

アルカリシリカ反応抑制性能を持つ廃ガラス混和コンクリートの開発

香川大学 創造工学部

谷中 彩寧

1. はじめに

わが国は天然資源に乏しく、エネルギー供給の多様化と安定化を目的として、太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギーの導入が世界に先駆けて進められてきた。加えて、2011年の東日本大震災の発生による原発事故を契機として、2012年からは再生可能エネルギーにより発電された電気の固定価格買取制度（FIT）が開始され、大規模な太陽光発電施設が急増してきた。2023年時点では、約80GWの設備容量が設置されており、これは世界第3位の規模である。さらに、2020年にはカーボンニュートラル宣言がなされたことから、今後も太陽光発電設備の導入は継続することが予想される。

一般に、太陽光パネル（PV）の耐用年数は25～30年とされており、今後、FIT制度の開始後に設置されたPVについては、固定価格買取期間の終了ならびに耐用年数の満了が重なる2030年代以降に廃棄量が急増し、ピーク時には最大約46.6万トンに達すると推計されている¹⁾。PVの総重量の約60～70%をフロントカバーのガラスが占めるため、PV由来の廃ガラスの有効活用を確立できない場合、すでにひっ迫気味の最終処分場の処分容量をさらに圧迫する可能性がある。廃ガラスの利活用について、大量消費が可能であり、最終処分量の減容化に繋がることから、これまでにボトルガラスや板ガラス等を中心としてコンクリートへの利用が検討されてきた²⁾。近年では、PV由来の廃ガラスのコンクリートへの利用についても試験検討が進められているが、依然として、コンクリート用の資材として、PV由来の廃ガラスが広く利活用される状況には至っていない。他方で、廃ガラスに含まれる反応性シリカは、コンクリートのひび割れ劣化を引き起こすアルカリシリカ反応（ASR）のリスクが懸念されており、ASR抑制のために、例えば、石炭フライアッシュ（FA）や高炉スラグ微粉末（BFSP）等を併用した研究が行われている。しかしながら、CO₂排出量削減の観点より、FAやBFSPの産出量は将来的に減少傾向となる可能性がある。

そこで、本研究では、PV由来の廃ガラスを混和したコンクリートについて、環境面を考慮したASR抑制方法を提案することを目的として、ASRのリスク、空隙構造への影響、フレッシュ性状、力学特性、耐久性を評価し、これらを満たす最適配合を決定する。

2. 使用材料の種類および物性値

本研究では、使用済みPVのカバーガラスを、廃棄物中間処理業者がブラスト工法により剥離・回収した廃ガラスを試験材料として用いた。当該廃ガラスは、カレット、粉末、粉塵の3つに分類されるが、これらのうち、排出重量の60～70%を占め、最も多く回収される粉末の廃ガラス（表乾密度2.52 g/cm³、吸水率0.04%、図1参照）をガラス細骨材として各種



図1 PV由来の廃ガラス

試験に用いた．当該廃ガラスの XRD による鉱物組成分析結果を図 2 に示す．図 2 より，XRD パターンには非晶質特有のブロードなハローが支配的に認められ，明瞭な結晶相は確認されなかった．これらの特徴は，PV 由来ガラスを試験材料とした既往研究で報告されている XRD パターンと類似しており，このことから，本研究で使用了廃ガラスの鉱物組成は，既往研究と同等であると判断した．混合する細骨材には，香川県高松市庵治町産の砕砂（表乾密度 2.61 g/cm³，吸水率 0.93 %）を使用した．当該砕砂は JIS A 5005（コンクリート用砕石及び砕砂）に規定される品質規格も満たしており，アルカリシリカ反応性試験（化学法）において無害なものであることを確認した．廃ガラス，砕砂，ならびに，廃ガラスと砕砂からなる混合細骨材の粒度分布を図 3 に示す．図 3 中の G10，G20，G30 は廃ガラスと砕砂の混合細骨材を表しており，細骨材の容積の 10 %，20 %，30 %を砕砂から廃ガラスに置換したものである．Fig. 3 より，廃ガラス単体では微粒分が多く，JIS A 5005 に規定される砕砂の粒度分布の範囲から逸脱するが，廃ガラスを 10～30 %混和した混合細骨材は JIS A 5005 の規定を満たすことが判明した．なお，セメントには，ASR 試験用普通ポルトランドセメント（Na₂O eq: 0.52 %，K₂O/Na₂O: 1.4）ならびに普通ポルトランドセメントを，粗骨材には，香川県産庵治町の砕石 2005（表乾密度 2.62 g/cm³，吸水率 0.89 %）を使用した．

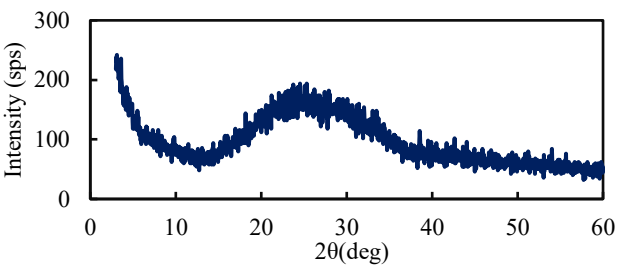


図 2 廃ガラスの XRD パターン

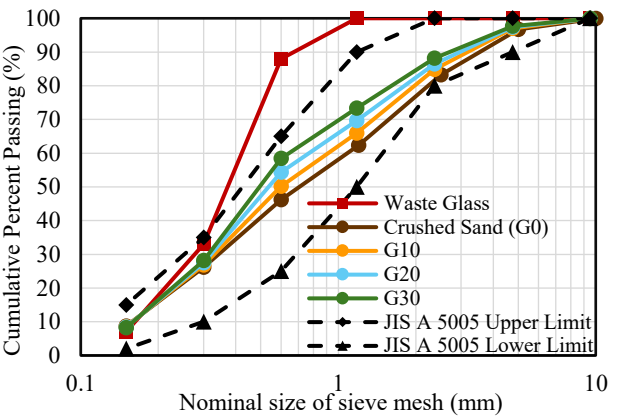


図 3 細骨材の粒度分布

3. 配合および試験内容

本研究では，廃ガラスを細骨材として用いた場合の ASR のリスクや空隙構造への影響，ならびに，フレッシュ性状，力学特性，耐久性について評価するため，モルタルとコンクリートでの評価に分けて試験を実施した．

廃ガラスの ASR リスクと空隙構造に及ぼす影響についての評価として，骨材のアルカリシリカ反応性試験（モルタルバー法による長さ変化（膨張率）試験，JIS A 1146）ならびに断面の気泡解析を実施するため，表 1，2 に示す配合でモルタル供試体を作製した．JIS A 1146 に

表 1 モルタル配合（モルタルバー法）

Sample	Glass mixed ratio (%)	Water + NaOH aq (mL)	Cement (g)	Crushed Sand (g)	Waste Glass (g)
I-G0	0	300	600	1350	0
I-G10	10	300	600	1215	130.3
I-G20	20	300	600	1080	260.7
I-G30	30	300	600	945	391.0

表 2 モルタル配合（断面の気泡解析）

Sample	Glass mixed ratio (%)	Unit quantity (kg/m ³)			
		Water	Cement	Crushed Sand	Waste Glass
II-G0	0	297.9	595.8	1340.5	0
II-G10	10	297.9	595.8	1206.4	129.4
II-G20	20	297.9	595.8	1072.4	258.8
II-G30	30	297.9	595.8	938.3	388.3

表 3 コンクリート配合／スランプ・空気量

Sample	Glass mixed ratio (%)	Unit quantity (kg/m ³)						Slump, Air content	
		W	C	S	WG	G	CA	Slump (cm)	Air content (%)
III-G0	0	175	318	780	0	957	0.636	12.5	3.4
III-G10	10	175	318	702	75	957	0.318	12.3	3.5
III-G20	20	175	318	624	151	957	0.955	11.8	4.2
III-G30	30	175	318	546	226	957	1.909	13.9	4.8

*W: Water, C: Cement, S: Crushed Sand, G: Crushed Stone, CA: AE-water reducing agent

規定される骨材の粒度分布と JIS A 5005 に規定される砕砂の粒度分布は異なるが、今回の試験ではモルタルバー法の試験においても JIS A 5005 の品質規格を満たす砕砂を使用した。また、JIS A 1146 の規定では、セメントと骨材は質量で指定されているが、本試験では質量を統一するのではなく、砕砂のみを細骨材とした配合を基準とし、細骨材容積の 10～30 %の砕砂を廃ガラスと置換した配合を設定した。このため、廃ガラス混和細骨材を用いたモルタルでは、廃ガラス混和率が高いほど細骨材の質量は小さいが、容積は等しい。なお、モルタルバー法による膨張率試験用には、40×40×160 mm の角柱供試体を用いた。また、断面の気泡解析では、φ50×100 mm の円柱供試体に対して 20 °Cにおける水中養生を材齢 91 日まで実施し、厚さ 5～10 mm 艇の円板を供試体中央部から切り出した後に研磨したものを試験体として用いた。研磨面に見られる気泡のうち、目視により確認可能な大きさの気泡を解析対象として、これらの気泡を明確に可視化するため、研磨面に黒色インクを塗布し、さらに、白色粉末（カオリン：平均粒径 0.5μm）を表面の凹部に充填する処理を施した。気泡を白色として強調した試験体を撮影し、得られた画像を解析に用いた。撮影した画像は、目視と最も整合すると判断されるしきい値にて二値化画像とした後、OpenCV（画像処理ライブラリー）を用いて、Python にて画像解析を行い、気泡の個数、白点の面積、等価円直径を算出・集計した。

先述の通り、廃ガラス混和コンクリートのフレッシュ性状・力学特性ならびに耐久性の評価として、スランプ試験（JIS A 1101）、空気量試験（JIS A 1128）、圧縮強度試験（JIS A 1108）、長さ変化試験（JIS A 1129-2）を実施するため、表 3 に示す配合でコンクリート供試体を作製した。廃ガラスの置換率は、モルタル配合と同様である。なお、本研究では、実施工での利用を想定し、スランプならびに空気量の目標範囲は、それぞれ 12±2.5 cm ならびに 4.5±1.5 %とし、いずれの置換率においても目標範囲を満たすことを確認した（表 3 参照）。また、圧縮強

度試験用には、 $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体、長さ変化試験用には、寸法 $100 \times 100 \times 400$ mm の角柱供試体を用いた。

4. 試験結果

図 4 にモルタルバーによる膨張率試験結果を、表 4、図 5 にモルタル断面の画像解析結果を示す。なお、図 5 中の各グラフ上のプロットは、それぞれの廃ガラス置換率における気泡の面積基準 D50 を表している。JIS A 1146 では、無害と判定する基準として、材齢 13 週（91 日）における膨張率が 0.050 %未満、かつ材齢 26 週（182 日）において 0.10 %未満であることが規定されている。図 4 より、いずれの廃ガラス置換率において、材齢 91 日時点の膨張率は 0.050 %を、かつ、最終材齢である 182 日時点の膨張率が 0.10 %を大幅に下回っており、「無害でない」と判断されるものは確認されなかった。他方で、いずれの廃ガラス置換率においても、材齢 0～91 日までの膨張率には変動が見られたが、材齢 91 日以降は同程度の膨張率を示した。本試験では、廃ガラス置換率と膨張率との間に明確な関連性は認められなかったものの、廃ガラス置換率 30 %までは、ASR による有害な膨張を起こすリスクは低いと考えられる。表 3 より、廃ガラスの置換率が 10 %ならびに 20 %の供試体（II-G10、II-G20）と無置換（II-G0）の供試体では、認識された気泡（白点）の個数に大きな差は認められなかったが、置換率 30 %の供試体（II-G30）では、II-G0 よりも気泡数が増加する傾向が確認された。図 5 より、II-

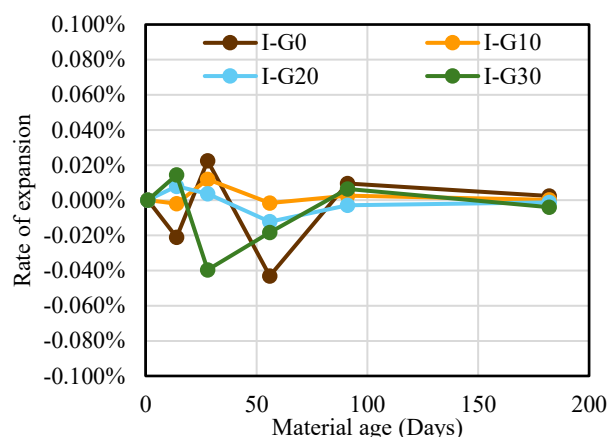


図 4 モルタルの膨張率

表 4 画像解析結果

Sample	Glass mixed ratio (%)	Total Count	Area D50*
II-G0	0	593	0.522 mm
II-G10	10	588	0.461 mm
II-G20	20	586	0.568 mm
II-G30	30	874	0.602 mm

* The particle diameter at which the cumulative bubble area, calculated from equivalent circular diameters, reaches 50% of the total area.

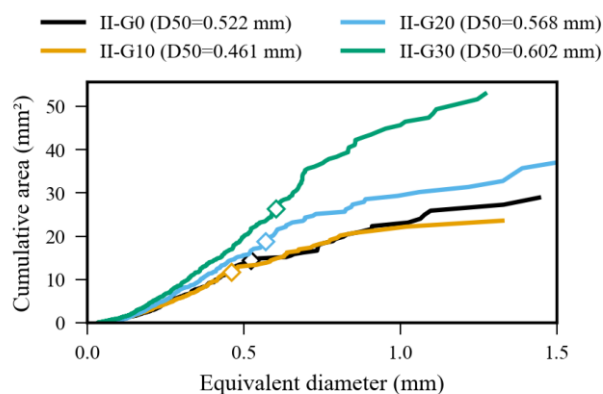


図 5 気泡の等価円直径と累積面積の関係

G10 は、小～中径気泡（～1.0 mm）までの累積面積が II-G0 と同程度であったが、大径気泡（>1.0 mm）による影響が抑制された結果、総気泡面積が最も小さかった。このことから、組織が最も緻密であると考えられる。一般に、粒度範囲の限られた材料を低率で添加した場合、細骨材骨格中の粒径ギャップを補完する効果が期待される。本研究においても、廃ガラスは同様の効果を有すると考えられる。また、II-G0 のグラフは II-G10 と II-G20 の間にあり、中径気泡以降（>0.8 mm）のグラフの傾きが II-G10 と II-G20 で類似している一方、II-G30 とは明らかに異なっていることから、廃ガラスの最適な置換率は 20 %までの間に存在する可能性がある」と推察される。廃ガラス置換率が増加するにしたがって、解析した画像ごとに認識された気泡

の面積基準 D50 は増加する傾向を示したが、III-G10 では、III-G0 よりも値が小さく、最小となった。面積基準 D50 は、従来から用いられてきた空隙の個数分布や平均径、細孔空隙量では捉えにくい、力学的に支配的な粗大空隙の寄与を反映する指標であり、強度および耐久性評価と直接対応づけられる点に特徴があるといえる^{3),4)}。面積基準 D50 の値は、断面内において優勢な気泡サイズを代表する指標であり、本解析では、目視で認識可能な大きさの気泡を対象としていることから、D50 の値が大きいほど強度と耐久性の低下に繋がる可能性があると考えられる。

図 6 に材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度試験結果を、図 7 にコンクリートにおける長さ変化試験結果を示す。なお、III-G0 と III-G10～III-G30 の作製日が 1 週間程度異なっていることに留意する。図 6 より、廃ガラス置換率 10 %、20 %、30 %で混和したコンクリート (III-G10, III-G20, III-G30) の 28 日強度は、廃ガラス無混和 (III-G0) よりも低い値を示した。廃ガラスを置換した供試体において圧縮強度の低下が生じた要因としては、置換率の増加に伴う骨材－セメントペースト界面遷移帯 (ITZ) の弱化が挙げられる。特に、廃ガラスは砕砂と比較して表面が平滑であるため、セメントペーストとの付着性が相対的に低い可能性がある。加えて、廃ガラスはほとんど吸水しないため、骨材界面に水が滞留しやすく、局所的に水セメント比 (W/C) が高い領域が形成されることによって、界面遷移帯が脆弱化すると考えられる。他方で、III-G30 の 28 日強度は、一般的なコンクリートの耐久設計基準強度の 1 つである 24 N/mm²を下回ったものの、III-G10, III-G20 については同程度の値を示し、24 N/mm²を十分上回る結果となった。このことから、廃ガラス置換率 10 %ならびに 20 %においては、構造材料として必要な強度性能を十分に確保しているといえる。図 7 より、いずれの廃ガラス置換率においても、長さ変化率が許容値である -800×10^{-6} を十分下回る結果となった。他方で、いずれの材齢においても、III-G10 の長さ変化率は III-G0 を下回っており、その差は 100 以上であることから、廃ガラス置換率 10%においては、乾燥収縮が低減する可能性があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、PV 由来の廃ガラスを混和したコンクリートの ASR 抑制方法の提案のため、廃ガラスを細骨材として用いた場合の ASR のリスクや空隙構造への影響、ならびに、フレッシュ性状、力学特性、耐久性を評価した。その結果、本研究においては、廃ガラスのみを置換率 10～30 %の範囲で用いたとしても、ASR による有害な膨張を起こすリスクは

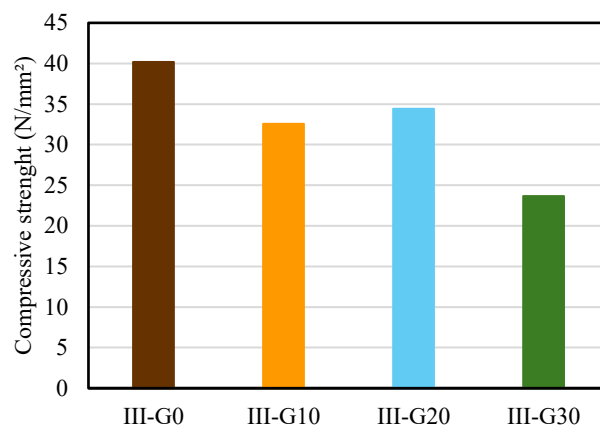


図 6 材齢 28 日におけるコンクリート圧縮強度

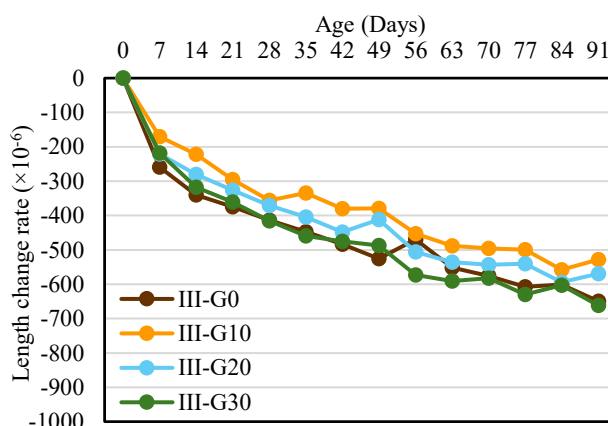


図 7 コンクリートにおける長さ変化率

低く、特に、廃ガラス置換率を 10% とした場合には、空隙構造の緻密化により組織劣化を伴わないだけでなく、力学特性ならびに耐久性の観点からも実用上許容可能な範囲で利用できる可能性が示された。これらのことから、環境面を考慮した場合、ASR を抑制しつつ、各性能を満たす配合は、廃ガラスの置換率が 10 % までであると考えられる。

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所，2025 年研究助成を受けて実施された。

参考文献

- 1) 環境省：令和 5 年度 建設廃棄物及び使用済再生可能エネルギー発電設備のリサイクル等の推進に係る調査・検討業務【使用済再生可能エネルギー発電設備のリサイクル等の推進に係る調査・検討（3.（2））】報告書，2024.
- 2) （社）日本コンクリート工学協会：廃棄物のコンクリート材料への再資源化研究委員会報告書，pp.117-125，2003.
- 3) 小椋紀彦，高木憲章，小島孝之：廃ガラス瓶粉末を用いたコンクリートの耐久性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.343-348，2001.
- 4) 山田寛次，石山智：廃ガラスカレットを骨材とするモルタルのアルカリシリカ反応による膨張特性に関する考察，日本建築学会構造系論文集，71 巻，第 607 号，pp.1-6，2006.