

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

東北大学大学院 学生会員 ○志藤 暢哉
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. 目的

近年、再生可能エネルギーが注目され、太陽光発電施設の建設が急速に進んだ。施設に設置された太陽電池モジュールは 2030 年頃をピークとして寿命を迎えると推定されており、適切な廃棄処理が求められていると報告されている¹⁾。またこの報告では、排出される廃棄物は埋立処分を行うよりもリサイクルを行った方が費用対効果は大きいと試算されている。

太陽電池モジュールシステム全体の約 36 %（質量比）を占める太陽光モジュールガラス²⁾に着目すると、前報³⁾より、非晶質シリカが多量に含まれているため、ポゾラン材料としての利用が期待できる。

本研究では、太陽光モジュールガラスを建設材料として有効利活用することを目指し、粒径 75 μm 以下に粒度調整した太陽光モジュールガラス（以下、ガラス粉末）を混合材として内割置換した際のセメント硬化体の強度特性について考察を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

使用材料には、普通ポルトランドセメント（密度 3.15 g/cm³）、水道水、山砂（表乾密度 2.59 g/cm³）およびガラス粉末（GP、密度 2.46 g/cm³）とし、セメントペースト（W/(C+GP)=35 %）およびモルタル（W/(C+GP)=50 %、S/C=2.4）を作製した。また、ガラス粉末をセメントに内割置換で添加した際の物性を確認するため、(1) 無置換、(2) セメントの 5 %質量置換、(3) 10 %質量置換の計 3 水準を設けた。なお、養生方法は試験材齢に達するまで水中養生を施した。表-1 に各水準の配合を、表-2 にガラス粉末の化学組成を一般的なポゾラン材料のフライアッシュ（FA、JIS I 種灰）と比較して示した。

2.2 測定項目

ガラス粉末の化学成分および結晶構造に関しては、蛍光 X 線分析（XRF）および粉末 X 線回折（XRD）により特定した。圧縮強度試験にはφ50×H100 mm の円柱供試体

表-1 本研究で使用了配合

供試体 記号	W/(C+GP) (%)	S/(C+GP)	GP 置換率 (%)	単位量(kg/m ³)			
				W	C	GP	S
P-N	35	—	0	524	1498	0	—
P-GP5			5	521	1414	74	
P-GP10			10	517	1331	148	
M-N	50	2.4	0	287	573	0	1376
M-GP5			5	286	543	29	1373
M-GP10			10	285	513	57	1369

表-2 化学組成

粉体	ig.loss	化学成分 (mass%)							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
GP	0.31	71.1	1.8	0.1	9.2	3.7	0.2	12.4	0.9
FA	1.6	57.8	23.0	6.1	4.9	1.5	1.0	0.8	0.7

備考) FA(フライアッシュ JIS I 種灰)の成分値は製造会社の公表値に基づく

を用い、試験方法は JIS A 1108 に準拠した。なお試験材齢は 7, 28, 91 日である。また、四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法（案）（JSCE-K 562-2008）により電気抵抗率を測定した。なお測定材齢は 3, 7, 14, 28, 56, 91 日である。

3. 実験結果および考察

前報³⁾でも報告した通り、粉末 X 線回折により取得したガラス粉末のチャート（図-1）および蛍光 X 線分析の結果（表-2）から、ガラス粉末は非晶質シリカにより構成されていると考えられる。

圧縮強度試験の結果を図-2 に示す。セメントペーストの結果に着目すると、ガラス粉末を置換した場合、材齢 7 日における強度は無置換のものと同程度またはそれ以上の強度を有していることが認められた。さらに材齢を追っていくと、材齢 28 日では全水準で同程度の値を示しており、材齢 91 日ではガラス粉末を置換した水準の強度は増加傾向にあることが確認できた。一方、モルタルの結果に着目すると、ガラス粉末を内割で置換した場合、無置換のものと比較して強度低下が認められた。セメントペーストとモルタルでは異なる傾向を示しているが、この原因は、単位体積当たりの粉体量（C+GP）に起因するものであると考えられる。

キーワード 太陽光モジュールガラス、混合材、リサイクル

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院工学研究科 TEL 022-795-7427

ここで、材齢 7 日における強度の増加に関して考察を行う。セメントの水和は固相の表面サイトから核を生成する不均一核生成により水和が進行することが知られている⁴⁾。また不均一核生成の生じやすさは、核生成のサイトとなる固相と液相との接触角（ぬれ角）に依存しており、ぬれ角が小さいほど不均一核生成に必要なエネルギーは低くなるため核が生成しやすくなる。ここで、ガラス粉末は非晶質であることから、結晶質のものと比較して表面エネルギーが大きいことが考えられる。固相の表面エネルギーが高いとぬれ角は小さくなり、核が生成されやすくなる。したがって、ガラス粉末を置換した場合、系内における不均一核生成のサイトが増加したと考えられる。以上をまとめると、材齢 7 日においてガラス粉末表面は核生成のサイトとして使用され、結果的に水和が促進されたと推察した。

次に材齢 91 日における強度増加は、ポズラン反応によりセメント硬化体が緻密化することで強度が増加したと推察される。しかし、圧縮強度の結果のみでは実際にセメント硬化体が緻密化しているか判断できない。そこで、電気抵抗率の結果（図-3）に着目すると、材齢 91 日におけるガラス粉末で置換した水準は、無置換のものと比較して電気抵抗率が高いことが確認できた。以上の結果より、ガラス粉末を置換した場合、セメント硬化体が緻密化する可能性が示された。一方、ガラス粉末に含まれる Na や K が液相中に溶け出し、 Na^+ や K^+ がセメント水和物に吸着することで液相中のイオン濃度を低下させた可能性も考えられるため、セメント硬化体の空隙率なども含めてこれらを詳細に検討していく必要がある。

4. 結論

75 μm 以下に粒度調整した太陽光モジュールガラスを内割置換した場合、セメントペーストにおいて材齢 7 日および 91 日の圧縮強度が増加し、電気抵抗率は材齢が経過するとともに増加する傾向を示した。材齢 7 日においては、ガラス粉末表面が核生成のサイトとして使用されたことにより水和が促進されたものであると推察した。また材齢 91 日においては、圧縮強度の増加と電気抵抗率の上昇からポズラン反応している可能性が示唆された。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費挑戦的萌芽研究（課題番号：15K14010）によって行われた。また、本研究を実施するにあたり、宮城県庁の高橋禎一様に多大なるご協力頂きました。ここに記して感謝の意を示します。

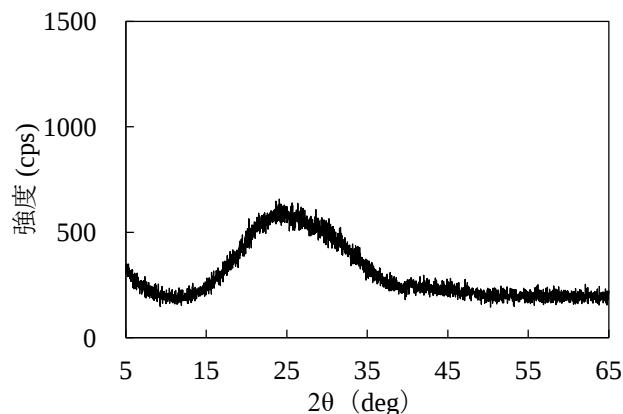


図-1 粉末 X 線回折

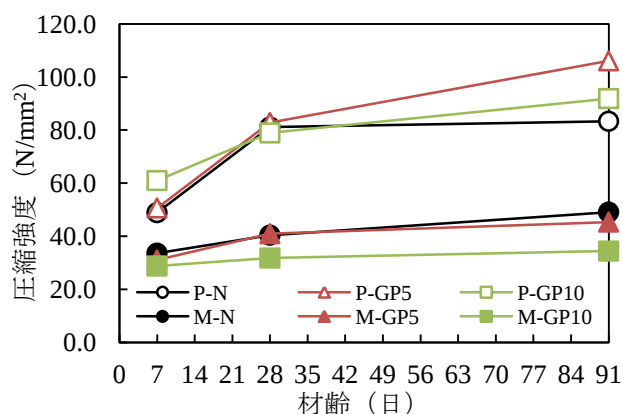


図-2 圧縮強度

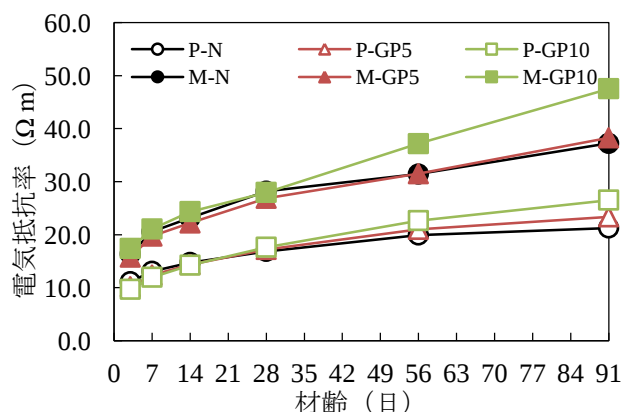


図-3 電気抵抗率

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），平成 28 年 3 月
- 2) 環境省：太陽光発電施設のリユース・リサイクル・適正処分に関する報告書，平成 26 年 6 月
- 3) 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，土木学会東北支部技術研究発表会（平成 28 年度）
- 4) Michael Kutschera et al : Nano-optimized Construction Materials by Nano-seeding and Crystallization Control, Nano-technology in Civil Infrastructure, pp.175-205,2011