

## 太陽光モジュールガラス微粉末をモルタルに混和した時の圧縮強度と空隙率に関する検討

東北大学 学生会員 ○貝塚 勇介  
 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、発電時に二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギーが注目されており、その一つである太陽光発電の普及が急速に進んでいる。ここで、太陽光発電に用いられる太陽光パネルの寿命は20-30年とされており、太陽光パネルは2030年頃をピークに大量に廃棄されることが予測されている<sup>1)</sup>。したがって、廃棄物量削減のために太陽光パネルの再利用技術を確立することが重要である。

太陽光モジュールガラスは重量比で太陽光パネル全体の約36%を占めているが、組成の大半が非晶質シリカであるため、混和材として利用できる可能性が考えられる。以上の技術的背景から、本研究では太陽光モジュールガラスを粉砕して混和材として用いたモルタルの圧縮強度および空隙率の変化を評価した。

SMGのポゾラン反応性に関する既往の研究として、志藤ら<sup>2)</sup>は粒径75 $\mu\text{m}$ に調整したSMGをセメントに一部置換した配合のモルタルおよびセメントペーストにおいて、ポゾラン反応が生じている可能性を報告している。本研究では、SMGの反応性を高めることを目的としてSMGを比表面積4000 $\text{cm}^2/\text{g}$ に微粉砕し、これをセメントに一部置換した場合におけるモルタルの挙動について実験と考察を行う。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料と配合

本研究では結合材に市販の普通ポルトランドセメント（以下N、密度：3.16 $\text{g}/\text{cm}^3$ ）を、細骨材に標準砂（以下Ss、密度：2.64 $\text{g}/\text{cm}^3$ ）を、混和材として太陽光モジュールガラス（以下SMG、密度：2.49 $\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積：4000 $\text{cm}^2/\text{g}$ に調整）を使用した。混和材の置換率は質量比で0、5、10、15%の計4水準とした。配合は表-1に示す。

表-1 配合設計

水準	W/C(%)	置換率 (%)	単位量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			
			W	C	SMG	S
N	50%	0	257	513	0	1539
GS5		5	256	486	26	1536
GS10		10	255	433	76	1529
GS15		15	254	380	127	1522

## 2.2 供試体の作製

本研究では、JIS A 5201に準拠してモルタルを練り混ぜ、 $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ のプラスチック製型枠に打ち込んだ。試し練りをした際、SMGを置換した水準に関してはブリーディングが認められ、さらに、気体の発生に起因すると思われるモルタルの膨張が生じたため、これが収束するまで練り返しを実施した後に打込みを実施した。モルタルは打込み後 $24 \pm 2$ 時間で脱型し、 $20^\circ\text{C}$ 環境下で水中養生を実施した。

## 2.3 試験方法

## (1) 圧縮強度試験

材齢7、14、28、56日において圧縮強度試験を実施し、圧縮強度を測定した。供試体形状は $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ である。

## (2) アルキメデス法による空隙率の測定

$\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ の供試体中央部から約2cm厚をモルタルカッターで切り出し、 $\phi 5 \times 2 \text{ cm}$ の試料を作製した。さらに、前処理として試料を水没させた状態で真空ポンプを使用して24時間減圧環境下に置くことで、飽水状態にした。この試料の表乾質量( $W_1$ )、水中質量( $W_2$ )を測定し、また、試料を $105^\circ\text{C}$ の乾燥炉で質量が一定になるまで乾燥させた後の質量を絶乾質量( $W_3$ )として測定した。下記の数式に数値を代入して試料の空隙率を算出した。

$$\varepsilon = \frac{(W_1 - W_2) / \rho_w}{(W_1 - W_3) / \rho_w} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$ ：空隙率(%),  $\rho_w$ ：水の密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )である。

## (3) 熱分析によるポルトランドイト量の測定

材齢56日の供試体はメノウ乳鉢を用いて十分に粉砕し、示差熱-熱重量同時測定(TG-DTA)を用いてポルトランドイト量（以下CH量）を測定した。このとき、 $400 - 500^\circ\text{C}$ の範囲における試料の質量減少をCHの分解によるものとして換算した。

## 3. 実験結果・考察

## (1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-1に示す。SMGを置換した水準の圧縮強度は材齢7日では無置換(N)よりも小さかったが、GS5、GS10はその後の強度増進が認められ、材齢14日の圧縮強度はNとほぼ等しく、材齢56日ではNを超える強度を示した。一方、GS15については材齢7日から28日までの強度増進はGS5、GS10とほぼ同程度であったが、他のSMGを置換した水準とは異なる

キーワード 太陽光モジュールガラス ポゾラン反応 混和材

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-6 東北大学大学院土木工学専攻 TEL 022-795-7427

り材齢 28 日以降の圧縮強度の強度増進は認められなかった。

**(2) アルキメデス法による空隙率測定**

空隙率の測定結果を図-2 に示す。N の空隙率は材齢の経過に伴い減少する傾向が認められた。一方で、SMG を置換したすべての水準において、N と比較して空隙率は大きく、材齢の経過に伴う空隙率の減少が認められなかった。これらの結果に関しては、本研究ではセメントに対して SMG を置換しているため単位セメント量が小さくなり、SMG を置換した水準では空隙率が大きくなる傾向を示したと考えられる。

**(3) TG-DTA による分析**

TG-DTA による測定結果から算出した CH 量を図-3 に示す。図中の測定 CH 量は TG の測定結果から算出した CH 量である。一方の予測 CH 量は、N の測定 CH 量に単位結合材量に対する単位セメント量の割合を乗じて算出した値であり、ポズラン反応が全く生じない場合の CH 量の予測値である。

予測 CH 量と測定 CH 量を比較すると、SMG を置換した全ての水準において測定 CH 量は予測 CH 量より小さい値となった。特に、GS5 の測定 CH 量は予測 CH 量と比較して約 1.07 % 小さく、圧縮強度試験の結果も併せて考察すると、ポズラン反応が進行したことで CH が消費された可能性がある。一方で、GS10、GS15 の予測 CH 量と測定 CH 量の差は、それぞれ約 0.43 %、0.53 % であった。圧縮強度試験の結果も併せて考察すると、材齢 56 日では GS10、GS15 におけるポズラン反応の進行は GS5 より遅いと考えられる。原因として、本研究ではセメントに対して SMG を置換しており、置換率が大きい GS10、GS15 では粉体から溶出するアルカリ量が少ないため、ポズラン反応の進行が遅い可能性が考えられる。しかし、近藤らの報告<sup>3)</sup>から、SMG は多量のアルカリを含有しており、SMG の反応に伴いアルカリが溶出することが分かっている。このため、SMG の反応に伴いアルカリが溶出し、系内のアルカリ量が増えることでポズラン反応が促進される可能性が考えられる。本試験は材齢 56 日までの短期的な試験結果を考察したものであるが、GS10、GS15 ではより長期の材齢においてポズラン反応が進行する可能性がある。

**4. 結論**

比表面積 4000 cm<sup>2</sup>/g に微粉砕した SMG をセメント置換したモルタルにおいて、置換率 10 % 以下で無置換を上回る圧縮強度を示し、SMG を置換した水準の測定 CH 量が予測 CH 量より小さいことから、SMG がポズラン反応性を持つ可能性が示唆された。しかし、SMG による置換率が 10 % を超える場合は圧縮強度および CH 消費量が GS5 と比較して小さく、置換率の増加に伴うアルカリ量の減少によりポズラン反応の進行が遅れている可能性が示唆された。本研究は材齢 56 日の短い測定材齢で実験を実施したため、SMG のポズラン反応性の詳細な評価には、より長期の材齢における試験および考察が必要であると考えられる。

また、フレッシュ時のモルタル中で発生した気体に関しては詳細および発生原因が不明であり、更なる検討が必要である。

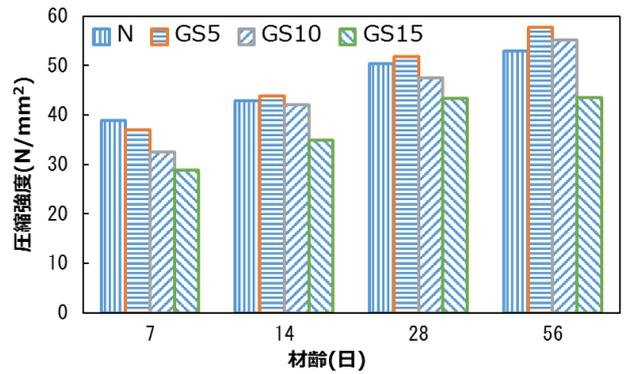


図-1 圧縮強度の推移

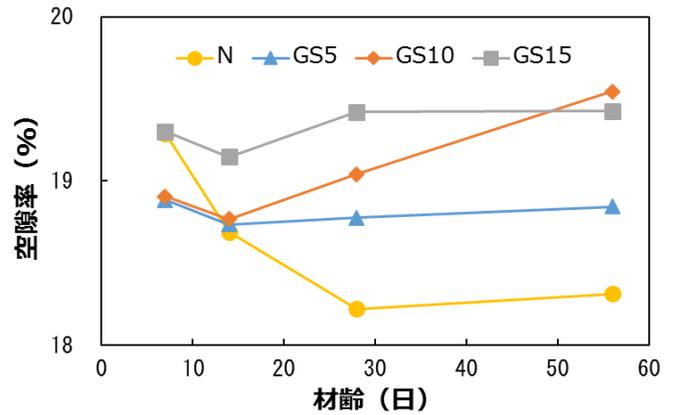


図-2 置換率ごとの空隙率の違い

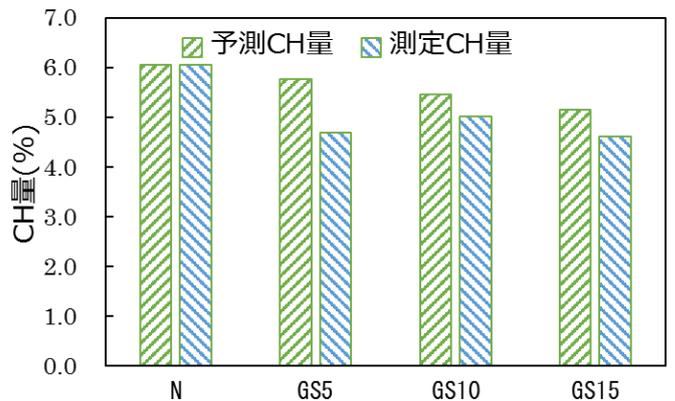


図-3 材齢 56 日時点の CH 量

**謝辞**

本研究の実施に際し、宮城県の高橋禎様に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) 志藤ら：太陽光モジュールガラスを混和材として内割置換したセメント硬化体の強度特性，土木学会第 72 回年次学術講演会，V-526，2017
- 3) 近藤ら：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，土木学会東北大会，2018