太陽光モジュールガラスを細骨材として使用したモルタルの ASR による膨張性の評価

東北大学　学生会員　○近藤 真帆
東北大学　正会員　宮本 慎太郎　皆川 浩　久田 真
西松建設(株)　正会員　平野 孝行　椎名 貴快

1. はじめに

近年，再生可能エネルギーの導入が大幅に拡大し，太陽光発電の普及が急速に進んでいる．発電の際に用いられる太陽光パネルは，2030 年頃をピークに寿命を迎え，大量に廃棄されることが予測されており [1]，太陽光パネルの有効な再利用技術の確立が求められている．

一方で，各種のリサイクル骨材をコンクリート材料に有効利用する動きが高まっており，重量比で太陽光発電施設全体の約 36 %を占める太陽光モジュールガラス [2] も，コンクリート骨材に利用できる可能性がある．しかし，同材に含まれる豊富なシリカ成分が，ASR による膨張破壊の発生を助長することが懸念される．

以上を踏まえ，本研究では太陽光モジュールガラスの細骨材への利用を考え，ASR による膨張挙動と混和材置換による抑制効果について評価した．

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究では，細骨材として太陽光モジュールガラス(以下 SMG，密度：2.46 g/cm^3)と北海道産安山岩(以下 An, 密度：2.63 g/cm^3), 標準砂(以下 Ss, 密度：2.64 g/cm^3)を使用し，JIS A 1146 に準拠して粒度を調整した．結合材には研究用普通ポルトランドセメント（以下 N，密度：3.16 g/cm^3 ），高炉スラグ微粉末（以下 GGBS，密度：2.91 g/cm^3 ），フライアッシュ(以下 FA，密度：2.19 g/cm^3)を用いて，OPC（混和材無置換）と GGBS を 40 %，70 %置換（容積比），FA を 10 %，20 %置換（容積比）の計 5 水準で試験をおこなった．

2.2 試験方法

(1) 骨材からのアルカリ溶出量試験

細孔溶液を模擬した 1N･KOH 溶液に粒径 0.15-0.3mm の細骨材 SMG，An，Ss を 60 °C の恒温槽内で固液比 25g/100mL の条件で浸せきさせ，浸せき開始から 0, 14, 28，56，91 日における溶液中の Na^+の濃度をイオンクロマトグラフィーによって測定した．

表-1 本試験で使用した配合

供試体記号	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)					
		W	C	S	A*	GGBS, FA	AE 減水剤
SMG-OPC	50	181	578	1350	108	—	4.6
SMG-GGBS40%		171	347		118	213	2.8
SMG-GGBS70%		164	173		125	372	2.7
SMG-FA10%		195	520		93.4	40.0	2.8
SMG-FA20%		210	462		78.7	80.1	2.7
An-OPC	50	181	578	1350	108	—	—
An-GGBS40%		171	347		118	213	—
An-GGBS70%		164	173		125	372	—
An-FA10%		195	520		93.4	40.0	—
An-FA20%		210	462		78.7	80.1	—
Ss-OPC	50	256	512	1536	—	—	—

* *A* は 1 mol/L の NaOH 水溶液

(2) モルタルバー法による膨張量試験

JIS A 1146 に準拠し，表-1 に示す配合でモルタルを寸法 4×4×16 cm の型枠に打ち込み, 24±2 時間後に脱型した後，温度 40 °C, 相対湿度 95 %以上の環境において長さ変化を測定した．なお，モルタルバー法では浸せき期間 91 日時点での膨張量が 0.05 % 未満の場合「無害」, 0.05 % 以上の場合は「無害でない」と判定される．

(3) デンマーク法による膨張量試験

2.2(2)と同様に打ち込み，脱型したモルタルを，飽和 $Ca(OH)_2$溶液中で 28 日間養生し, 温度 50 °C の飽和 NaCl 溶液に 3 カ月浸せきさせ, 長さ変化を測定した．なお，デンマーク法においては，浸せき期間 91 日での膨張量が 0.1 % 未満の場合「無害」, 0.1-0.4 % の場合「不明」, 0.4 % 以上の場合「有害」と判定される．

3. 実験結果・考察

アルカリ溶出量試験の結果に着目すると（図-1），SMG は他の細骨材と比較して非常に高い Na^+濃度であり，2.2(2),(3)のモルタル膨張量試験でも SMG 細骨材から多量のアルカリ供給があったと考えられる．

次に，モルタルバー法における膨張挙動に着目する

キーワード　モジュールガラス　アルカリシリカ反応(ASR)　高炉スラグ微粉末　フライアッシュ
連絡先　〒980-8579　宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院土木工学専攻　Tel　022-795-7427

と(図-2)，反応性骨材である An は ASR 判定基準を大きく上回る膨張量を示した．一方で，SMG は Ss と比較してやや膨張したものの，ASR 判定基準の 0.05 %には及ばなかった． ここで，既報[3] ではパイレックスガラス等の結晶質シリカを含有するガラスを使用した際，大きな膨張が生じている．本研究において，骨材から多くのアルカリ供給があるにも関わらず SMG で顕著な膨張が起きなかったのは，SMG の含有するシリカが非晶質であるという違いから，アルカリが骨材全体で急速に消費され，局所的な膨張に至らなかったためであると考察した．

また，デンマーク法における SMG のモルタル膨張量に着目すると（図-3），FA10，20 % 置換では初期に OPC よりも大きな膨張量を示すが，それぞれ浸せき 28，56 日目で膨張量が OPC より小さくなっていることが確認できた．GGBS40 %，70 %置換では，浸せき期間全体を通して OPC よりも膨張量が小さく，GGBS 置換の方が ASR による膨張の抑制効果が高いことが確認できた．GGBS を置換した際の，アルカリ外来型であるデンマーク法での ASR 抑制は，N よりも単位アルカリ量の少ない GGBS を高比率で置換することによるアルカリ希釈効果に加え，GGBS の反応によって硬化体内部の組織が緻密化し，内部へのアルカリ供給が抑制されたためと考えられる．

以上をまとめると，SMG を細骨材として用いた際，ASR による顕著な膨張は確認されず，また FA や GGBS の置換でその膨張はさらに抑制された．したがって，SMG は An と比較して安全な骨材として利用できる可能性が高いことに加え，さらには，ASR による膨張の抑制を考えた場合には SMG や GGBS を大量に有効利用できるため環境負荷の低減につながることが期待できる．しかしながら，SMG の置換率を変化させた場合は，ペシマム現象により本研究の結果よりも膨張量が増大することが懸念されるため，実用化の際にはガラスの混和率，外環境を変化させるなどの検証が必要である．

4. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す．

太陽光モジュールガラスをアルカリ溶液に浸せきさせた際，卓越したアルカリ濃度を示したことから，太陽光モジュールガラスを細骨材として使用した場合には多量のアルカリが供給されると考えられた．一方で，

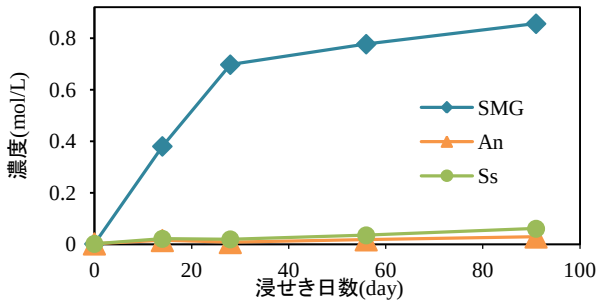

図-1 溶液中の Na 溶出量(mol/L)

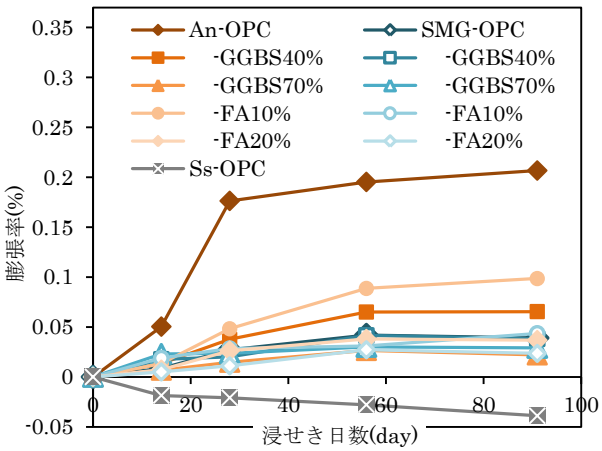

図-2 モルタルバー法での膨張挙動

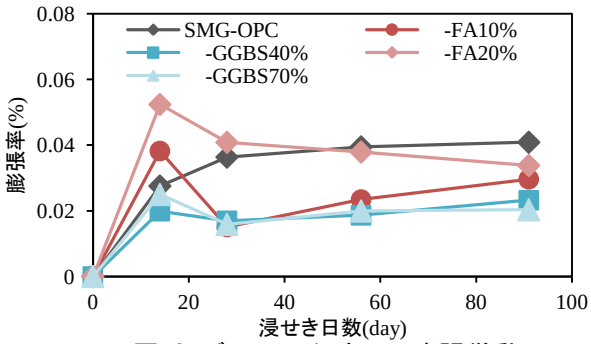

図-3 デンマーク法での膨張挙動

太陽光モジュールガラスを細骨材として利用したモルタルでは，ASR の判定基準を上回る顕著な膨張は確認されず，さらには，フライアッシュや高炉スラグ微粉末の混和で膨張量が抑制された．特に高比率での高炉スラグ微粉末の置換で高い抑制効果を示した．

謝辞

本研究を実施するにあたり，宮城県の高橋禎一様に多大なるご協力をいただきました．ここに記して感謝の意を示します．

参考文献

1) 環境省：太陽発電施設のリサイクル等の推進に向けたガイドライン（第一版），2016
2) 志藤暢哉ら：太陽光モジュールガラスを混和材として利用したセメント硬化体の基礎物性評価，土木学会東北大会，V-1-5，2016
3) 鳥居和之ら：廃棄ガラス起源リサイクル砂のアルカリシリカ反応性に関する研究，Journal of the Society of materials Science，Vol.55，No.10，pp.905-910，2006