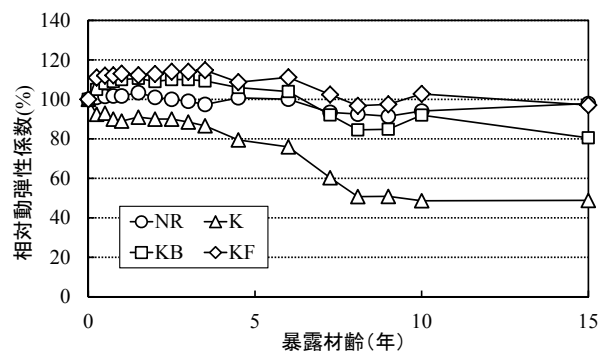
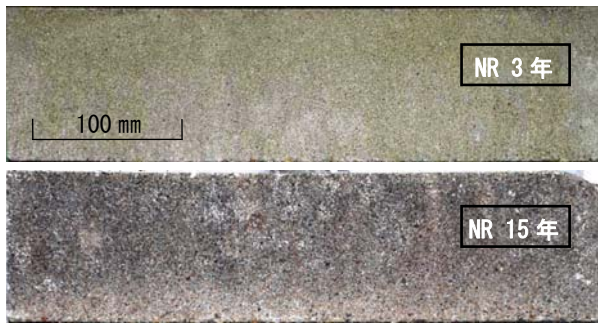
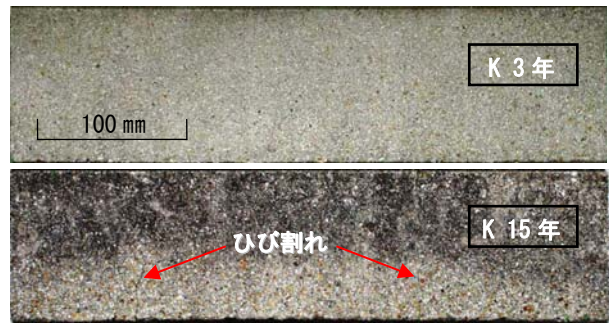


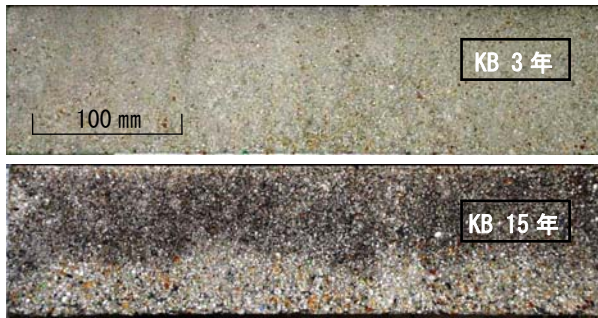
図-6 暴露試験における相対動弾性係数の経時変化



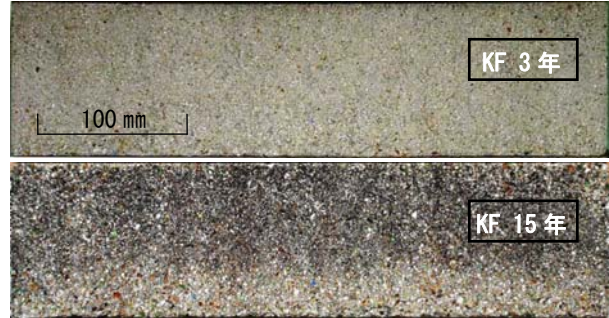
(a) 川砂モルタル NR



(b) カレットモルタル K



(c) 高炉スラグ混和カレットモルタル KB



(d) フライアッシュ混和カレットモルタル KF

写真-2 暴露材齢 3 年および 15 年経過後のモルタル供試体側面の外観

んど増加することなく、材齢の経過とともに徐々に低下している。しかし、配合 KB および KF の相対動弾性係数は、暴露材齢 1.5 年および 3.5 年において最大値が 111% および 115% になっている。この最大値からの配合 KB および KF の相対動弾性係数の低下を考えると、31% および 18% となる。また配合 KB および KF の相対動弾性係数が暴露材齢 10 年から 15 年にかけてそれぞれ 12% および 6% 低下していることから、さらに長期材齢の暴露性状を把握する必要があると考えられる。

図-6 に示す通り、配合 K には ASR によるひび割れが発生し、相対動弾性係数が 49% まで低下していて劣化が著しい。市坪ら⁵⁾は、コンクリート構造物表面の汚れに及ぼす生態系物質による影響について指摘しているが、配合 K のようにひび割れなどの劣化が著しい場合には、劣化によって生じたひび割れの空間を埋めるような形で菌類・藻類などの生態系物質が吸着して成長し、他の配合とは異なり、著しい劣化に伴い質量を増加させる一因となったことが考えられる。

(2) 暴露供試体の外観

暴露材齢 3 年および 15 年経過後のモルタル供試体側面の外観を写真-2 に示す。暴露材齢 15 年経過後において、いずれの供試体も凍結融解作用によると思われるスケールにより、表面のペーストが剥離して骨材が露出し、黒っぽい汚れの吸着がみられた。写真-2(a) 下の 15 年経過後の川砂モルタル NR の右上の欠損は、運搬時の取扱いによるものである。写真-2(b) 下の 15 年経過後のカレットモルタル K には、主に ASR によると思われ

るひび割れがみられた。これらのひび割れ部分には、前述の生態系物質の吸着が確認された。一方、ASR 抑制対策のため高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混和した写真-2(c) 下、(d) 下の 15 年経過後のカレットモルタル KB および KF には、スケールによる骨材の露出以外に目立った劣化は認められなかった。

(3) 暴露供試体表面の色調

色彩色差計による明度および色差の測定は、暴露材齢 1 年経過時から開始し、供試体の暴露側面 (100×400mm の面) 各 3 箇所での測定値の平均である。暴露試験における明度 (L*) の経時変化を図-7 に示す。測定開始時および暴露材齢 15 年における各供試体側面の明度範囲は、64.4~67.3 および 40.4~48.8、平均では 65.6 および 44.3 となり 21.3 低下し、暴露材齢の進行に伴う低下が認められた。配合種別ごとの明度の変化を図-8 に示す。測定開始時の最大明度は配合 KB の 67.3、配合 NR および KF の明度は 65.4、最小明度は配合 K の 64.4 であった。暴露試験における相対明度 (測定開始時の明度に対する各材齢の明度の割合 (%): rL^*) の経時変化を図-9 に、暴露材齢 15 年における配合種別ごとの相対明度を図-10 にそれぞれ示す。暴露材齢 15 年における配合 NR, K, KB および KF の相対明度はそれぞれ、61.8%, 70.3%, 72.5% および 65.6%、平均 67.6% であった。写真-2 でも明らかのように、暴露材齢 15 年経過後の供試体側面には黒色の汚れが吸着し、骨材の露出とともに明度低下の原因になったと考えられる。特に配合 NR は、黒色の汚れが測定面のほぼ全体にみられ、さらに骨材である川砂の

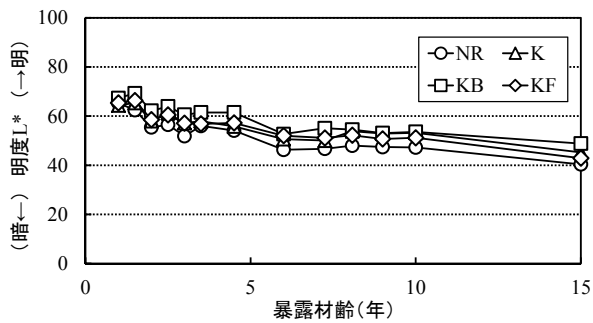


図-7 暴露試験における明度の経時変化

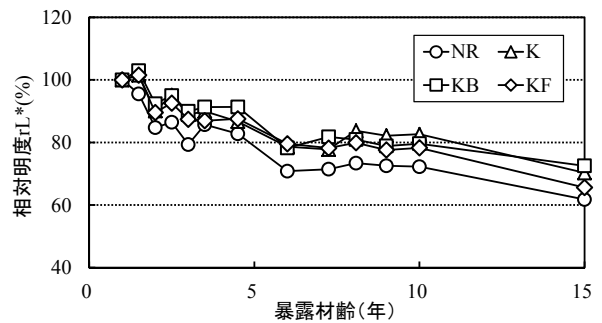


図-9 暴露試験における相対明度の経時変化

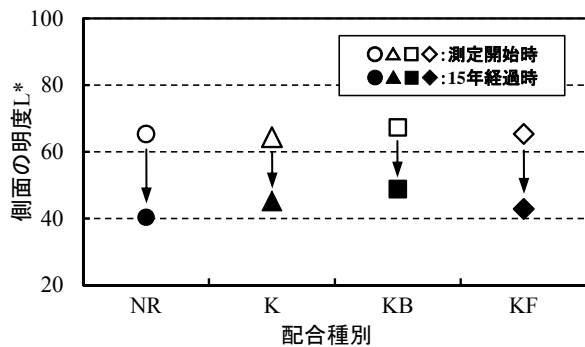


図-8 配合種別ごとの明度の変化

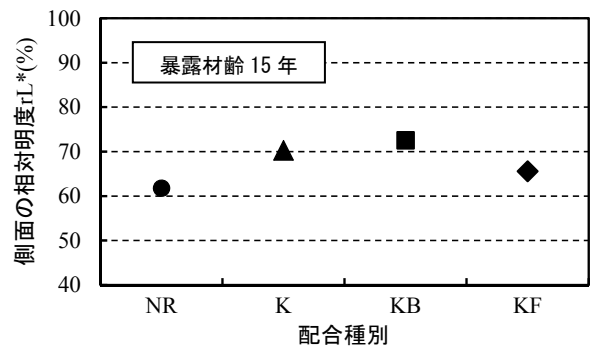


図-10 配合種別ごとの相対明度

露出によって明度が 40.4, 相対明度が 61.8%と 4 配合中最小になったと考えられる。いずれの供試体側面も上下方向に色調のばらつきがみられたことから、供試体暴露時の設置環境については検討が必要である。

以上のことから、既往の研究⁶⁾で検討されているように、暴露期間中の供試体の劣化に対して、明度は何らかの指標となり得る可能性がある。なお、全ての供試体において色差 a*および b*について、その変化は殆ど認められなかった。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりとなる。

- (1) 廃ガラスカレットを細骨材としてそのまま全量用いた場合、カレットモルタルの強度および耐久性は著しく低下するため、廃ガラスカレットの使用割合の制限や品質改善のための処理が必要となる。
- (2) セメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換する ASR 抑制対策により、廃ガラスカレットを細骨材としてそのまま全量用いたカレットモルタルの強度および耐久性を改善することができた。
- (3) 積雪寒冷地で屋外暴露試験を 15 年間行った結果、いずれの供試体もスケリングにより表面のペーストが剥離して骨材が露出し、黒色の汚れの吸着がみられた。
- (4) 本研究の範囲では、暴露期間の進行に伴い供試体の

- 質量減少率は増加、相対動弾性係数は低下した。劣化が著しいカレットモルタルの暴露材齢 15 年における相対動弾性係数は 49%まで低下したが、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの混和により改善された。
- (5) 暴露期間中の供試体側面の明度は、暴露材齢の進行に伴い低下する傾向があり、供試体の劣化に対する指標になると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、秋田大学 故 加賀谷誠先生には、長い期間に渡り多大なるご指導を賜りました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) ガラスびんリサイクル促進協議会：ガラスびんのマテリアル・フロー図（平成 23 年実績），<http://www.glass-recycle-as.gr.jp/>
- 2) 日本コンクリート工学協会編：廃棄物のコンクリートへの再資源化研究委員会報告書，pp.117-125，2003.6
- 3) 佐藤重悦，加賀谷誠：カレットおよび再生細骨材のコンクリートへの利用に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.299-304，2001.2
- 4) 国土交通省気象庁ホームページ：気象統計情報，<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 5) 市坪誠，森永力，河合研至，田澤榮一：コンクリート表面の汚れに及ぼす生態系物質の影響，コンクリ

ート工学年次論文集, Vol.21, No.1, pp.277-282, 1999

- 6) 柏崎健輔, 佐藤重悦, 城門義嗣, 加賀谷誠: ごみ熔融スラグをリサイクル使用したコンクリートの凍結融解特性と品質改善に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1435-1440, 2005