

FRP 廃材の骨材用微粉化

SOUPER FINE POWDERING OF FIBER REINFORCED PLASTICS WASTE FOR AGGRIGATES

(FRP 廃材の骨材化 その1)

小島 昭*・古川 茂**・浅田俊彦***

By Akira KOJIMA, Shigeru HURUKAWA
and Toshihiko ASADA

1 はじめに

FRP (ガラス繊維強化プラスチック) は、第二次世界大戦中に米国で開発され、軽量構造材料の一つとして軍用航空機の部材に使用された。その後、軽量構造材だけでなく、優れた耐食性を有する事から舟艇や船舶などにも用いられた。最近では、浴室ユニット、輸送機器 (自動車、車両)、浄化槽、建築資材 (平・波板、便器、雑貨、ヘルメット) など幅広く利用され、その使用量および生産量は、今後もますます増加する傾向にある。FRP の生産量は、表 1 に示すように 1985 年 (昭和 60 年) には 26 万 8 千トンであったが、1990 年 (平成 2 年) には 45 万 4 千トンと、70% も増大した。それらの中でも、住宅機材方面での生産量の伸びが大きく、ここ 5 年間でそれぞれ 10 万トンも生産量が増加している。

FRP は、高強度と高耐久性という優れた特性をもっていることから、「破碎の困難性」や「難分解性」をも有している。廃棄された FRP は、それ自体のもつ優れた性質故に、破碎や分解には困難をとめない、廃棄処理に困っているのが実情である。特に、漁船やボートなどの大型の漁業廃棄物は、しばしば海岸付近に放置されるために、環境破壊を引き起こし、一つの社会問題になっている。大型廃棄物となりうる FRP 製の船艇は、これまでに漁船 30 万隻、ボートやヨットなどが 20 万隻以上も建造された。その中でも昭和 40 年代に作られた FRP 船は、すでに廃船の時期をむかえており、その数は年間 1 万隻にも達するといわれ、一部はすでに不法投棄されているのが現状である。

また、住宅リフォーム関係でも廃棄される FRP 量は極めて多く、ユニットバスが毎年 10~15 万個、平板・波板 FRP も毎年 1 万トン以上が埋立処分となっている。

その他に、製品製造時に廃棄される FRP の中には、トリミングカス、ポリマー残渣および成形不良品などもある。これらの産業用 FRP 廃材は、一般的には産業廃棄物処理業者に依託し埋立などによって処理している。しかし、多くの問題をかかえており、FRP 公害は既に全国各地に発生しているといってもよいであろう。

これまで試みられている FRP のリサイクル方法は、(1) 焼却しその際に発生する熱を利用するサーマルリサイクル、(2) 熱分解し、燃料として再資源化するケミカルリサイクル、(3) 人工漁礁などとして利用するマテリアルリサイクルなどであるが、それぞれ長所も短所もあり決定的な方法にはなっていない。そして、FRP 廃材の再利用、再資源化、有効利用などに関しての新しい方法の提案が、多くの分野から熱望されているのが実情である。

この問題に対して、FRP 協会や四国工業技術試験所などが、積極的に取り組んでいる。FRP 協会では、FRP のリサイクルに向けて、廃棄物調査委員会、廃棄物再資源化処理技術委員会、省資源化指針作成委員会などを発足させて対処している。また、四国工試では、水中切断の技術を FRP の切断技術に発展させ、廃棄 FRP の再資源化技術の研究を昭和 63 年度から 5 カ年計画で行なっている。そのリサイクリング技術は、解体、破碎、分類の前処理技術と、破碎した FRP を出発原料とする利用技術とからなり立ち、これまでに多大の成果を発表している。

著者らは、このような社会的背景をふまえ、大量に廃棄される FRP 廃材を大量に有効利用するには、モルタルやコンクリートなどの土木・建築材料に利用することであると考へ、研究を開始した。FRP 廃材の建材への利用は、セッコウボードとして利用する検討が四国工業試験所でも始められている。

セメント製品の原料は、細骨材、粗骨材およびセメントなどであるが、骨材に関しては資源の枯渇が深刻な問題となっている。例えば、細骨材である砂には、川砂が好ましいが、入手しにくくなったため、これに代る細骨材の登場が望まれている。また、住宅用の塀やフェンスなどに使用されているブロック類には、軽石と砂が骨材として利用されている。しかし、この軽石も資源の枯渇と環境破壊の点から採取しにくくなり、新しい骨材を模索している。特に、本校が設置されている群馬県は、建築用ブロックの生産量では日本一であり、本研究が地場産業振興の一翼を担えればと考えている。このように、地球規模で問題になっている資源の再利用・有効利用・環境保護などの点から、FRP 廃材をセメント系の無機質材料と複合化させることによって、資源として再利用

*群馬工業高等専門学校 工業化学科教授 (〒371 前橋市鳥羽町 580)、**群馬工業高等専門学校 土木工学科助教授、***アサオカ株式会社 代表取締役社長

することを検討した。具体的には、(a)FRP廃材の微粉末化、(b)FRP粉末を利用したモルタル材の製作、(c)軽石との併用によるモルタル材の製作などを試みたところ、極めて興味ある結果が得られたので報告する。

さらに、地球環境の保全と限られた地球資源の有効利用を目指し、FRPの「リサイクルシステム」を確立するための、NPH研究会を設立したので、その点についても紹介する。

表1 FRPの市場分野別出荷量(トン)

年	1985	1989	1990
建設資材	25,700	35,500	37,900
住宅機材	96,400	181,500	194,400
舟艇・船舶	33,300	37,800	39,800
自動車・車両	8,900	21,200	25,000
タンク・容器	35,500	49,300	49,700
工業機材	35,000	52,500	54,400
雑貨	18,400	33,000	40,400
その他	14,900	11,700	12,500
合計	268,100	422,500	454,100

2 FRPの微粉化

2.1 実験方法

(1) 粉碎用FRP

微粉碎用のFRPは、樹脂を浸みこませたガラス繊維織物をハンドレイアップ法で積層して作った、FRP製のポリバスを小片化して使用した。用いたFRPの組成は、ガラス繊維が約30～40wt%、残りは樹脂(不飽和ポリエステル樹脂)および充填材の炭酸カルシウムであった。

(2) 微粉碎装置

FRP廃棄物を資源として有効に利用するためには、まず切断、粉碎などによって粒状または粉末状にすることである。現状の粉碎技術でも数mmオーダーの粒状にすることは、クラッシャー方式や、ボールミル方式で可能であったが、数 μ mオーダーにすることは困難であると言われている。

使用した装置は、本研究グループで開発中のFRP専用粉碎機(アサオカ(株)製、ミクローナ FRP 301)である。FRPの微粉末化は、ダイヤモンド砥粒を埋め込んだグラインダーで研削することによって行なった。FRP粉碎装置の概要を写真1に示す。この装置は、(1)試料自動供給部、(2)研削部、(3)セパレーター部、(4)集粉部から構成されている。本装置の核心となる研削部は、写真2に示すように円筒状のダイヤモンド砥粒を埋め込んだグラインダー(直径250mm、長さ300mm)が回転し、それに所定の大きさに切断してある板状、棒状、パイプ状あるいは複雑形状のFRP成形物をエアシリンダーで押しつける仕組みになっている。本装置では、試料供給部の間口は、幅250mm、高さ50mmであるので、この中に入るようにはあらかじめ切断する前処理が必要である。供給されたFRPは、瞬時にして微粉末にされ、集粉部に吸引される。途中、セパレーター部を通過し、破片などは除去される機構になっている。また、静電気除去装置も装備されている。

(3) FRP微粉末の分析および観察

製作されたFRP微粉末は、その形状および大きさを走査電子顕微鏡(日立製作所製、S-2000)で観察した。その際に、FRP微粉末中に含まれるケイ素およびカルシウムの分布状態をX線マイクロアナライザー(堀場製作所製、Newmax 2500)で分析した。

FRP微粉末の粒度およびその分布は、各種メッシュ

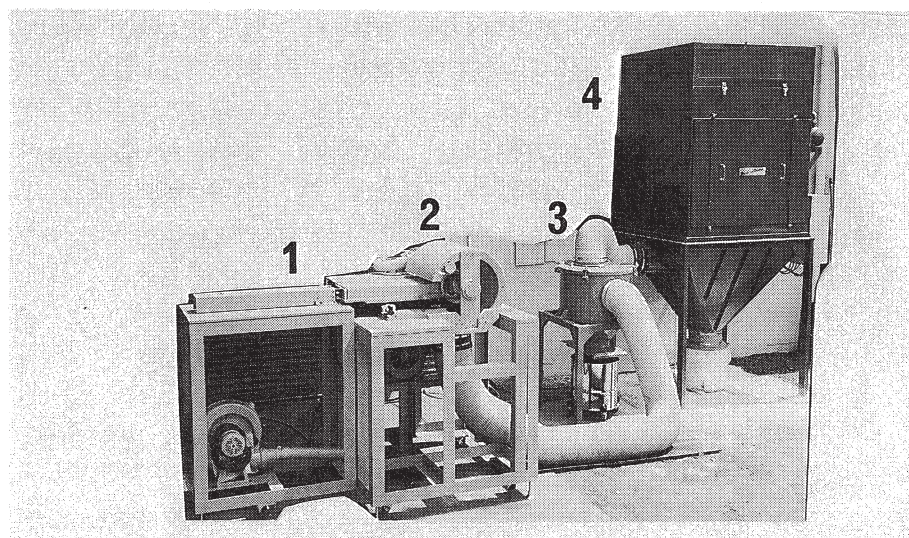


写真1 FRP粉碎装置の概要

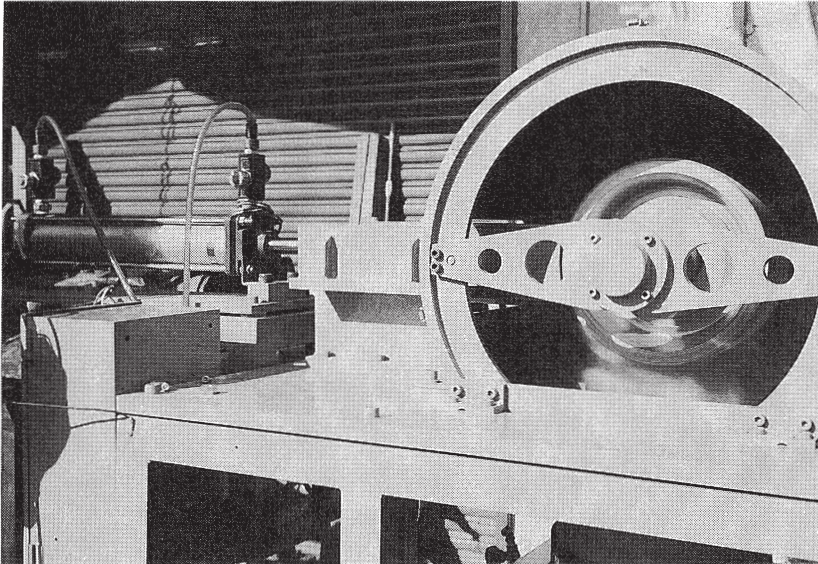


写真2 FRP粉砕装置の研削部

を用意し所定時間篩分けを行ない、各篩上にあるFRP微粉末の重量を測定し求めた。しかし、その方法では、凝集しているFRP粉末の粒度分布は測定できないので、レーザー回折式粒度分布測定機（KK日科機、LS型）を用い、水を分散媒として測定を行なった。

2. 2 実験結果および考察

(1) FRP微粉末の製作

FRP廃材を微粉砕装置中に注入すると、瞬時にして微粉化された。この粉の見かけ比重は、0.54であった。製作したFRP微粉末の中には、チョップドストランド状になったガラス繊維もごく僅か認められたが、大部分はサラサラのマイクロパウダーであった。また、微粉末の色は、FRP中に添加してある顔料によって影響されるが、白色に近いものが多かった。FRP微粉末を水中に入れても、表面上に浮遊しており、攪拌しても沈まなかった。

本装置の微粉末製造能力は、FRPの種類（配合、成形方法など）によって異なるが、現時点では概ね毎時50～100kg程度であった。1時間当たりの微粉末製造量は、BMCで作られたFRPでは50～70kg、ハンドレイアップの場合には60～80kg、SMCでは70～90kg、人造大理石100～120kg程度であった。この微粉末化の能力は、あくまでも試験的に行なったもので、今後試料自動供給部の改良を行なえばより向上できる。

また、研削時にダイヤモンドカッターがどの程度の熱をもつかが問題になるが、研削直後にカッターの表面を手で触れてもほのかに暖かみを感じる程度であった。したがって、これまで熱硬化性樹脂などの粉碎には、液体窒素を利用してカッター部を冷却することが一般に行なわれているが、本装置によればその必要は全くないと言える。また、微粉碎時に粉塵が発生することや、激しい

振動の生じることはなかった。本装置中、特に問題となるのは、回転しているダイヤモンドカッターの寿命であるが、長期間有効であることがこれまでの実績から確認されている。

(2) 走査電子顕微鏡観察

微粉化されたFRP粉末を走査電子顕微鏡で観察すると、ガラス繊維もFRP粉末も切断されていた。得られたFRP微粉末の形状を、走査電子顕微鏡で観察し、その様子を写真3に示す。一部には、20 μ m程度の比較的大きな粉末もあるが、大部分はそれ以下で、4～5 μ m程度のものが多い。さらに、電子顕微鏡の倍率を高くして観察すると、写真4のように2 μ m程度の微粉末も多数認められる。

また、繊維の形態を保持しているガラス繊維も認められたので、その切断面を走査電子顕微鏡で観察し写真5に示す。ガラス繊維は、極めて鋭利な刃物で瞬時に切断された断面を有していた。そして、ガラス繊維の周囲には、1 μ m以下の微細粉の付着していることが見られた。

次に、FRP微粉末中の元素組成をX線マイクロアナライザーで分析したところ、CaとSiのみが存在し、その他の元素はなかった（使用した装置では、原子番号11以下の軽元素は分析できないので、炭素、水素、酸素などは検出できなかった）。また、カルシウムとケイ素の存在量は、ほぼ同じであった。次に、CaとSiの分布をX線マイクロアナライザーによる面分析で検討したところ、それらの元素の偏析している様子はなかったので、ガラス繊維も大部分は微粉化され、繊維状では存在していないと判断できる。

(3) FRP微粉末の粒度分布

篩分離でもとめたFRP微粉末の粒度分布は、表2に

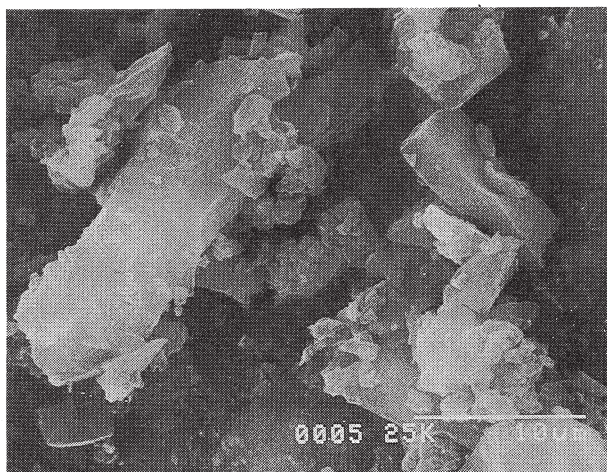


写真3 FRP微粉末の走査電子顕微鏡観察

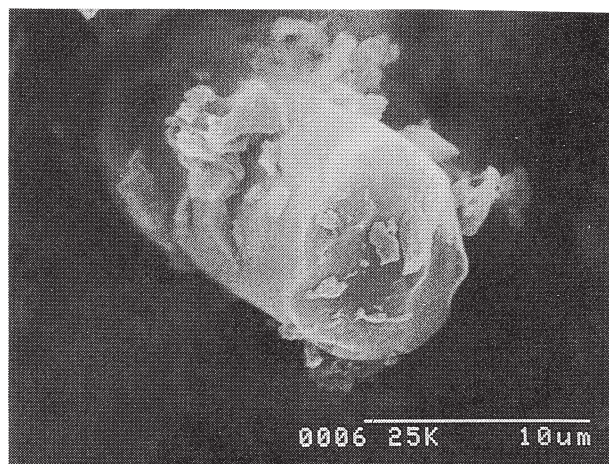


写真5 FRP微粉末中のガラス繊維の破断面

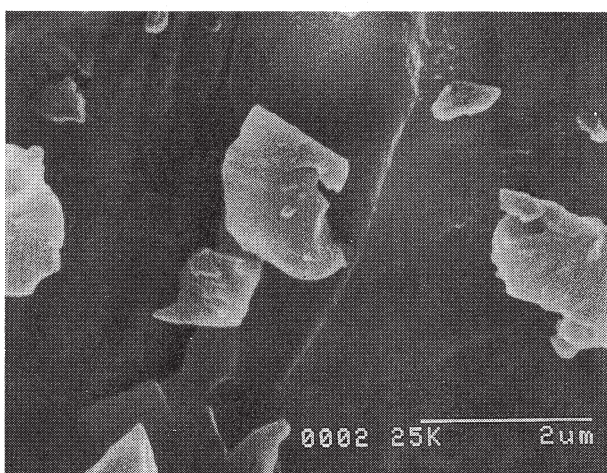


写真4 FRP微粉末の走査電子顕微鏡観察

表2 FRP粉末の粒度分布

粒度(μm)	≥297	210	149	105	74	44	44以下
割合(%)	0.6	0.5	2.3	5.2	6.5	74.2	10.7

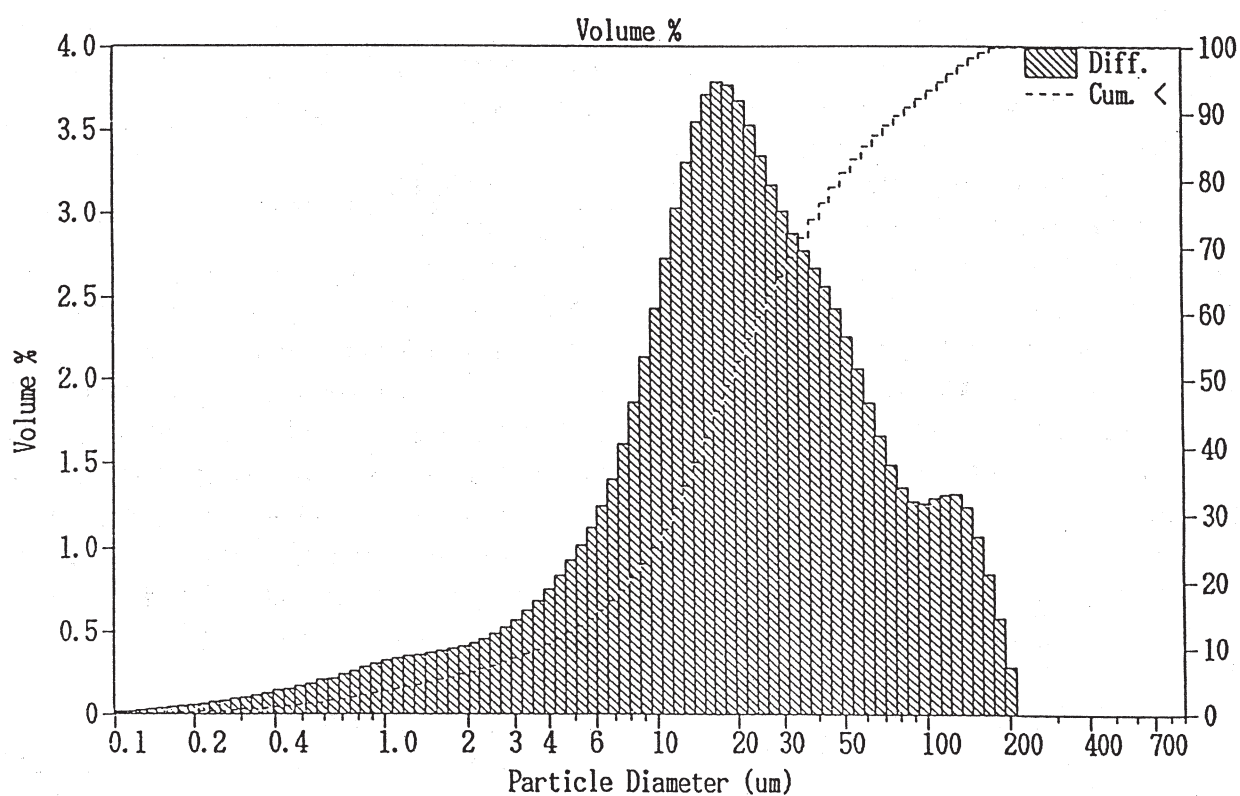


図1 FRP微粉末の粒度分布

示すように44 μm 以下が大部分であった。その後、粉碎装置の改良も行なわれたので、最近作られたFRP微粉末の粒度分布をレーザー回折式の粒度分布測定機で測定した。

得られた測定結果を図1に示す。FRP微粉末の粒度は、0.4 μm から100 μm の範囲にあり、16 μm 程度の粒度が最も大であった。また、平均粒度は13.5 μm 、体積基準では13.5 μm 、個数分布の基準では0.7 μm であった。これまでFRPの粉碎に関して種々の試みがなされているが、いずれもmmオーダーであり、一段階の粉碎方法で10 μm オーダーにまで微粉碎する技術は開発されていない。

本実験に使用したFRP粉末は、出来るだけ微粉末にしたものである。従って、これよりも粒径の大きな粉末を作ることは、極めて容易である。また、セメント・コンクリート二次製品の製造には、種々の大きさの骨材（微骨材から粗骨材まで）を目的に応じて粒度を調整し用いている。例えば、中空ブロック関係では、最大10mm程度のものから最小数10 μm のものまでが利用されているが、本実験でもその点は可能であった。

3 セメント硬化物の充填材としての利用

3.1 実験方法

砂や細骨材などを特に加えないセメント硬化物の充填材として、FRP微粉末が利用できるかどうかについて検討した。

FRP微粉末は、ハンドレ法で作られたものを用いた。セメントは、白色ポルトランドセメントを用い、所定量の水を加えてセメントペーストを作った。そして、セメント重量の5%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%および90%に相当するFRP微粉末を添加し、十分に混合した。使用した水量は、FRP微粉末を含むセメントペーストが分散できる最小量とした。十分に混合したFRP微粉末を含むセメントペーストは、プラスチック型枠（5.3cm x 8.3cm x 1.3cm）中に流しこみ、表面をこてで平滑にした。一日後に脱型し、2週間水中養生を行ない、FRP微粉末含有セメント硬化物を作った。得られたセメント硬化物について、嵩密度および曲げ強度（三点曲げ試験方法）を求めた。

3.2 実験結果および考察

作られたセメント硬化物の表面は、平滑、緻密で光沢を有していた。中でもFRP微粉末の添加量が5%~30%のセメント硬化物は、その表面に水滴を落としても浸みこむことなく、水滴のままであった。

得られたセメント硬化物の嵩密度および曲げ強度を表3に示す。FRP含有量が増加するにつれて、表面の緻

密さや、平滑度などは低くなるとともに、嵩密度も小さくなった。これは大量のFRPを混練するために、使用した水量が多いためである。各供試体の曲げ強度も、FRP含有量が増すにつれて低くなった。これも水量の増加によるもので、減水剤などとの併用によって、それらの曲げ強度はより向上すると思われる。FRP微粉末の含有量が5%の場合の曲げ強度は、FRPを含まないセメント硬化物と同じ80kgf/cm²を示した。さらに、FRP含有量を10%および20%とやや増しても、70kgf/cm²の曲げ強度を維持していた。

表3 FRP微粉末含有セメント硬化物の曲げ強度

FRP含有量 (%)	W/C	嵩密度 (g/cm ³)	曲げ強度 (kgf/cm ²)
0	0.40	1.94	80
5	0.40	1.93	80
10	0.40	1.68	70
20	0.48	1.61	70
30	0.52	1.57	45
40	0.61	1.37	40
50	0.69	1.35	40
60	0.81	1.27	40
70	0.90	1.19	30
80	1.03	1.16	30
90	1.08	1.11	20

FRP含有量：対セメント重量、
W/C：水/セメント（重量）

4 モルタル用骨材への利用

4.1 実験方法

FRP粉末を骨材（砂）とともに併用したモルタル材の製作について検討した。セメントには普通ポルトランドセメントを、砂には標準砂を用い、骨材とセメントとの比を2として供試体を作製した。FRP粉末は、骨材重量の10%、20%、30%に相当する量を用いた。FRP粉末の添加量が増えるとモルタルの流動性は低くなるので、高性能減水剤をセメント重量の1~3%程度加えた。モルタルの製作は、JIS R 5201で行い、4cm x 4cm x 16cmの供試体を作った。これを水中で28日間養生した後に、曲げ強度および圧縮強度試験行なった。

4.2 実験結果および考察

作製したモルタルの機械的強度を表4に示す。供試体の嵩密度は、砂のみのモルタルでは2.4g/cm³であるが、FRP粉末添加量を10%から30%へと増すにつれて、

2.2g/cm³から1.9g/cm³へと低くなり軽量化された。

F R P粉末を全く含まないモルタルでは、曲げ強度は49kgf/cm²、圧縮強度は375kgf/cm²であった。F R P粉末の添加量が増すにつれて、モルタル材の機械的強度は低くなったが、F R P粉末を30%含有しても、その曲げ強度は33kgf/cm²、圧縮強度は205kgf/cm²を示した。建築・土木分野などで使用されている一般コンクリートブロックの圧縮強度は、40～80kgf/cm²であり、今回製作したF R Pを30%含むモルタル材でも、充分にこの値を充足していた。また、この供試体の中央点のたわみ量は、0.12mmで、F R Pを含まないモルタルの場合より3倍も大であった。したがって、F R P粉末を含むモルタルは、運搬費用の軽減や、建築物の高層化に適応した製品となりうる要素を有していた。

表4 F R P粉末を骨材としたモルタル材の諸特性

F R P 添加量 (%)	供試体 重量比 (%)	嵩密度 (g/cm ³)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	たわみ (mm)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
0	100	2.4	49	0.04	375
10	92	2.2	41	0.08	370
20	88	2.1	46	0.12	300
30	78	1.9	33	0.12	205

F R P添加量：F R P / (F R P + 骨材)
W / C : 0.65

5 軽量モルタル用骨材としての利用

5.1 実験方法

F R P粉末を含むモルタルをブロックや建材などに利用する場合には、軽量であることが特に望まれる。そこで、標準砂のかわりにシラスバルーン（三機工業kk）を

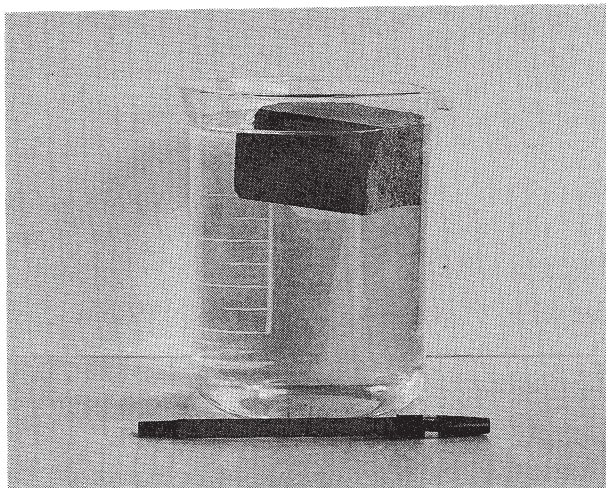


写真6 水に浮くF R P微粉末含有軽量モルタル

用い、軽量化を試みた。シラスバルーンは、嵩比重0.3～0.33、見掛比重（水置換）0.6～0.7のものを使用した。所定量のシラスバルーン、F R P粉末およびセメントをあらかじめ充分に混合させたものに、所定量の水を添加し、ミキサー中で混練し、型枠中に充填した。その後、脱型し、水中養生を行なった。

5.2 実験結果

30wt%のF R P粉末を含むモルタル材では、養生中もまた養生後も水面上に浮いており、軽量モルタルであった（写真6）。この軽量モルタルの嵩密度は約0.9g/cm³、曲げ強度は20kgf/cm²、圧縮強度は100kgf/cm²程度であり、実用性の高い軽量建材となりうる値であった。また、凍結融解試験を行なったが、強度の低下することはなかった。

6 軽石と併用による軽量コンクリート材の作製

群馬県で生産される中空ブロック類は、椋名軽石を使用していることが多い。そこで、椋名軽石とF R P粉末とを併用し、軽量コンクリートの作製を試みた。軽石には、粒径5mm以下のものを用いた。セメント500gに所定量の軽石とF R P粉末を加えて、混合した後に、水325gを入れ、充分に混ぜあわせ、型枠（40mm×40mm×160mm）中に流し込んだ。1ヵ月後に脱型し、水中養生を行なった。水-セメント比は0.65、骨材-セメント比は1.0であった。その際に、軽石とF R P粉との比を80:20、70:30、50:50として作製した。7日後に各供試体の曲げ強度および圧縮強度を求め、その結果を表5に示す。F R P粉末量が増えるにつれて、供試体の機械的強度は低くなっているが、50%添加した場合でも、65kgf/cm²の圧縮強度を有していた。現在製造されている中空ブロック類は、3種類に分類されているが、それらの圧縮強度は、A種では40kgf/cm²、B種では60kgf/cm²、C種では80kgf/cm²である。従って、今回作製したF R P粉末を50%含む供試体でも、これらの圧縮強度は満足していた。

表5 軽石とF R P粉末とを使用した
モルタル材の機械的強度

F R P添加量 (%)	嵩密度 (g/cm ³)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
0	1.95	42	219
20	1.54	32	155
30	1.55	33	149
50	1.61	11	65

7日強度、F R P添加量：F R P / (F R P + 軽石)

7 NPH研究会の誕生

難破砕性樹脂であるFRPの微粉化が可能となった。研究のスタート時には、1時間に200g程度しか作れなかったが、漸く100kgも「ニューマテリアル パウダー」を手にすることが出来るようになった。このように、FRPの微粉化技術は確立されたと言っても過言ではないが、この微粉末をどのようにしてリサイクルするかについての検討はこれからの課題である。そのためには、FRP廃棄物の回収システムの確立、廃棄物発生起源の認識などを明確にする必要がある。

また、大型廃棄物の小片化、FRP微粉末の粒度分布の制御、品質管理なども大事な点であり、早急に対処しなければならない。特に、FRP微粉末の受け皿となるセメント・コンクリート関係にとっては、粉の履歴、すなわち生れ（配合）と育ち（成形方法）などが明確でなければ、それを利用して作られるリサイクル製品の品質保証は出来なくなる。

さらに、FRP微粉末を使用する際に発生する粉塵など、作業環境の整備も大事な問題点である。今後はこのFRPの微粉末を、廃棄物ととらえるのではなく、「ニューマテリアル」として、高い付加価値をもたせた有用商品を開発することが重要である。

これらのことを踏まえ、FRPの微粉化と、そのリサイクルに関する技術を幅広く普及するために、NPH（Noble Plastics Hybrid化）研究会を平成3年10月に設立した。具体的な研究会の活動は、各分野から幅広い英知を結集し、地球環境の保全や、地球資源の有効利用などに貢献することである。