

分級したフライアッシュを混和したセメントペーストの相組成とその圧縮強度

電力中央研究所

正会員 ○大塚 拓

電力中央研究所

フェロー会員

松村卓郎

1. はじめに

コンクリート材料における混和材の有効利用のニーズの高まりに鑑み、混和材の品質変動に対応できる設計手法を構築することが合理的な可能性がある。本研究では、混和材としてフライアッシュ(以下、FA)を対象とし、セメントの水和反応や混和材の化学反応により形成される組織の構造が硬化体の性能を決定するという認識に基づき、FA を混和したセメントペーストの相組成と圧縮強度との関係について検討を加えた。

2. 実験概要

原料として研究用ポルトランドセメント、FA(原粉および原粉を質量で半分程度に分かれるよう気流分級した細粉、粗粉)を使用した。表 1 に原料の諸元を示す。また、ブリージングの低減のため増粘剤を用いた。配合については、図 1 の黒点に示すように、JIS A6201(コンクリート用 FA)に規定される試験モルタルの配合を参考に、細骨材を除いた体積割合で考慮し、水粉体比:140(vol%)、粉体中の FA の割合:30(vol%)を中心として、これらを変化させた全 4 種類の配合とした。以下、配合の略称として F30-W140(FA の割合 30(vol%)、水粉体比 140(vol%))のように表記する。原料を所定の配合により混合、縦型ミキサーで 3 分間練混ぜ、直径 50(mm)×高さ 100(mm)の円柱型枠(圧縮強度試験用)、あるいは 50ml 遠沈管(相組成等分析用)の中に振動を与えながら流し込んだ後、20℃で 3、7、28 日間の湿空養生をした。

圧縮強度は、所定の材齢で脱型し表面を研磨した後、同一配合について 3 本の試験を行い、その平均値とした。相組成分析の試験体については、所定の材齢となった後に粗砕して、アセトンにより水和停止を行い、アセトン揮発後に 20℃RH11%の条件で恒量になるまで乾燥させた。FA の反応率を、2(mol/l)の塩酸と 5(mass%)の炭酸ナトリウム水溶液を用いた選択溶解法[1]により求めた。結晶相(C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , エトリンガイト(Aft), モノサルフェート(AFm), $Ca(OH)_2$, $\alpha-Al_2O_3$ (内部標準物質として 10mass%混合))の定量を、解析ソフトとして Rietan-FP[2]を用いた粉末 XRD/Rietveld 解析により行った。非晶質の水和物については丸山らの方法[3]を参考に物質収支を考慮し、結晶相になっていない Al, Fe は C-A-H(C_4AH_{13}), C-F-H(C_4FH_{13})になったものと仮定した。

3. 実験結果および考察

図 2 に各配合における FA の反応率を示す。FA の割合が少ない、水粉体比が大きい、あるいは FA が細かいほど同じ材齢では反応率が大きい傾向にあった。図 3 に材齢 28 日における各配合の相組成を示す。なお、配合における原料の体積の総和を 100%としている。いずれの配合においても反応に伴って体積が数%減少していることが分かる。

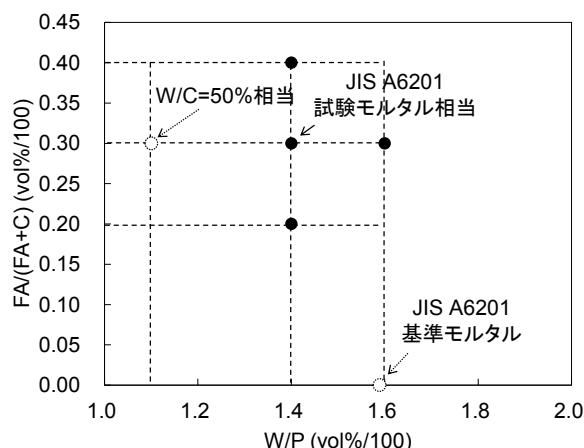


図 1 試験体の配合

表 1 試験体作製用原料の諸元

原料	化学組成(mass%)									密度 g/cm ³
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	ig.loss	
研究用ポルトランドセメント	21.28	65.36	5.09	3.15	1.01	0.32	0.41	2.01	0.84	3.16
FA(原粉)	47.38	3.22	22.18	9.74	0.68	N.D.	0.78	0.34	2.84	2.33
FA(細粉)	48.88	3.49	23.24	8.20	0.70	N.D.	0.81	0.30	3.09	2.44
FA(粗粉)	44.03	3.20	19.70	12.12	0.63	N.D.	0.74	0.16	2.23	2.22

キーワード フライアッシュ, 分級, 相組成, 圧縮強度, 反応率, ペースト

連絡先

〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 電力中央研究所 地球工学研究所 TEL04-7182-1181

同一の FA(原粉)を用いた場合, FA の割合が大きいほど全体積に占める空隙率(H_2O)が少ないことが分かる. これは, 未反応の FA が多く残存するよりも, セメントの水和反応により生成する C-S-H 等の非晶質の水和物が空隙を満たす影響が大きく表れたものと言える. 一方, 同一配合で FA が異なる場合では, 原粉・粗粉ではほとんど差がないが, 細粉では FA 反応率が材齢 28 日で 11%程度と高くなっている影響で, C-A-H, C-F-H が多くなり空隙量は減少している.

図 4 に各配合における圧縮強度の経時変化を示す. 水粉体比が同じであれば FA の割合が小さいほど圧縮強度は高くなっており, FA の割合が同じであれば水粉体比が小さい場合に圧縮強度が高くなっている. この結果は従来の多くの結果と一致するものであり, 空隙率(E.Ryshkewitch)やゲル空隙比(T.C.Powers)と関連付けて多くの考察がなされている. そこで, これらの指標について検討したところ, 空隙率と圧縮強度との関係が特に強かったため, これを図 5 に示した.

同一配合で FA が異なる場合には, 図 2, 図 3 に示したように FA が細かい方が FA の反応率は高く, 空隙率が小さいため, 図 5 に基づき圧縮強度が高くなることが予想される. しかしながら, 実際には図 4 に示す通り, FA が異なっても圧縮強度にほとんど差はなく, むしろ細粉では材齢 28 日で, 原粉・粗粉に比べ圧縮強度が小さい結果となった. この結果は, FA の密度が異なっても体積により配合を調整することで, 圧縮強度への影響を抑えられる可能性を示すものであるが, その理由については空隙率だけでなく空隙構造や水和物の特性の変化も含め, さらなる検討が必要である.

4. まとめ

気流分級した FA(細粉・粗粉)あるいは, その原粉を混和したセメントペーストについて, 材齢 28 日までの相組成と圧縮強度との関係を整理し, 相組成から推定される空隙率により圧縮強度を概ね予測できることを明らかにした. また, 体積により配合を調整することで FA の圧縮強度への影響を抑えられる可能性があることを示した.

参考文献

- [1] 大沢栄也,ほか:フライアッシュ-セメント系水和におけるフライアッシュの反応率, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.96-101, 1999.
- [2] 中井泉, 泉富士夫:粉末 X 線解析の実際 第2版, 朝倉書店, 2009.
- [3] 丸山一平ほか:エーライトおよびビーライトの水和反応速度に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, pp.681-688, 2010.

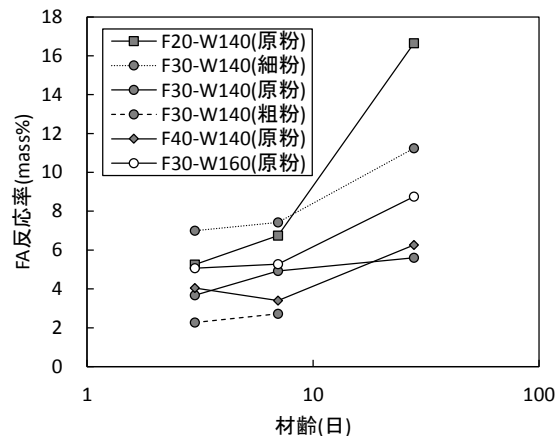


図2 フライアッシュの反応率の経時変化

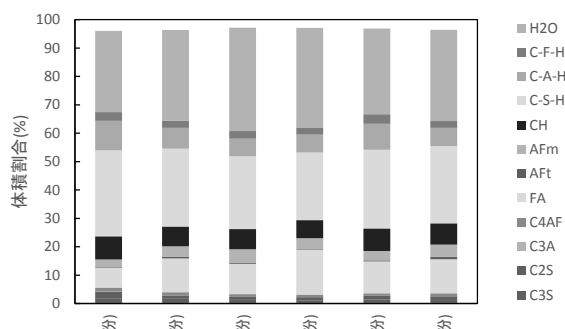


図3 材齢 28 日における相組成

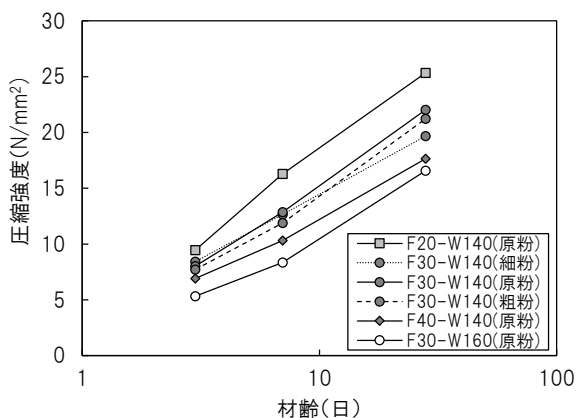


図4 圧縮強度の経時変化

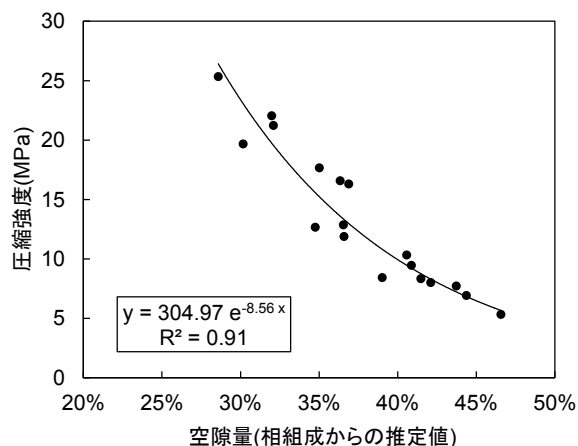


図5 相組成に基づく推定空隙量と圧縮強度の関係