

論文 廃FRPから回収したガラス繊維を用いた短繊維補強モルタルの曲げ特性

笠井哲郎*¹・竹中 寛*²・田草久希*³・菊本幸雄*⁴

要旨：廃FRPをモルタル・コンクリート用材料として有効利用することを目的に，廃FRPの処理において，気流粉碎機によりFRPをマトリックス部分と繊維部分に分離し，回収したガラス繊維に関し，モルタル用繊維補強材としての再利用の可能性について検討した。廃FRPから回収したガラス繊維を用いた短繊維補強モルタルは，繊維混入率の増加に伴い曲げ強度，曲げ靱性とも向上し，モルタルの曲げ特性を向上させる繊維補強材として有効利用できることが明らかとなった。

キーワード：廃棄物，廃FRP，短繊維補強モルタル，練混ぜ方法，曲げ強度

1. はじめに

現在我が国では，年間約47～48万トンの熱硬化性樹脂複合材料，同じく約23～24万トンの熱可塑性樹脂複合材料が生産され，浴槽，浴室ユニット，浄化槽，船艇，船舶，給水タンク，自動車・車両，電機部品などの生活の隅々に幅広く利用されている。一方，年間約20万トン超のFRP廃材（以下，廃FRPと称す）が産業廃棄物や一般廃棄物として排出され，環境負荷の一要因となっている。この廃FRPの再利用・再資源化の方法としては，①機械的な破碎・粉碎処理による二次原料としての再利用，②熱分解によるガス，油分および熱エネルギーの回収利用と固形残渣の再利用，に大別される。②の方法における固形残渣の比率は高く，またその再利用技術も確立していないため，ほとんどが再度廃棄物として埋め立て処分されているのが現状である¹⁾。本研究は上記①の方法に相当するもので，廃FRPを破碎・粉碎処理した二次原料（以下，廃FRP処理材と称す）をモルタル・コンクリート用の補強材として，有効利用することを目的として行ったものである。この廃FRP処理材のモルタル・コンクリ

ートへの利用に関しては，これまでいくつかの報告があり，藤原ら²⁾はせん断式破碎機により5mmフルイを通過する程度に粉碎した廃FRP処理材を普通モルタルおよび軽量モルタルに混入した例を，柳，小島ら³⁾は，廃FRPを研削方法で平均粒径18 μ m程度の微粉末とし，これをコンクリートに混入した例などがある。一方，本研究で扱う廃FRP処理材は，FRPのマトリックス部分と繊維とが分離回収されたものである。

そこで本研究では，廃FRPから分離回収した繊維材料をモルタル用繊維補強材として再利用する場合について，その練混ぜ方法と短繊維補強モルタルの曲げ特性について実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および廃FRP処理材

セメントはC社製の普通ポルトランドセメント（比重：3.16，Blaine：3380cm²/g）を，高炉スラグ微粉末は比重：2.90，Blaine：4010cm²/gを，細骨材は比重：2.59の川砂を用いた。高性能減水剤はナフタリン系のものを用いた。

*1 東海大学助教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*2 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*3 株式会社

*4 東海大学教授 工学部土木工学科（正会員）

本実験に用いた廃FRPは、ガラス繊維(23wt%)、不飽和ポリエステル樹脂(37~40wt%)、炭酸カルシウム微粉(37~40wt%)により構成されたFRP浴槽である。この廃FRPの処理工程を図-1に示す。この処理工程における二次処理時の気流粉砕機により、廃FRPのマトリックス部分と繊維部分が分離される。実験に使用した廃FRP処理材は、この図に示す処理工程の各過程において排出される一次処理材(8mm, 4mm)、二次処理材およびガラス繊維とFRP微粉末が分離回収された二次処

理分級繊維と二次処理分級微粉末の5種類である。各処理材を写真-1に示す。写真に示すように、二次処理材に含まれる繊維および二次処理分級繊維は、ほとんどが毛玉状に凝集した状態で回収される。

2.2 モルタルの配合および練混ぜ方法

モルタルの配合および練混ぜ方法は、表-1に示す通りである。ここで示した配合A~Gの練混ぜ方法は、3.1の検討結果から処理材の分散性が最も良好となる方法により行い、配合H~Iはそれに対する比較試験として行ったもの

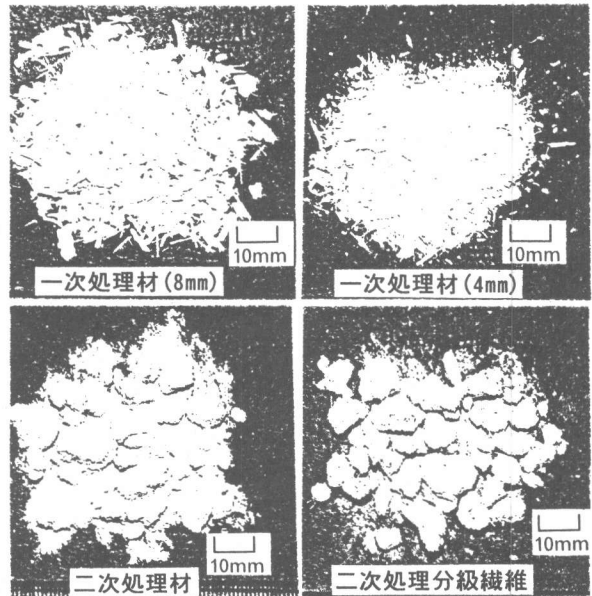


図-1 廃FRPの処理工程および処理材

写真-1 廃FRP処理材

表-1 モルタルの配合および練混ぜ方法

記号	結合材	W/P (%)	処理材の種類	S/P	処理材量 (Pwt%)	SP (Pwt%)	ミキサ	練混ぜ方法	処理材の分散性
A	C	35	二次処理分級繊維	1.5	0 ~ 15.7	0 ~ 1.87	オムニ ミキサ	(W+SP)+C+RSF $\xrightarrow{3分}$ +S $\xrightarrow{2分}$ 排出	良
B			二次処理材						
C			一次処理材 (8mm)	*3 1.5	0 ~ 15.0	0 ~ 1.00			
D			一次処理材 (4mm)						
E	C+SG ^{*1}	35	二次処理分級繊維	1.4	0 ~ 15.7	1.33 ~ 4.33	ホバート ミキサ	(W+SP)+C+RSF $\xrightarrow{3分}$ +S+RSFP $\xrightarrow{2分}$ 排出	毛玉状の 繊維有
F						0 ~ 4.00			
G						C+SG ^{*2}		0.2 ~ 4.67	
H	C	35	二次処理分級繊維	1.5	0 ~ 15.7	0 ~ 1.87	ホバート ミキサ	(W+SP)+C+RSF $\xrightarrow{3分}$ +S $\xrightarrow{2分}$ 排出	毛玉状の 繊維有
I						(W+SP)+C+RSF+S $\xrightarrow{5分}$ 排出			

P: 結合材, C: セメント, SG: 高炉スラグ微粉末, S: 細骨材, SP: 高性能減水剤, RSF: 廃FRP処理材, RSFP: 二次処理分級微粉末,
 $\xrightarrow{\quad}$: 練混ぜ, *1: SG/(C+SG)=0.3, *2: SG/(C+SG)=0.5, *3: 処理材を細骨材に置換したため (S+RSF)/C=1.5,
 *4: 二次処理分級微粉末を細骨材に対し 6.7%置換したため (S+RSFP)/C=1.5

である。表において、高性能減水剤は練混ぜ水に溶して添加し、その添加量はモルタルのフロー値が 125 ~ 165mm の範囲になるように決定した。ミキサは容量 10 ℓ のオムニミキサおよびホバートミキサを使用した。

2.3 供試体の製造方法

供試体は寸法 40 × 40 × 160mm の鋼製型枠を用い、テーブル振動機により締め成型した。養生条件は、24時間後脱型した後、21℃で27日水中養生し、14日気中養生とした。

2.4 強度試験

曲げ強度試験は万能試験装置を用い、スパン 100mm で中央集中载荷とした。この際、試験装置のクロスヘッドの変位量から曲げ破壊時の最大のたわみ量を測定した。圧縮強度試験は曲げ試験終了後の供試体の折片を圧縮強度試験用供試体とし、40 × 40mm の加圧板で载荷を行った。各強度試験の結果は3個の供試体の平均値とした。

2.5 供試体の切断面の観察

曲げ強度試験終了後の供試体の折片をダイヤモンドカッターで切断し、処理材の分散性等を評価するために、切断面の観察を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 練混ぜ方法の検討

二次処理材に含まれる繊維部分および二次処理分級繊維は、毛玉状に凝集しているため、これをモルタルマトリックス中に均一に分散させる練混ぜ方法について検討した。

本検討におけるモルタルの配合は、W/C = 45%、S/C = 0.5、二次処理分級繊維の混入率はセメントに対し質量比で 14.4% で一定とした。

表-2 練混ぜ方法

記号	ミキサ	練混ぜ方法
M-1	ホバート	C+W+SFF+S $\xrightarrow{5分}$ 排出
M-2	ホバート	C+W+SFF $\xrightarrow{3分}$ +S $\xrightarrow{2分}$ 排出
M-3	オムニ	C+W+SFF+S $\xrightarrow{5分}$ 排出
M-4	オムニ	C+W+SFF $\xrightarrow{3分}$ +S $\xrightarrow{2分}$ 排出

C:セメント, W:水, SFF:二次処理分級繊維,
S:豊浦標準砂, $\xrightarrow{\quad}$:練混ぜ

砂骨材は豊浦標準砂を用いた。練混ぜはホバートミキサおよびオムニミキサを用い表-2に示す方法で行った。各方法で練混ぜたモルタルで 40 × 40 × 160mm の供試体を作成し、2.3に示す養生を行った後、供試体を切断し、切断面の観察を行い、二次処理分級繊維の分散性に及ぼす練混ぜ方法の影響について検討した。

写真-2は、各練混ぜ方法により作成した供試体切断面の観察結果を示したものである。写真のM-1~M-3では、白色で球形状のものが多く観察された。この球形状の部分はSEM観察(写真-3)より、繊維が凝集したものであることがわかる。これは、廃FRPから凝集

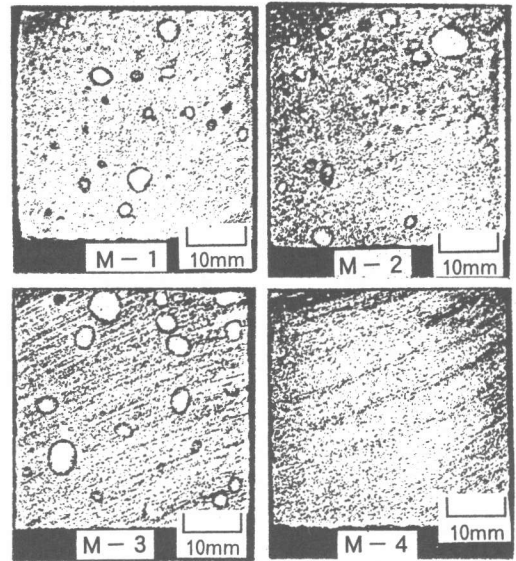


写真-2 モルタル供試体の切断面

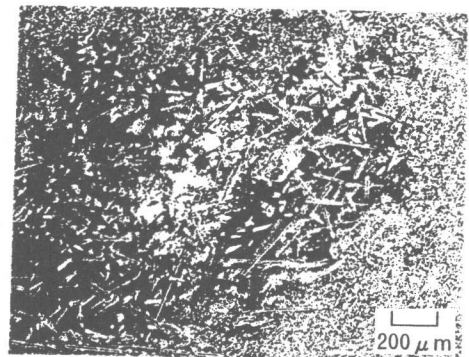


写真-3 凝集した繊維のSEM観察像 (M-1モルタルの切断面)

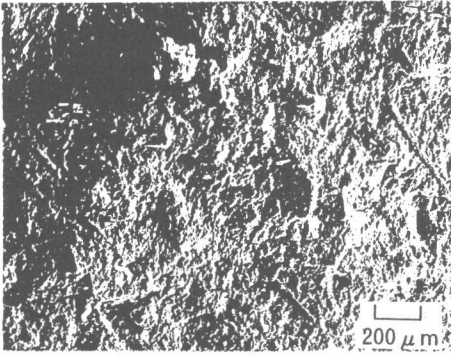


写真-4 分散した繊維のSEM観察像
(M-4モルタルの破断面)

した状態で回収される二次処理分級繊維(写真-1参照)がM-1~3の練混ぜ方法では、モルタルマトリックス中で分散せず、そのままの状態が残ったものと考えられる。一方、M-4の方法では球形状に凝集した繊維はまったく観察されず、繊維がモルタルマトリックス中に均一に分散しているものと思われる。M-4の供試体破断面のSEM観察(写真-4)より繊維がモルタルマトリックス中に分散していることが認められた。

以上の検討により、モルタルの練混ぜ方法としてはオムニミキサを用いて、セメント、水および二次処理分級繊維を練混ぜた後、細骨材を投入して更に練混ぜるM-4が凝集した二次処理分級繊維を分散させるために最適な方法と考えられ、以下ではこの方法によりモルタルの練混ぜを行うことにした。

3.2 曲げおよび圧縮強度に及ぼす各種要因の影響

(1) 廃FRP処理材の種類の影響

図-2は処理材の種類を変えた場合について、モルタルの曲げ強度と処理材の混入率の関係を示したものである。図より配合Aの二次処理分級繊維を混入した場合、処理材の混入率の増加に伴い曲げ強度が大きくなっている。また配合Bの二次処理材(繊維とFRP微粉末が混在)を混入した場合にも処理材の混入により、曲げ強度の増加が見られた。これらの曲げ強度の増加は、繊維状の処理材がモルタルマトリッ

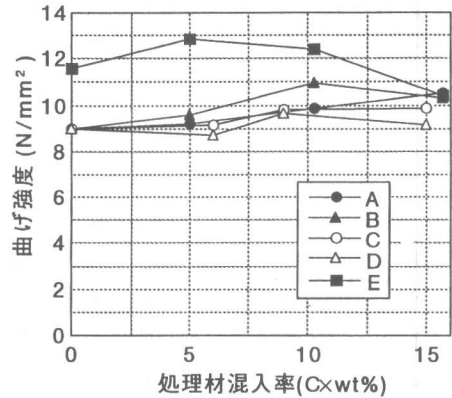


図-2 廃FRP処理材の種類の影響(曲げ)

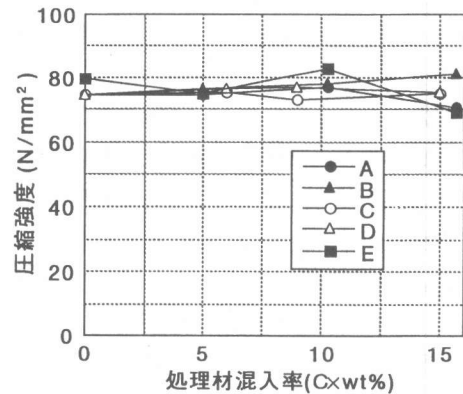


図-3 廃FRP処理材の種類の影響(圧縮)

クスに対し繊維補強材として有効に作用したためであると考えられる。一方、配合C、Dの一次処理材を混入した場合、曲げ強度の増加は見られない。配合Eの二次処理分級微粉末を細骨材に対し6.7%置換した場合には、二次処理分級繊維の混入率にかかわらず配合Aの場合より曲げ強度が大きくなっている。浜田ら⁴⁾は、石灰石微粉を細骨材に置換して混入した場合、コンクリートの強度が増加することを示したが、本実験における配合Eにおいても、二次処理分級微粉末を細骨材に対し置換したため、この微粉末に含まれる炭酸カルシウム微粉によりモルタルマトリックスの強度が増加したため上記の結果となったものと考えられる。

図-3はモルタルの圧縮強度と処理材混入率の関係を示したものである。処理材混入率が

きい場合、無混入の場合よりわずかに圧縮強度が低下するものがみられるものの、本研究で行った処理材混入率の範囲では、処理材混入率に伴う圧縮強度の変化はわずかであった。

(2) 高炉スラグ微粉末の影響

本実験で用いた廃FRPを構成している繊維は主に、E-ガラス繊維である。このため、モルタル中に分散した二次処理分級繊維は、長期的にはセメントの水和による高アルカリ性雰囲気により、劣化していくものと考えられる。これにより、廃FRP処理材を混入したモルタルの曲げ強度も材令に伴い低下していくことが予想される。そこで、モルタル中のアルカリ性を低下させ、長期的な曲げ強度の低下を軽減する目的で、結合材として高炉スラグ微粉末をセメントに置換した場合について行った。図-4は、処理材として二次処理分級繊維を用い、高炉スラグ微粉末をセメントに対し0, 30, 50%置換した場合の配合A, F, Gの曲げ強度を示したものである。図より高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるほどモルタルマトリックスの強度は低下しているものの、二次処理分級繊維混入率が10(C+SG)×wt%までは混入率の増加に伴い曲げ強度が増大し、繊維補強効果が見られた。なお、ここで示した試験結果は材令42日のみのものであるが、今後は更に長期材令における曲げ強度の変化について検討する予定である。

(3) 練混ぜ方法の影響

図-5は、オムニミキサ(配合A), ホバートミキサ(配合H, I)を用い、処理材として二次処理分級繊維を混入した場合について、それぞれの曲げ強度を示したものである。ホバートミキサを用いた場合、繊維の混入により曲げ強度は増大するが、オムニミキサを用いた場合に比べ繊維混入率が大きくなると曲げ強度の増加は小さくなっている。これはホバートミキサを用いた場合、繊維の分散性が悪く繊維混入率が大きくなるほど繊維が凝集した状態でモルタル中に存在し、繊維の補強効果が十分発揮され

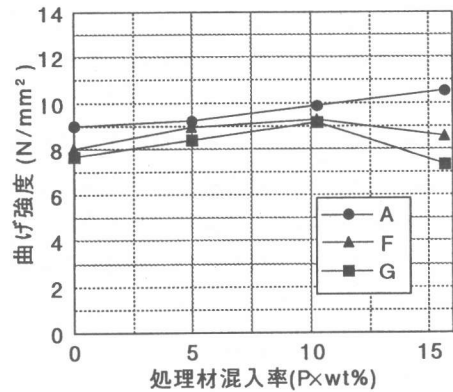


図-4 高炉スラグ微粉末の置換率の影響(曲げ)

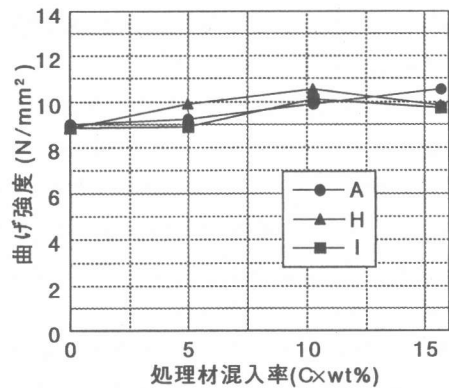


図-5 ミキサおよび練混ぜ方法の影響(曲げ)

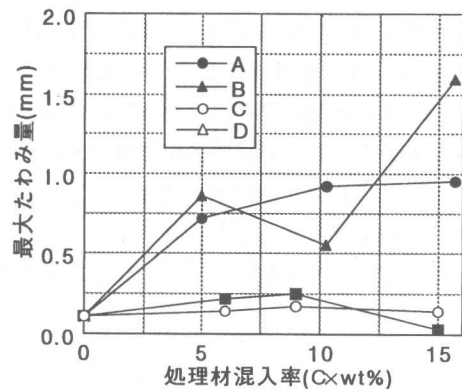


図-6 廃FRP処理材の種類が曲げ破壊時の最大たわみ量に及ぼす影響

ないためであると考えられる。

3.3 曲げ靱性に及ぼす廃FRP処理材の影響

図-6は、曲げ靱性の評価値として曲げ破壊

時の最大たわみ量と処理材混入率の関係を示したものである。図より、二次処理分級繊維および二次処理材を用いた配合A、Bは、処理材混入率の増加に伴い最大たわみ量が大幅に増加している。一方、一次処理材を用いた配合C、Dでは、最大たわみ量の増加は見られない。これは、二次処理分級繊維および二次処理材の繊維補強効果によりモルタルの曲げ靱性が向上したためであると考えられる。

4. まとめ

廃FRPをモルタル用材料として有効利用する方法に関し検討した結果、本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

(1) 廃FRPの処理工程において、凝集した状態で回収された繊維材をモルタル中により均一に分散させる方法として、オムニミキサを用い、セメント、水および繊維材を練混ぜた後、細骨材を投入して更に練混ぜを行うのが有効な方法であることが明らかとなった。

(2) 廃FRPの処理において、気流粉碎によりFRPのマトリックス部分と繊維部分を分離し、回収した繊維材を混入したモルタルは、その混入量の増加に伴い曲げ強度および曲げ破壊時の最大たわみ量が増大した。一方、せん断破碎のみを行った処理材を混入したモルタルでは、それらの増加は見られなかった。これらの結果は前者の場合、繊維状の処理材がモルタルマトリックスに対し、繊維補強材として有効に作用したためであると考えられる。

(3) 各種廃FRP処理材を混入したモルタルの

圧縮強度は、どの処理材の場合とも処理材混入率に伴う変化はわずかであった。

(4) 廃FRPの再利用の方法として、気流粉碎によりFRPのマトリックス部分と繊維部分を分離した処理材を用いることにより、モルタルの曲げ特性を向上させる繊維補強材として有効利用できることが明らかとなった。

謝辞

本研究で用いた廃FRP処理材は、(株)クボタ技術開発研究所より提供していただいた。また、本研究の遂行に当たり、(株)クボタ技術開発研究所・星野守宏氏、藤田大典氏にご協力を頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 「建築用複合材料・部材の材料設計と性能評価に関する調査」委員会(委員長 仕入豊和) : 平成8年度同委員会報告書, 建築研究振興協会, pp.15-36, 1997.3
- 2) 藤原正道・河野敏夫・浜田秀和 : FRP廃材のコンクリート製品への利用, セメント・コンクリート, No.563, pp.64-68, 1994.1
- 3) 柳 啓・小島 昭・福島敏夫 : 廃FRP微粉末を使用したコンクリートの二, 三の性状, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.938-943, 1996.12
- 4) 浜田二郎・加藤英昭・横須賀誠一・渡部嗣道 : 石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートの品質に関する実験研究, コンクリート工学系次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.135-138, 1995.6