

論文 フライアッシュファイバーを用いた繊維補強モルタルの基礎的研究

明永 卓也^{*1}・磯 健一^{*2}

要旨：石炭灰を繊維化したフライアッシュファイバー（FAファイバー）を用いた繊維補強モルタルの基本特性について検討を行った。その結果、FAファイバー補強モルタルは高い流動性を保持し、良好な作業性を示した。また高い曲げ強度を有し、優れた繊維補強効果が確認された。さらにセメントとFAファイバーを予備混合することにより、流動性を損なうことなく多量の繊維を混入することが可能となり、曲げ強度の高強度化が達成された。

キーワード：フライアッシュファイバー、繊維補強モルタル、石炭灰、廃棄物再利用

1. はじめに

近年、石炭火力発電の見直しに伴い石炭灰の発生量は増大する傾向にある。発生する石炭灰のうち利用されているものは約60%であり、残りの40%は廃棄物として埋め立てに用いられている[1]。今後、石炭灰の発生量が増大するのに対し、処分場確保が困難になることが予想され、また「再生資源の利用の促進に関する法律（リサイクル法）」の施行に伴い、石炭灰の有効利用分野の拡大が強く望まれる。こうしたなかで石炭灰を繊維化したフライアッシュファイバー（以下FAファイバーと略す）が開発され、これがセメント系繊維補強材料として有効であるとの報告が小島らによってなされている[2]。

著者らは、環境保全および省資源の観点から、石炭灰有効利用技術の一つとして、FAファイバーをセメント系建材へ適用することを目的とし、基礎的特性の研究に取り組んできた。その結果FAファイバーは従来の補強繊維に比べて強度、耐熱性に優れており、セメントモルタル系に使用した場合に優れた補強効果を示すことが確認できた。しかし一方で、FAファイバーは綿状であるため練り混ぜの際に毛玉（ファイバーボール）を生じやすく、多量に混入した場合には均一な分散が困難になり、所要の補強効果が得られない場合があることが分かった。このため、FAファイバーを均一に混入する製造方法を検討する必要があると考えられた[3]。

本研究は、均質なFAファイバー補強モルタルの製造方法を実験的に検討した結果を述べるものである。実験では、FAファイバーの混入量と分散性の関係、および分散性を向上させるための予備混合方法などを検討した。

2. FAファイバー混入量の影響

2.1. 実験概要

ここでは、FAファイバーの混入量の限度を把握することを目的に、混入量を変化させた供試体を作製して、モルタルフロー値や曲げ強度を比較した。

2.2. 使用材料および調合

供試体の作製に使用した材料および調合を表-1、2に示す。表-2に示すように、FAファイ

*1 日本国土開発(株) 技術開発研究所 第三研究室研究員、(正会員)

*2 日本国土開発(株) 技術開発研究所 第一研究室主席研究員、(正会員)

バーの混入量は0～5%の範囲で変化させて検討した。単位細骨材量は既往の研究[4]より、結合材量に対して1:1となるように設定し、その一部をFAファイバー混入量で置換した。また、セメントの一部をシリカフュームで置換した調合で供試体を作製し、シリカフューム添加による効果も併せて検討した。

2.3. 練り混ぜおよび養生方法

練り混ぜ方法は、既往の文献[3]の方法と同様とした。すなわち、ミキサにオムニミキサを使用し、FAファイバー、セメント、砂を投入して空練りを30秒間行った後、水と混和剤

を加えて2分間練り混ぜを行った。曲げ強度試験用の供試体は、打ち込み後20℃、80% R. H. の恒温恒湿室内に12時間静置し、この後脱型して材令28日まで標準水中養生とした。

2.4. 試験方法

フレッシュモルタルについては、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に従って、モルタルフロー値を測定した。硬化モルタルについては、曲げ強度を測定した。曲げ強度試験は、幅50×厚さ20×長さ350 mmの寸法で供試体を切り出して表乾状態にした後、GRC 工業会の中央載荷試験法に従って行った。載荷スパンは300 mmとし、変化速度1 mm/minで載荷し、スパン中央部分のたわみを測定して応力～たわみ曲線を求めた。

2.5. 試験結果および考察

FAファイバー混入量とフロー値の関係を図-1に示す。同図から、混入量が増えるに従いフロー値は直線的に低下していることが分かる。しかし、混入量3%まではフロー値が200 mm以上であり、良好な流動性が確保されている。また、混入量が5%の場合でも、フロー値は150 mm程度が得られている。既往の研究[4],[5]によると、ガラス繊維や炭素繊維では約3%の混入量でフロー値が120～150 mmに低下し、これ以上混入するとワーカビリティが極度に低下して練り混ぜは困難になるとされている。このような結果から、FAファイバーの場合5%程度まで混入しても補強モルタルの製造が可能であり、他の繊維に比べて優れた流動性を持っているといえる。なお、シリカフュームを添加した場合では、フレ

表-1 使用材料

セメント C	普通ポルトランドセメント、比重3.16
シリカフューム SF	比重2.2、比表面積200,000cm ² /g
FAファイバー FA	比重2.5、繊維径12μm、繊維長10mm
細骨材 S	市原山砂、比重2.57、FM値1.42
混和剤 SP	芳香族アミノカルボン酸系高性能AE減水剤

表-2 供試体調合

記 号	W/B* (%)	SF/B (%)	纖維混入量 Vf(%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 添加量 B×(%)
				W	C	SF	FA	S	
SF0-0	30	0	0	273	910	0	0	1018	2.5
SF0-1			1				25	993	
SF0-3			3				75	941	
SF0-5			5				125	890	
SF10-0		10	0		819	91	0	993	3
SF10-2			2				50	942	
SF10-4			4				100	890	

$$*B=C+SF$$

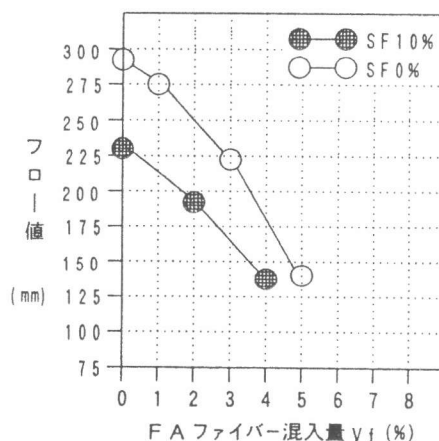


図-1 FAファイバー混入量とフロー値の関係

ッシュモルタルの粘性は高くなり、フロー値はさらに低下する傾向がみられた。

FAファイバー混入量と曲げ強度の関係を図-2に示す。同図から、FAファイバーの混入量が3%までは混入量とともに曲げ強度は直線的に増加するが、混入量が3%を超え5%となると強度の伸びはほぼ横ばいになることが分かる。混入量5%の供試体の破断面を観察したところ、FAファイバーが互いに絡み合って固まりとなるファイバーボールの発生が多少みられた。このことから、混入量5%の条件では練り混ぜ不良を生じて補強効果が小さくなったと考えられる。また、シリカフュームを添加した場合には、曲げ強度はさらに大きくなったが、FAファイバーの混入量が増加するに従い、強度の伸びは小さくなる傾向がみられた。

図-3には、各供試体の曲げ強度-たわみ曲線を示す。FAファイバーの混入量が増えるに従い曲げ強度は大きくなるものの、いずれの供試体でも、比例限界に達すると同時に破断する脆弱な性状を示していることが分かる。

以上の結果から、FAファイバーは他の繊維に比べてモルタルの流動性に及ぼす影響が小さく、5%混入しても補強モルタルの製造が可能なが分かった。しかし、従来の製造方法[3]では、混入量が5%まで達するとフロー値は、施工性がより良好な200mm程度を確保できなくなり、また、曲げ強度の伸びも小さくなった。これは、ファイバーボールが生じたことが原因と考えられる。従って、多量の使用が可能なFAファイバーの特性をさらに活かすためには、分散性をより向上させる製造方法の検討が必要であると考えられた。

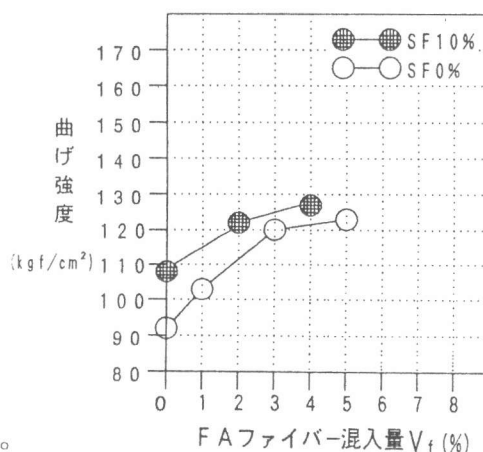


図-2 FAファイバー混入量と曲げ強度の関係

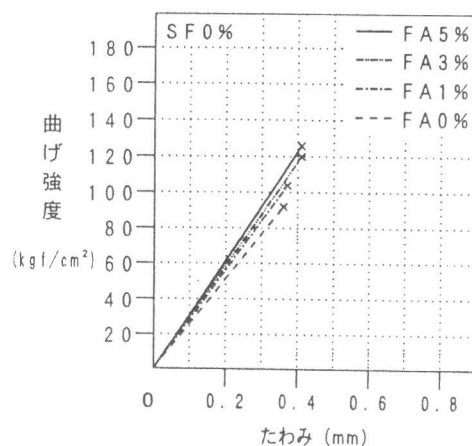


図-3 曲げ強度-たわみ曲線

3. FAファイバー分散性向上のための練り混ぜ方法の検討

3.1. 予備混合方法

これまでは、FAファイバーを均一に分散させるために、練り混ぜ機械としてオムニミキサを使用したり、FAファイバーを投入する際に手でほぐすなどしてきた。しかし、FAファイバーの分散性をさらに向上させるには、予め繊維を解繊してセメントと均質に混合しておく、予備混合が効果的であると考えられた。予備混合により、モルタルを練り混ぜる際に繊維の分散性が改善され、通常の強制練りミキサでの混練も可能になると考えられた。

ここでは、FAファイバーの予備混合を図-4に示した3種類の方法で行い、均一な分散性を得るのに最も適した予備混合の方法を検討した。図-4のA方法では、最初に前処理としてFAファイバーの解繊を行う。解繊に使用される装置には、縦型円筒の周壁に無数の凹凸があり、中心軸に衝撃柱(ピン)が放射状に取り付けられた回転盤が設置されている。この回転盤が高速(2000rpm)で回転し、FAファイバーは遠心力により周壁に衝突して強力な空気衝撃により解繊される。次いで、高速攪拌型混合機によりセメントと均一に混合するものである。B方法も同様に、前処

理として解繊を行うものであるが、解繊装置としてはスクリーフィーダーと多孔板（スクリーン）を用いる。スクリーフィーダーとスクリーンの間でFAファイバーを所定の大きさに解繊するものである。スクリーンの孔より排出されたFAファイバーは、A方法と同様に高速攪拌混合機でセメントと混合する。一方、C方法では解繊の手順は行わず、逆流式高速混合機を用いてFAファイバーとセメントの分散および混合を同時に行う。混合機は、回転する混合槽（パン）と固定の壁スクレーパーおよびパンと逆方向に高速（450rpm）で回転するアジテーターから成り、FAファイバーとセメントを分散する。そして、アジテーターの中心がパンのそれと偏心しているため、パン内を移動するFAファイバーとセメントの流れは個々にぶつかり合い、高速度で交叉して強制混合されるものである。

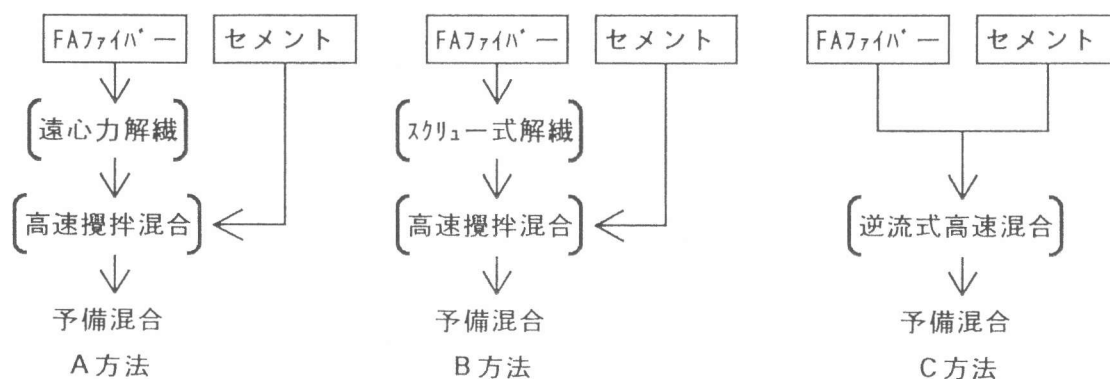


図-4 予備混合方法

3.2. 実験方法

図-4に示す方法で予備混合を行った後、表-3に示す方法でモルタルを練り混ぜ、フロー値および曲げ強度を従来の方法 [3]で練り混ぜた場合と比較した。また、モルタル中でのFAファイバーの分散状況を確認するため、フレッシュモルタル 100gを、呼び寸法 2.5mm、内径200mmのふるい上で洗い出し、残留物の中にファイバーボールがないか目視で観察した。モルタルの調合は、表-2の調合SF10-4とした。予備混合を行った条件では、練り混ぜにはパン型強制練りミキサを使用した。なお、養生方法は標準水中養生とした。

3.3. 試験結果および考察

試験結果の一覧を表-4に、練り混ぜ方法とフロー値および曲げ強度の関係を図-5に示す。分散性の判断は、上記の洗い試験を行い、ふるいの上に残ったファイバーボールの数により決定した。すなわち、

表-3 練り混ぜ方法一覧

名 称	従来方法	A方法	B方法	C方法
前処理	手で解繊	遠心力による解繊	スクルーによる解繊	な し
ﾌﾟﾚﾐｯｸｽ	な し	高速攪拌混合機		逆流式高速混合機
ﾐｷｻ	ﾓﾐﾐｷｻ	ﾊﾟﾝ型強制練りﾐｷｻ		
空練り	30秒間			
混 練	2 分間			

表-4 試験結果一覧

調 合	FAファイバー混入量 Vf = 4%, SF10%添加			
混練方法	従来方法	A方法	B方法	C方法
分散性	繊維の固まり有り		やや良好	良好
フロー値 mm	153×158	173×174	186×188	187×190
曲げ強度 kgf/cm ²	127	126	161	172

ファイバーボールの数が10以下であれば「良好」とし、10～20であれば「やや良好」と判断した。図-4および図-5から、いずれの方法でも予備混合を行うことによって、従来方法に比べてモルタルの流動性が向上していることが分かる。これはFAファイバーの分散性の向上効果と考えられる。しかし、洗い試験や曲げ強度試験では、予備混合方法の違いにより試験結果に差がみられた。

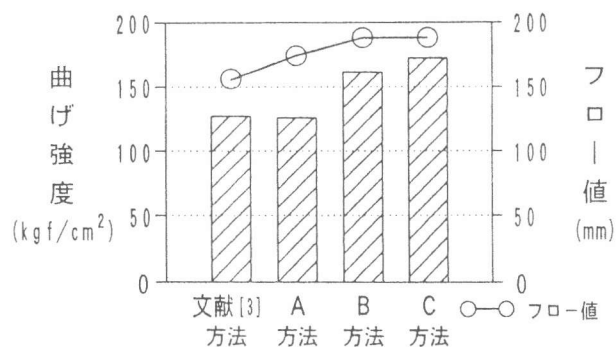


図-5 練り混ぜ方法とフロー値および曲げ強度の関係

A方法の予備混合では、モルタルのフロー値は大きくなったが、洗い出しを行ってみると繊維が絡み合って固まりとなったファイバーボールが多数生じているのが観察された。すなわち、FAファイバーの分散性は、従来方法と比べてあまり改善されているようにはみられなかった。曲げ強度についても同様であり、強度の伸びは見られなかった。これは、FAファイバーの解繊時に高速で遠心力をかけたため、FAファイバーが圧密されて小さな固まりとなってしまう、その結果セメントと混合した際、FAファイバー間にセメント粒子が十分に入り込まず、セメント硬化時に強度欠陥となったと考えられる。

B方法の予備混合では、モルタルのフロー値はさらに大きくなり、洗い試験でのファイバーボールの数は、従来方法に比べて減少しているのが確認された。また、曲げ強度も向上しており、FAファイバーの分散性が良くなったために補強効果が大きくなったことが分かる。

C方法の予備混合では、FAファイバーの分散性は最も良好となった。すなわち、洗い試験ではファイバーボールがほとんどみられず、わずかに生じた繊維の集まりの中にもセメントペーストが十分に付着しているのが確認された。また、曲げ強度は最も大きく、FAファイバーの補強効果が最大になっていることが分かる。

以上より、FAファイバーとセメントを予備混合することによって、FAファイバーの分散性を向上でき、その結果モルタルの曲げ強度も向上できることが明らかになった。また、本実験の範囲では、予備混合の方法としては図-4のC方法が最も適していると判断された。

4. 予備混合効果の検討

4.1. 実験方法

上述したように、セメントとFAファイバーの予備混合方法として、図-4のC方法が最適であると分かった。そこでFAファイバー混入量を0～5%の範囲で変化させて予備混合を行い、これを用いてモルタルを製造して、2の実験の結果と比較した。モルタルの調合は、表-2に示すものと同様とした。

4.2. 試験結果および考察

FAファイバー混入量とフロー値の関係を図-6に示す。

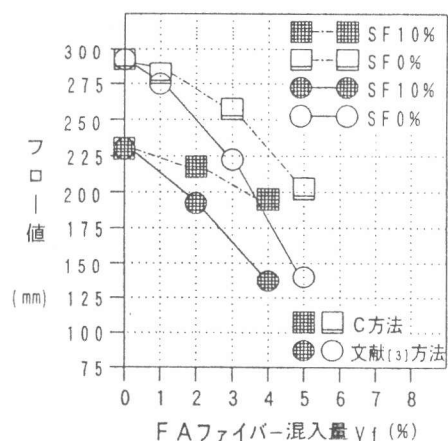


図-6 FAファイバー混入量とフロー値の関係

C方法でFAファイバーとセメントを予備混合した場合は、混入量が5%でもフロー値は200 mmと

良好な流動性を示していることが分かる。また、シリカフュームをを添加した場合でも、フレッシュモルタルの粘性は高くなる傾向にあったものの、混入量4%でフロー値は190 mmが得られた。C方法で予備混合を行うことにより、FAファイバーの混入量が多い場合でも流動性が得られる。

FAファイバー混入量と曲げ強度の関係を図-7に示す。

C方法による供試体では、シリカフューム添加の有無に関わらず、混入量が5%まで曲げ強度はほぼ直線的に増加する傾向にあることが分る。特にシリカフュームを10%添加することにより、この傾向は顕著なものとなった。これは、FAファイバーが均一に分散されたことによって、その補強効果が十分に発揮された結果と考えられる。

以上より、FAファイバーとセメントを図-4のC方法で予備混合することで、モルタル中に多量のFAファイバーを均一に分散させて混入できることが明らかになった。その結果、FAファイバー補強モルタルの流動性は、従来方法で混練した場合に比べて向上し、作業性の改善が見られた。また、曲げ強度についても大きく向上しており、FAファイバーによる補強効果を十分に発揮できる。

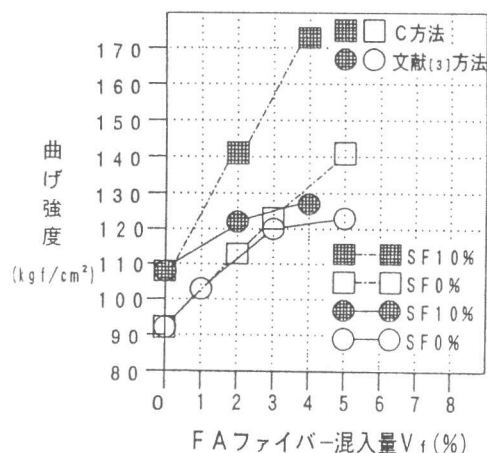


図-7 FAファイバー混入量と曲げ強度の関係

5. まとめ

本研究の結果、FAファイバー補強モルタルの特性として以下のことが明らかとなった。

- (1)FAファイバーは曲げ強度の向上に効果的であり、さらにシリカフュームの添加により曲げ強度の高強度化が可能である。
- (2)FAファイバーは、それ自身の混入量がモルタルの流動性に及ぼす影響が小さく、5%混入した場合でもオムニミキサを用いた従来方法によりモルタルの製造が可能である。
- (3)FAファイバーとセメントを図-4のC方法を用いて予備混合することによって、FAファイバーの分散性が向上でき、その結果流動性を損なうことなく多量の繊維を混入することが可能となり、さらに高い補強効果が得られる。

なお、FAファイバー補強モルタルの経年劣化による曲げ強度の変化や耐熱性等、耐久性について今後検討を行う予定である。

〈参考文献〉

- [1] 土木学会・エネルギー土木委員会編：石炭灰の土木材料としての利用技術の現状と将来展望、(社)土木学会、pp.51-55、1991年3月
- [2] 小島 昭，古川 茂，小菅匡志：フライアッシュファイバーを強化材とする耐熱・耐アルカリ高強度セメント複合材の調製、第47回セメント技術大会講演集、pp.648-651、1993年
- [3] 明永卓也，柳沢延房，磯 健一，小峰祐二：フライアッシュファイバーを用いた繊維補強モルタルの実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.447-448、1994年9月
- [4] 榎谷栄治，町田恭一，油田憲二：新GFRCの曲げ挙動及び乾燥収縮に関する基礎的実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.65-66、1988年10月
- [5] 秋濱繁幸：繊維補強コンクリート 新素材繊維を中心に、鹿島出版会、pp.33-35、117-118、123-124、1992年3月