

1. 背景及び目的

CO₂ 排出量が多い産業の 1 つとして、セメント産業が挙げられ、地球温暖化を緩和するためにセメント産業における CO₂ 排出量を削減することは必須である。そこで、ポルトランドセメントの代替材料としてジオポリマー(GP)セメントが、近年注目を集めている。GP セメントを使用した GP コンクリートは、フライアッシュ(FA)と高炉スラグ微粉末(BFS)を用い、アルカリ活性化剤を NaOH・水ガラスとして、高温養生にて作製するのが一般的である。本研究では GP をより「低炭素排出」「低コスト」「簡便な方法」で作製するため、アルカリ活性化剤としてメタケイ酸ナトリウム九水和物(Na₂SiO₃・9H₂O, 以下 SS とする)のみを用い、常温封緘養生を採用した GP を対象に実験的検討を行う。

2. アルカリ濃度が GP モルタルの性能に及ぼす影響に関する実験

(1) 実験概要

配合における総水量(W)とアルカリ成分(A)の比(A/W)として表したものは GP の圧縮強度や曲げ強度等の力学性能に与える影響が大きいとして重視される。そこで、W を加水量と SS 内の結晶水量の和、A を Na₂O に相当するとして、A/W 比を変化させた GP モルタル供試体に対して曲げ試験及び圧縮試験を実施した。

(2) 配合及び供試体作製

本実験では、SS 濃度の供試体強度への影響を評価するため、SS 濃度のみを変化させた 8 種類の供試体を作製した。具体的には、A/W 比を 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16%とした。その他のパラメータとして、水/バインダー比(W/FA+BFS)=50%, 高炉スラグ置換率=60%, バインダー/細骨材比=40%と一定値に固定した。

本実験では、SS が全て溶解しなくても、水と接触させることで結晶水部分が解放され自由水となり、溶媒の水と同様の挙動を示すと仮定したため、水/バインダ

ー比の水は自由水と加水の和である総水量とした。

決定した配合で練混ぜ、鋼製三連型枠(4×4×16cm)に詰め、20°C 60%RH の恒温室内で常温封緘養生を行った。

(3) 実験結果

フロー試験の結果を表-1 に示す。A/W 比 4%と 16%ではフロー値に約 2 倍の差が生じた。本実験では、総水量を一定にしたため、フロー値は総水量でなく、自由水以外の加水量と相関関係にあることが推測される。

アルカリ濃度と強度の関係を図-1、図-2 に示す。平均値の推移を表し、標準偏差を用いてばらつきを示した。グラフの通り、圧縮強度・曲げ強度ともに材齢によらず、アルカリ濃度 8%を境に強度の増加が緩やかになる傾向が確認できる。SS の溶解度予備実験では、約 5%で飽和状態となったため、そのあたりで変化が見られると予想したが異なる結果となった。これは、硬化の過程でアルカリ成分が消費され、その分新たにアルカリ成分が溶解し、さらなる硬化に関与するといった反応の進行により、最終的に 8%のアルカリ成分までが反応し、それ以上は余剰成分となったためであると考えられる。また、このような硬化反応と溶解反応の進行具合が影響することで、8%以上の範囲では供試体毎のばらつきが大きくなったと考えられる。

表-1 フロー試験結果

アルカリ濃度[%]		16	14	12	10	8	6	5	4
フロー	0打	104	123	152	192	222	235	239	236
値[mm]	15打	119	171	192	227	251	262	265	261

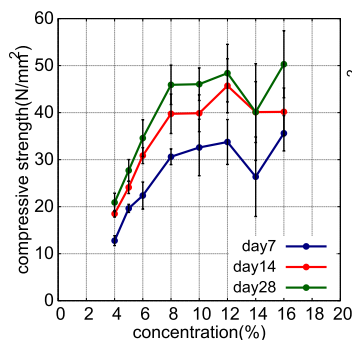


図-1 アルカリ濃度と圧縮強度の関係

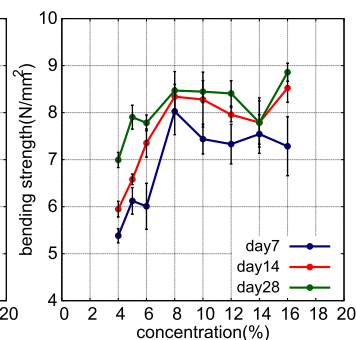


図-2 アルカリ濃度と曲げ強度の関係

材齢 28 日における圧縮強度とアルカリ濃度の関係を濃度 4%~8%の範囲で線形近似することで、 $f_c' = 6.24x - 3.61$ (f_c' : 圧縮強度, x : アルカリ濃度) という関係式を求めた。恩田ら¹⁾は養生温度 20°C で $f_c' = 6.752x - 72.709$ という関係式を導いている。本研究と比較すると、アルカリ濃度の検討範囲が異なるため、 y 切片は大きく異なるが、傾きは同程度の値となった。

3. GP コンクリートの力学的性質に関する実験

(1) 実験概要

SS のみを用いた GP コンクリートは材料特性・力学的性質に関するデータが乏しい。そこで本実験では、まず施工性の評価として水/バインダー比を変化させた数種類の配合でスランブ試験を行い、適当なワーカビリティを有する配合を決定した。さらに、その配合で供試体を作製し、圧縮試験及び割裂引張試験を行った。

(2) スランブ試験による配合決定及び供試体作製

スランブ試験を行った配合を表-2 に示す。単位水量を変えることで、水/バインダー比を変化させた配合でスランブ値を測定した。ワーカビリティの判断には高流動 OPC コンクリートの標準的な値である 12cm~18cm を基準として用い、同程度の値を有する配合を選出した。また、BFS 置換率が供試体の性能に与える影響を評価するために、BFS 置換率 30%、60% から 1 種類ずつ選出した。選出した配合で練り混ぜを行い、 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ のモールド缶に詰め、20°C 60%RH の恒温室内で常温封緘養生を行った。

(3) 実験結果

図-3 から図-5 に材齢毎の圧縮強度と圧縮ひずみの関係を示す。BFS 置換率 30% より 60% の方が強度発現が早く、材齢 28 日時点での強度が高くなることが確認できる。これは、BFS から C-S-A-H が生成する方が、FA から N-A-S-H が生成するよりも反応速度が速いことが原因であると考えられる。

引張強度/圧縮強度比(応力比)・ヤング率・ポアソン比を表-2 に示す。OPC コンクリートの一般的な値は、応力比 0.103~0.137, ヤング率 $2.0 \times 10^4 \sim 3.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, ポアソン比 0.2 であることから、本実験で作製した GP コンクリートは応力比・ヤング率・ポアソン比に関して、OPC コンクリートと概ね差異がないことが分かった。

4. まとめ

- 1) フロー値には総水量ではなく、加水量が影響する。
- 2) SS の飽和状態よりも少し高い濃度まで、アルカリ濃度に比例して圧縮強度が増加する。また、アルカリ濃度と圧縮強度の関係式として、 $f_c' = 6.24x - 3.61$ を導いた。
- 3) SS のみ用いた GP コンクリートが 30N/mm^2 の強度を有することを確認し、その力学的性質に関して一定の知見を得た。

謝辞: 本研究は、JSCE361 小委員会からの提供材料により行った。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 恩田陽介, 佐々木亘, 谷口秀明: ジオポリマーの研究動向の調査と基礎実験結果-アルカリ水比がジオポリマーモルタルの圧縮強度に与える影響-, 三井住友建設技術研究開発報告第 14 号, No.8, pp.55-62, 2016.

表-2 スランブ試験の配合

練り混ぜ方法	BFS 置換率	単位量[g/L]						スランブ値[cm]
		W	SS	FA	BFS	S	G	
湿式	30%	146	63	244	104	905	905	測定不能
		146	63	244	104	905	905	23.0
		141	61	244	104	905	905	22.8
		130	55.7	244	104	905	905	19.6
		125	53.6	244	104	905	905	18.8
		120	51.4	244	104	905	905	8.7
		110	47.1	244	104	905	905	0
	60%	141	61	139	209	905	905	21.0
		130	55.7	139	209	905	905	16.8
		125	53.6	139	209	905	905	15.1
		120	51.4	139	209	905	905	2.9

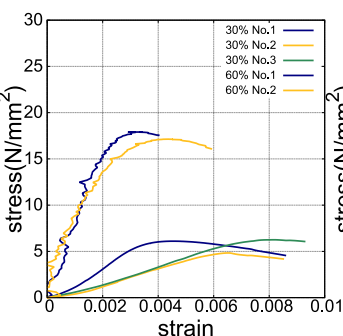


図-3 応力ひずみ関係(7 日)

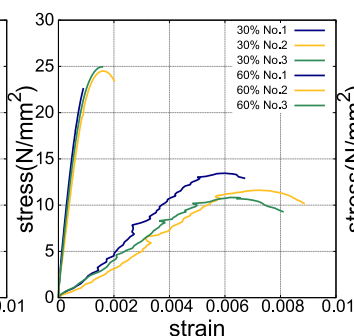


図-4 応力ひずみ関係(14 日)

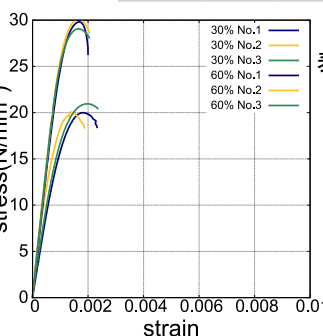


図-5 応力ひずみ関係(28 日)

表-3 応力比・ヤング率・ポアソン比

BFS 置換率	材齢 [日]	応力比	ヤング率 [N/mm²]	ポアソン比
30%	7	0.123	706.51	0.013
	14	0.137	1965.6	
	28	0.103	20780	
60%	7	0.117	5931.8	0.008
	14	0.122	28867	0.219
	28	0.117	31224	0.200