

アルカリ/水比がジオポリマーモルタルの性能に及ぼす影響

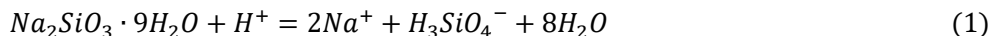
京都大学工学部 学生員 ○篠原 弘充

京都大学大学院工学研究科 正会員 安 琳

京都大学大学院工学研究科 正会員 高橋 良和

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、活性フィラーにフライアッシュ(FA)と高炉スラグ微粉末(BFS)、アルカリ活性化剤にNaOHと水ガラスを用い、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。SSは実際には、Na₂SiO₂(OH)₂・8H₂Oの形で存在しており、水に溶解すると式(1)のような反応を示すと報告されている²⁾。



2. 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)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。そこで本実験では、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。

3. 配合及び供試体作製

本実験では、A/W比の供試体強度への影響を評価するため、A/W比のみを変化させた8種類の供試体を作製した。具体的には、A/W比=4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16%とした。表-1に配合の詳細を示す。その他のパラメータとしては、水/バインダー比(W/FA+BFS)=50%, BFS置換率=60%, バインダー/細骨材比=40%, 加水量とSS内に含まれる結晶水量の和である総水量=272g/Lと一定値に固定した。

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。

4. 実験結果及び考察

フロー試験の結果を表-2に示す。A/W比4%と16%ではフロー値に2倍以上の差が生じた。本実験では、総水量を一定にしたため、フロー値は総水量

表-1 供試体作製に用いた配合

A/W比 [%]	単位量[g/L]					
	付加水	九水和物	FA	BFS	細骨材	総水量
16	147.8	212.3	217.6	326.4	1360.0	272.0
14	163.3	185.7	217.5	326.3	1359.6	271.9
12	178.9	159.3	217.7	326.6	1360.7	272.1
10	194.6	132.8	217.8	326.7	1361.2	272.2
8	210.0	106.2	217.7	326.6	1360.7	272.1
6	225.7	79.7	217.8	326.8	1361.5	272.3
5	233.6	66.5	218.0	326.9	1362.2	272.4
4	241.3	53.2	217.9	326.9	1362.0	272.4

表-2 フロー試験結果

A/W比[%]	16	14	12	10	8	6	5	4	
フロー 値[mm]	0打	104	123	152	192	222	235	239	236
	15打	119	171	192	227	251	262	265	261

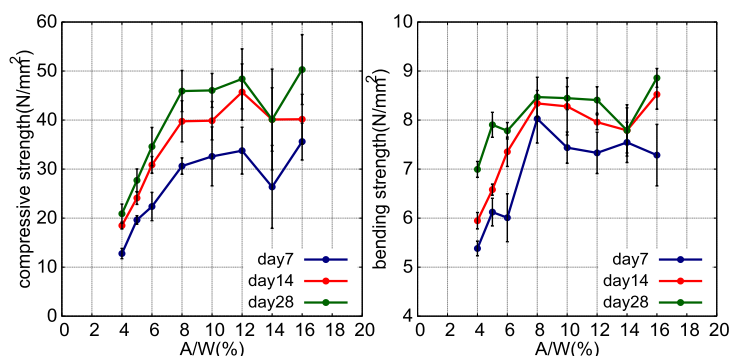


図-1 A/W比と圧縮強度の関係

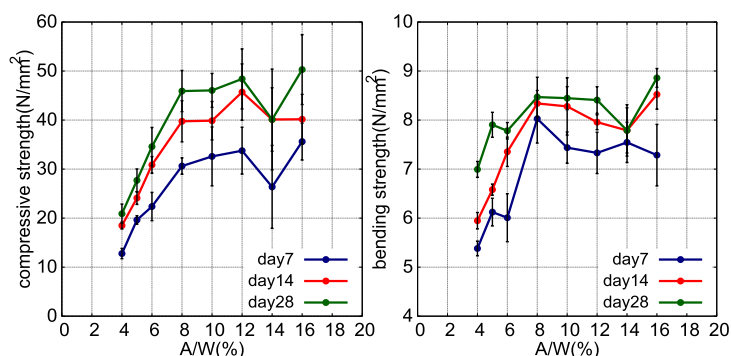


図-2 A/W比と曲げ強度の関係

キーワード ジオポリマー、メタケイ酸ナトリウム九水和物、材料力学的性質、A/W比、圧縮強度、曲げ強度
連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂CクラスターC1-2号棟147号室 TEL075-383-3244

よりも、結晶水以外の加水量と相関が大きい結果となった。

A/W 比と強度の関係を図-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。グラフから、圧縮強度・曲げ強度ともに材齢によらず、A/W 比 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、GP の硬化過程でアルカリ成分が消費され、不飽和状態となり、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が進行した。その結果、最終的に 8%分のアルカリ成分が反応し、それ以上は余剰成分となったと考えられる。また、このように硬化反応と溶解反応が同時に進行することで、その進行具合が影響し、A/W 比 8%以上では供試体毎のばらつきが大きくなったと考えられる。

材齢 28 日における A/W 比と圧縮強度の関係を A/W 比 4%から 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 : A/W 比) という関係式を求めた。恩田ら³⁾は養生温度 20°C で $f_c' = 6.752x - 72.709$ (f_c' : 圧縮強度, x : A/W 比) という関係式を導いている。本研究と比較すると、使用材料が異なるため、A/W 比の検討範囲が異なり、y 切片には大きな差異が見られたが、傾きは同程度の値となった。

5. 課題

本実験では、簡単のために結晶水は水と接触すると忽ちすべて解放されるものと仮定した。しかし、実際の反応はそれほど単純なものではない。ここでは、反応機構について明確にすることはしないが、工学的に重要であると考えられる要素について記述する。実務において重要となるのは、打設時のワーカビリティと最終的な強度である。まず、ワーカビリティについては、総水量よりも加水量との相関が大きい結果となった。しかし、理論上は加水量と結晶水から解放された自由水量の和がワーカビリティに影響すると考えられる。つまり、打設時点で、どの程度の結晶水が解放されたかの指標として、SS の溶解速度が必要であると考えられる。次に、最終的な強度についてである。上述したように、A/W 比 8%のあたりを境に強度増加が緩やかになったことから、強度測定時点で 8%分のアルカリが溶解し、それ以上は溶け残ったと考えられる。それに応じて結晶水も溶け残っており、反応に寄与する総水量は想定より少なくなった可能性がある。結晶水から解放される自由水は、溶解した SS 量に依存する。つまり、最終的な SS の溶解量の定量的な評価が必要である。しかし、GP コンクリート内における SS の溶解反応は FA や BFS 由来の Si, Al, Ca などの影響で純粋な水の中での反応とは異なることや、硬化反応と溶解反応の進行は相互に影響を及ぼし合うことなどから、現時点では SS の溶解量を定量的に評価することは困難であると考えられる。

6. まとめ

- 1) フロー値には総水量よりも、加水量との相関が大きい。そのため、今後は SS の溶解度を定量的に理解することや、SS の溶解速度を理解することなどを通して、GP コンクリート内における結晶水の反応や挙動を明確にする必要がある。
- 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。この関係式は GP モルタルにおけるものであり、今後は GP コンクリートにおける関係式を導くことが必要である。

謝辞：本研究は、JSCE361 小委員会からの提供材料を用いて行った。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) A.F.Wells, Structural Inorganic Chemistry, Clarendon Press, 1984.
- 2) Yan Zeng, Zhibao Li, and George P. Demopoulos: Determination and Modeling of the Solubility of $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ in the NaCl-KCl- H_2O System, Journal of Chemical & Engineering Data, Vol.59, pp.1264-1272, 2014.
- 3) 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.