

# 論文 フライアッシュを細骨材代替に用いたモルタルの配合に関する基礎的研究

松尾栄治\*1・縫部慎治\*2・浜田純夫\*3・斉藤 直\*4

**要旨:** 石炭火力発電において発生する石炭灰は、今後急激な増加が予測される。また、海砂の採取に関する規制や海砂の枯渇が予測され、海砂に代わる細骨材の代替材の開発が考えられている。本研究はフライアッシュ（以下、FAと略す）を細骨材の代替材として混合するものである。FAを細骨材代替として配合設計する場合、細骨材は表乾状態が前提であるが、FAにはその概念がなく、多量に使用する際に問題となる。本研究では水量を分割した考え方をを用いた配合設計手法を考案した。

**キーワード:** 擬似表乾状態, 加水率, FA 置換率, 圧縮強度, フロー値

## 1. まえがき

石炭火力発電所において発生するFAの量は、全国規模では現状の年間720万トンから2,000年には、1,000万トン程度に伸びると予想されている。今後FAの埋立処分地の確保が困難となることは明白であり、処分費の高騰も予想される。自然環境への悪影響を抑制する目的でも、FAの有効利用技術の開発は重要な課題となっている。

また近年、海砂に代わる細骨材の開発の必要性が極めて大きくなっている。

そこで本研究では、FAを細骨材の代替材として多量に混合することを目標とした。

真砂土やFAのような微粒分を多く含んだ材料をコンクリートに混入する場合、微粒分が吸水したり、吸水作用がない材料でも微粒子表面に水分が吸着し、見かけ上吸水してしまう。このことに影響を受け硬練りとなり、単位水量の増加が必要となる。そのため所要の強度を保つためには、それに応じた単位セメント量の増加が必要となり、コストが高くなることが問題となる。

しかし施工性を保つために増加させた水量は、

その全てが強度低下に影響するのではなく、一部は微粒子表面に吸着し水和反応には寄与しないと考えられ、その割合を定量化することはセメントの増加量の抑制につながる。本研究は、FA混入に伴う最適加水量を、施工性および強度面から明らかにするものである。このときの加水後のFAを擬似表乾状態と仮定し、その値によって配合計算を行った。

本研究を行うにあたって、目標スランプ値が8cmのコンクリートの細骨材をFAへ0,20,40%（容積比）置き換えた配合でスランプ試験を行った。さらにこれから粗骨材を除いたものでモルタル

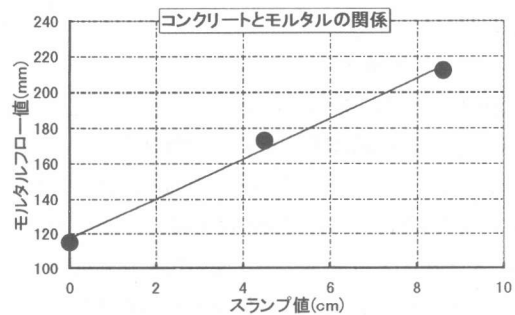


図-1 スランプ値とモルタルフロー値の関係

\*1 山口大学助手 工学部社会建設工学科, 工博 (正会員)

\*2 (株)フジタ

\*3 山口大学教授 工学部社会建設工学科, Ph.D. (正会員)

\*4 中国電力(株)土木部

ルフロー試験を行い、図-1 に示すように、スランプとフローの間の相関を確認し、配合設計を簡便化するためにモルタルによる検討を行った。

## 2. 配合設計の考え方

一般に配合設計を行う場合、細骨材は表乾状態とされている。しかし FA 自体に吸水性はなく、表乾状態を定めることはできない。すなわち FA は絶乾状態と考えられ、この点が海砂と大きく異なる点である。

そこで本研究では、FA にあらかじめ水 ( $W_2$ ) を加えこれを擬似表乾状態と仮定した。この擬似

表乾状態のモデル図を図-2 に示す。この仮定における FA と水の比率は、これらを混合して振動締固め<sup>2),3)</sup>を行い、流動化を確認したときを中心とした。流動化が起こる最小水量は、FA の単体 100g に対しては、水を 28g 加えたときであったため、モルタルにおいてもこの値を配合要因の中心水準とした。その際、FA の重量に対して何パーセントの水を加えたかを加水率 ( $W_{add}$  : %) と定義した。

ここでの定量化モデル例を図-3 に示す。ある配合で FA 置換率を 0,20,40% と変化させたとする。一般的なコンクリートの  $C/W$  と圧縮強度の関係をライン 1 に示すが、 $W_2$  を用いない場合、長期的に FA を置換するほどポゾラン反応により強度は上昇するが、同時に施工性が低下し実用範囲でなくなる。そこで実際に  $W_2$  を用いた場合、ライン 1 ~ 3 のようになる。

このとき圧縮強度で導かれる直線がライン 1 と重なる場合、 $W_2$  は全てが強度に関する水となり、ライン 1 よりも上にある場合、 $W_2$  は強度に関するが、全てが影響しているわけではないことにな

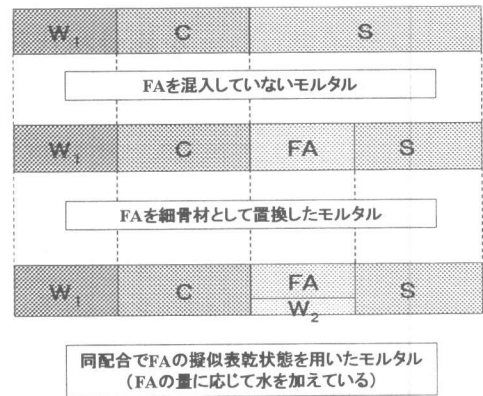


図-2 擬似表乾状態モデル図

### ある配合でFA置換率を変化させた場合

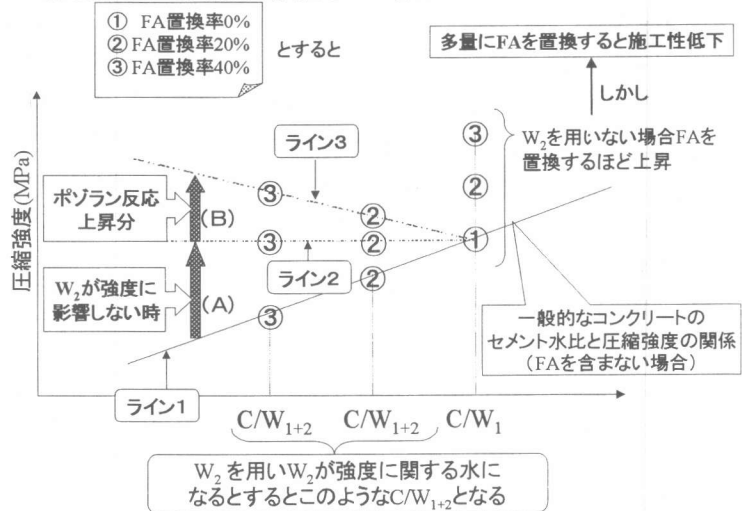


図-3 配合設計モデル図

る。また  $W_2$  が最適であれば、すなわち強度に与える影響がない場合、図のように x 軸に平行なライン 2 となる。さらに長期においては、FA のポゾラン反応による強度上昇分高くなり、ライン 3 のようになると考えられる。しかしながらポゾラン反応の影響が発現すると、図-3 における強度増加量 (A) と (B) の境界が判別できないため、初期材齢においてのみ検討することとした。なお本研究ではワーカビリティの評価をフロー値によって行うものであり、ワーカブルな状態をフロー値で 200mm 前後と考慮検討を行った。

### 3. 実験方法

#### 3.1 使用材料

本研究で使用した FA の物理的性状を表-1 に示すが、JIS 品質規格のⅡ種に相当する。セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材は海砂（表乾比重 2.60）を使用した。

表-1 使用した FA の物理的性状

試験の対象	結果	JIS品質規格			
		I種	Ⅱ種	Ⅲ種	Ⅳ種
湿分(%)	0.1	1.0以上			
強熱減量(%)	4.5	3.0以下	5.0以下	8.0以下	5.0以下
SiO <sub>2</sub> (%)	71.7	45.0以上			
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.12	1.95以上			
フロー値比(%)	101	105以上	95以上	85以上	75以上
粉末度	45 μmふるい残分(%)	21			
	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	3120			
活性度指数	28日(%)	90以上		80以上	
	91日(%)	100以上		90以上	

表-2 配合表

シリーズ	配合	W <sub>add</sub> (%)	W/C (%)	FA置換率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					フロー値 (mm)	全単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント水比
					W <sub>1</sub>	C	S	FA	W <sub>2</sub>			
I	I-①	28	45	0	400	889	814	0	0	216	400	2.22
	I-②			20			651	83	23	215	423	2.10
	I-③			40			489	166	47	205	447	1.99
	I-④			60			326	250	70	212	470	1.89
	I-⑤			80			163	333	93	204	493	1.80
	I-⑥			100			0	416	117	206	517	1.72
II	II-①	0	50	0	444	889	699	0	0	249	444	2.00
	II-②		55	0	489		584	0	0	266	489	1.82
	II-③		60	0	533		468	0	0	—	533	1.67
III	III-①	0	45	20	400	889	651	133	0	197	400	2.22
	III-②			40			489	266	0	173	400	2.22
	III-③			60			326	398	0	152	400	2.22
	III-④			80			163	531	0	128	400	2.22
IV	IV-①	25	45	20	400	889	651	85	21	213	421	2.11
	IV-②			40			489	170	43	211	443	2.01
	IV-③			60			326	256	64	207	464	1.92
	IV-④			80			163	341	85	196	485	1.83
	IV-⑤			100			0	426	107	197	507	1.75
V	V-①	31	45	20	400	889	651	81	25	221	425	2.09
	V-②			40			489	163	50	215	450	1.98
	V-③			60			326	244	76	212	476	1.87
	V-④			80			163	325	101	207	501	1.77
	V-⑤			100			0	407	127	202	527	1.69

#### 3.2 配合

配合を表-2 に示す。シリーズ I の基準配合は単位水量を 400kg/m<sup>3</sup>、W/C=45%とした。この基準配合に対して、FA 置換率を 0~100%（海砂の容積比）の範囲で変化させた。また FA への加水率は 28%と一定にした。

シリーズ II は、単位セメント量を一定として、FA 置換率 0%において W/C を変化させた。

シリーズ III~V は、W<sub>add</sub>=0,25,31%と変化させたものである。

#### 3.3 供試体

供試体のサイズは 4×4×16cm の角柱であり、

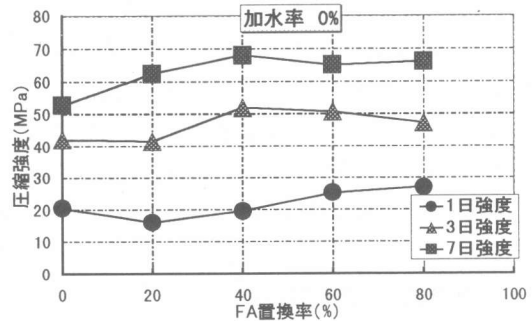


図-4 FA 置換率と圧縮強度の関係

1回の試験につき曲げ強度を3本平均、  
 圧縮強度を6本平均で求めた。材齢は  
 1,3,7日であり、打設から24時間後に  
 脱型し、養生方法は水中養生とした。

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 加水しない場合の強度性状

$W_{add}=0\%$ としたときのFA置換率と  
 圧縮強度の関係を図-4に示す。材齢が  
 経過するにつれてFA置換率40%程度  
 で強度増進が横這い傾向を示した。し  
 かし強度は向上するものの、図-5に示  
 すようにフロー値が低下し、施工性が  
 低下した。また前述のようにフロー値が100mm  
 近傍では、コンクリートのスランプが0cmとな  
 る。この状態では実際に使用するのは困難であり、  
 実用性に欠けるものとなった。

##### 4.2 FA置換率とフロー値の関係

$W_{add}$ を変化させたときのFA置換率とフロー  
 値の関係を図-5に示す。このとき表-2に記述し  
 てない、 $W_{add}=22,34\%$ とした配合についてもフ  
 ロー値を測定した。

$W_{add}=0\%$ の場合、FA置換率を大きくするにつ  
 れてフロー値は直線的に低下した。しかし、 $W_{add}$   
 $=25,28,31,34\%$ では、FA置換率が変化してもフ  
 ロー値はほぼ同じ値となった。 $W_{add}=22\%$ では、  
 FA置換率を大きくするとフロー値が低下した。  
 これらのことから、 $W_{add}$ を変化させた場合、ある  
 $W_{add}$ 以上では一定のフロー値を取るようになり、  
 その適合範囲には幅があると考えられる。本  
 研究では、 $W_{add}=25\% \sim 34\%$ の幅でフロー値はほ  
 ぼ一定となり、これが適合範囲である。 $W_{add}$ は  
 適合範囲で最も小さくなるのが望ましく、本  
 研究で使用したFAでは $W_{add}=25\%$ が最適となり、FA  
 単体において流動化が起こる最小水量より小さな  
 値となる。

##### 4.3 FA置換率と圧縮強度の関係

図-6~7にFA置換率と圧縮強度の関係を示す。  
 図-6の $W_{add}=25\%$ の強度は、材齢1日ではFA  
 置換率を大きくするほど低下しているが、材齢が  
 進むにつれてFA置換率を変化させても同程度と

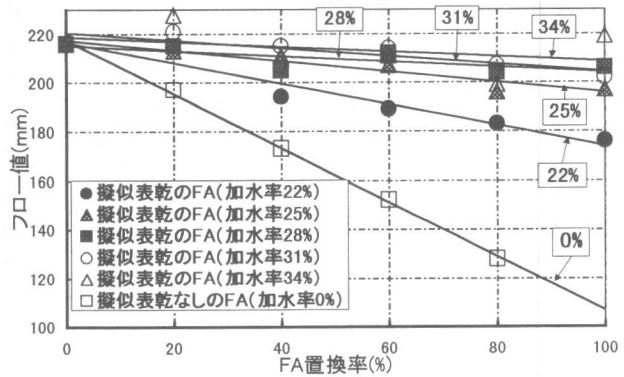


図-5 FA置換率とフロー値の関係

なった。

図-7の $W_{add}=28\%$ の強度は、材齢1日ではど  
 の配合も同程度であった。 $W_{add}=25\%$ の強度性状  
 と異なり、材齢7日ではFA置換率が高いものほ  
 ど強度が低下するようになった。 $W_{add}=31\%$ の強  
 度もこの図-7と同様に、材齢7日ではFA置換  
 率が大きくなるほど低下した。これは $W_{add}$ の上

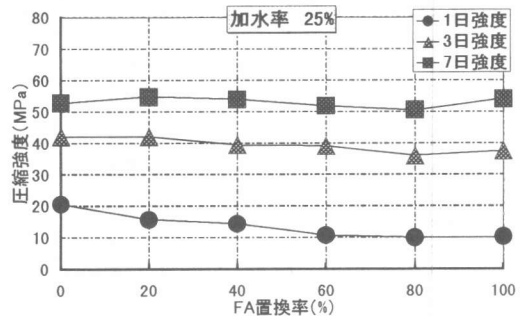


図-6 FA置換率と圧縮強度の関係

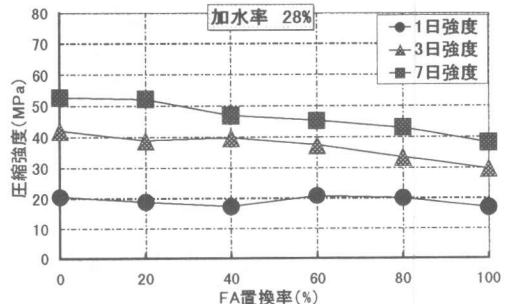


図-7 FA置換率と圧縮強度の関係

昇に伴い  $W_2$  の量が増えて、強度に影響を与えたためだと思われる。

$W_{add}$  を変化させたこれらの供試体は、材齢 1 日では  $W_2$  が増えたにもかかわらず、強度が大きくなるがあった。また材齢 1 日の強度も材齢 7 日と比べてばらついた。そのため本研究ではこれ以降材齢 7 日の強度での検討を行った。

#### 4.4 $W_2$ による影響の検討

FA の擬似表乾状態を仮定する際に加える  $W_2$  の影響について検討する。 $W_2$  を加えると、モルタル全体では単位水量が増えることになり、一部が強度に影響を与えていると思われる。そこで練混ぜ水  $W_1$  と  $W_2$  を足した全単位水量と、これとセメント量とで求まる  $C/W$  を表-2 に示す。

FA を混入し  $W_{add}$  を変化させた配合と FA を混入していない配合の  $C/W$  と圧縮強度の関係を図-8~9 に示す。

図-8 に  $W_{add}=25\%$  とした配合と、FA を混入していない配合の  $C/W$  と圧縮強度の関係を示す。 $W_{add}=25\%$  の配合の圧縮強度は、 $C/W$  が変化してもほぼ同じ値となった。

$W_{add}=28\%, 31\%$  とした供試体は、どちらも同様な強度性状であった。 $W_{add}$  はできるだけ小さい方が望ましいことから、28% の配合についての検討を行う。 $W_{add}=28\%$  とした配合と FA を混入していない配合の  $C/W$  と圧縮強度の関係を図-9 に示す。 $W_{add}=25\%$  とした配合と異なり、 $C/W$  が低下するにつれて強度が低下した。

これらの結果から考察すると、 $W_{add}=25\%$  とした供試体では、FA の表面に付着する水量を必要量補うことができたため、 $W_2$  は強度に影響を与えることが少なかった。このため FA 置換率の大小に関係なく強度がほぼ一定であった。また  $W_{add}$  を大きくした 28% の配合は、表面に吸着する量以上の水を加えたことになり、この余剰水が強度に影響を与えたものと考えられる。そのため FA 置換率を大きくするほど水量が増加し、強度が低下したといえる。

ここで  $W_{add}=28\%$  の図-9 から  $W_2$  が与える強度への影響について検討を行う。この図をもとに

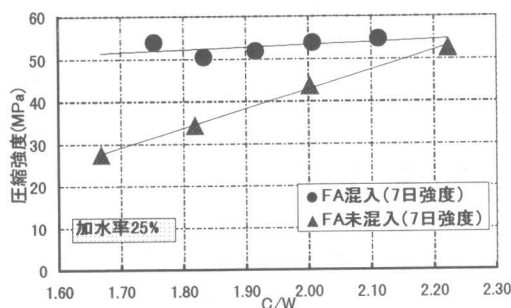


図-8 加水率 25% 時の  $C/W$  と圧縮強度の関係

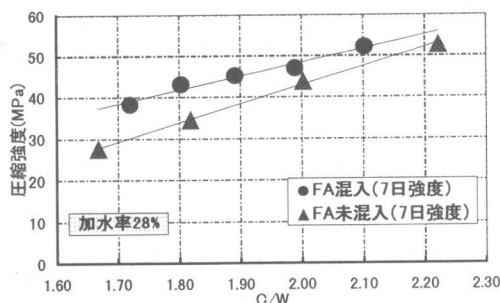


図-9 加水率 28% 時の  $C/W$  と圧縮強度の関係

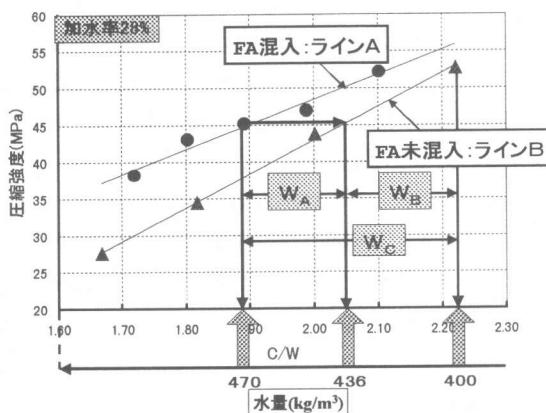


図-10 強度影響の概念図

した概念図を図-10 に示す。

図中に示すライン A での FA 置換率 60% のときを例にすると、この点での  $W_1$  と  $W_2$  を加えたものが水量  $470\text{kg/m}^3$ 、この点と同強度のライン B 上の水量が  $436\text{kg/m}^3$ 、 $400\text{kg/m}^3$  は基準配合での単位水量  $W_1$  である。図中の  $W_A$  は  $W_2$  のうちの FA への吸着水量を、 $W_B$  は強度に影響した水

量を、 $W_c$  は加水量  $W_2$  を表している。これらを用いて強度影響率 ( $R_s$ ) を式(1)で求め、 $W_2$  の強度への影響を検討した。

$$R_s = (W_B / W_c) \times 100(\%) \quad (1)$$

$W_{add} = 25, 28\%$  のときの FA 置換率と  $R_s$  の関係を図-11 に示す。 $W_{add} = 25\%$  の場合、FA 置換率 60% 以上では、 $R_s$  が 0% に近く、強度への影響はほとんどなかった。すなわちこの領域での  $W_{add}$  は、最適なものであったといえる。

一方  $W_{add} = 28\%$  では全ての配合で強度に影響を与えていた。つまりどの配合でも  $W_2$  が多すぎたということである。

また、 $W_{add} = 25, 28\%$  両配合の  $R_s$  は、FA 置換率が小さいときは小さく、大きくなるにつれて横這い傾向を示した。このことから最適な  $W_2$  は、FA 置換率に比例して増加する、つまり一定の  $W_{add}$  で求まるものではなく、FA 置換率によって  $W_{add}$  を変化させる必要があるということである。

このように  $R_s$  により、適当な  $W_{add}$  で FA 置換率を変化させたとき、どの程度  $W_2$  が強度に影響するかを定量化することができる。 $R_s$  を求めることで  $W_{add}$  が最適加水率より大きい場合も、セメントの必要増加量が明らかになる。

これまでに行った検討から  $W_{add} = 25\%$  のとき、フロー値は FA 置換率によらず実用的な範囲であり、ワーカビリティは良好であった。また強度への影響もない最適な  $W_{add}$  であると判断できる。

## 5. 結論

本研究で得られた結論を以下に要約する。

- (1) 多量に FA を混入したモルタルにおいて、ワーカビリティの評価をフロー値で行う場合、FA に加水することでワーカブルなフロー値を保つことができ、その適合範囲には幅がある。
- (2) 本研究で仮定した FA の擬似表乾状態での  $W_2$  は、適したものであれば強度に影響を与えず、細骨材代替物として FA を使用する場合に有効である。本研究では  $W_{add} = 25\%$  の時が最適な加

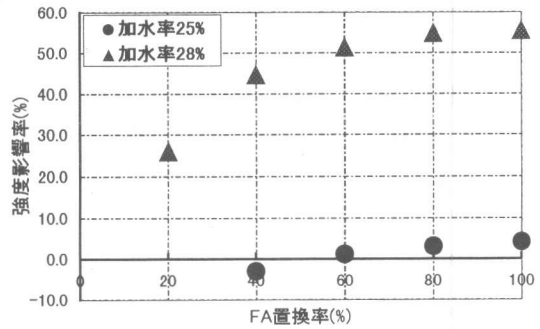


図-11 FA 置換率と強度影響率の関係

水率であった。

- (3)  $W_{add}$  が最適加水率より大きい場合も  $R_s$  を明らかにすることによってセメントの必要増加量を求めることができる。
- (4) 加水率  $W_{add}$  が一定の場合も FA 置換率によって強度影響率  $R_s$  は変化し、FA 置換率の増加に伴って大きくなる。

## 参考文献

- 1) 黄 光律, 友澤史紀, 野口貴文; フライアッシュを細骨材の代替材として使用したモルタルのレオロジー・強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, 1999
- 2) 福留和人, 坂本 守, 鈴木達雄, 長瀧重義: 石炭灰を多量に用いた新しい硬化体製造方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, 1997
- 3) 福留和人, 長瀧重義, 坂本 守, 鈴木達雄, 喜多達夫: 最適含水比近傍で練り混ぜたフライアッシュセメント混合物の振動締固め特性に関する研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.55-66, 1999.8