

F R P 廃棄物の再利用技術に関する研究（第二報） － F R P 廃棄物の砕成物を利用した成形品とその利用－

大市 貴志, 山岸 暢, 吉田 光則

Study on recycling technology of waste FRP (Part II) － Characteristics of recycled products utilizing pulverized waste FRP and its utilization－

Takashi OHICHI, Tohru YAMAGISHI, Mitsunori YOSHIDA

抄 録

F R P 廃棄物は、現状ではリサイクルが殆ど行われておらず、北海道内の F R P 関連産業においても、その再資源化が大きな問題となってきた。本研究では、F R P 廃棄物の再資源化を目的に、各種 F R P 廃棄物を粉碎し、その砕成物を熱硬化性樹脂およびレジンコンクリートの充填材として再利用する方法について検討を行った。その結果、F R P 砕成物を利用する成形において、用いる F R P 砕成物の種類により特性が異なることから、それぞれ適切な成形条件を確立する必要がある。適切な成形条件下では、機械的性質などが優れたリサイクル成形品が得られ、F R P 廃棄物の砕成物は、熱硬化性樹脂およびレジンコンクリートの充填材として有効利用できることが明らかになった。また、これらの結果をもとに、F R P 廃棄物リサイクル製品の試作を行った。

キーワード：繊維強化プラスチック、廃棄物、再利用、粉碎、熱硬化性樹脂、レジンコンクリート

Abstract

From the point of environmental protection, recycling of waste FRP is becoming one of the most important problems for FRP industry in Hokkaido. This paper describes material recycling technology of waste FRP. Waste FRP made by various molding methods were pulverized and filled in thermosetting resin and resin concrete. Then, Characteristics of recycled products utilizing pulverized FRP were different by the type of pulverized FRP which was filled. The molding condition which was respectively appropriate had to be established. Under appropriate molding conditions, the recycled products of which the mechanical property was excellent was able to be molded. From these results it is concluded that the pulverized FRP is efficiency to utilize as a filler of thermosetting resin and resin concrete. Then, we did the trial production of some kinds of recycled products as these results.

KEY-WORDS : Waste FRP, Recycling, Pulverize, Thermosetting resin, Resin concrete

事業名：経常試験

課題名：熱硬化性樹脂複合材料の採用技術

1. はじめに

F R P は優れた性質と成形が容易であるという特徴から、幅広い産業分野で使用されており、道内においても農漁業資材や建設資材などとして、様々な F R P 製品が

生産・加工されている。しかし、廃棄物の減量化と再資源化が社会的に重要な課題となっている中で、FRP廃棄物は、いまだにその大部分が産業廃棄物として解体・破碎後埋め立て処分されており、北海道内のFRP関連産業においては、その再資源化が大きな問題となってきている。

本研究では、FRP廃棄物を粉碎し、その砕成物を各種成形品の充填材として再利用する技術について検討を行った。前報¹⁾では、砕成物の形状や粒径分布などの特性がFRP廃棄物の種類により大きく異なるため、それぞれに再利用方法の検討が必要であることを報告した。本報では、各種FRP砕成物毎に熱硬化性樹脂やレジンコンクリート(REC)の充填材として再利用した場合の諸性質やそれらの用途について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材料

実験には、厚さが約5mmのハンドレイアップ成形品(HLU)、約3mmのシートモールディングコンパウンド成形品(SMC)および約3mmのバルクモールディングコンパウンド成形品(BMC)をそれぞれ回転式剪断破碎機(榊ホーライ製：VBC-420)により粉碎して得られたFRP砕成物を用いた。粉碎にあたっては、口径がφ1、φ3、φ10およびφ20mmのスクリーンを用い、4種類のサイズのFRP砕成物を作製し、それぞれについて充填材としての適用を検討した。

2.2 熱硬化性樹脂の充填材としての適用実験

2.2.1 圧縮成形による成形

硬化剤を加えた一般積層用の不飽和ポリエステル(UP)樹脂に各種FRP砕成物を所定の配合比率で加え、オムニミキサを用いて混練した。混練した成形材料を秤量して半押し込み金型(20×20cm)に投入し、樹脂が流出しないように成形圧力を調節しながら型締めを行い、厚さ10および40mmの樹脂成形体を作製した。この時、金型は加熱せずに常温で成形した。また、成形時の圧力は、0.2～7.0MPaの範囲で調節した。

2.2.2 振動成形による成形

圧縮成形と同様にUP樹脂に各種FRP砕成物を所定の配合比率で加え、オムニミキサを用いて混練した。混練した成形材料を秤量してテーブル振動機上の型枠内(18×18cm)に投入し、表面をコテで均しながら6000vpmで型枠を振動させ成形材料を型枠内に充填させた後、そのまま静置し、樹脂を硬化させて樹脂成形体を作製した。この時、成形体の厚さが約10および40mmとなるように成形材料を秤量した。また、成形材料の流動性を考慮し、型枠を振動させる時間を1～5分間の範囲で調節した。

2.2.3 樹脂成形体の評価方法

得られた樹脂成形体は、目視で外観の評価を行い、空隙率および機械的特性を測定した。なお、空隙率は、樹脂成形体、使用したUP樹脂および粉碎前のFRP成形品の密度をそれぞれ測定し、下式により空隙率を算出した。樹脂成形体の密度はJIS K7222、UP樹脂およびFRP成形品の密度はJIS K7112に準拠して測定した。

$$V = 100 - \rho (UP / \rho_{UP} + FRP / \rho_{FRP})$$

V	: 空隙率(%)
ρ	: 樹脂成形体の密度(g/cm ³)
UP	: UP樹脂配合比率(wt%)
ρ_{UP}	: UP樹脂の密度(g/cm ³)
FRP	: FRP砕成物配合比率(wt%)
ρ_{FRP}	: 粉碎に供したFRP成形品の密度(g/cm ³)

機械的特性としては、厚さ約10mmの樹脂成形体を用いてJIS K7055による3点曲げ試験およびJIS K7113の1号試験片による引張試験を行った。また、厚さ約40mmの樹脂成形体を用いてJIS A1183による圧縮試験を行った。圧縮試験方向は成形面と垂直の方向とした。

2.3 RECの充填材としての適用実験

φ3mmのサイズのHLUおよびSMC砕成物と炭酸カルシウムおよび混合珪砂(4号、5号、6号および8号)を所定の比率で混合し骨材とした。これに、硬化剤を加えた加熱硬化タイプのREC用UP樹脂を所定量加え、オムニミキサにより混練した。混練した成形材料を秤量して半押し込み金型(20×20cm)に投入し、成形温度140°C、加圧時間10分、成形圧力5MPaの成形条件で厚さ10mmのRECを成形した。得られたRECは、目視で外観の評価を行い、比重および機械的特性を測定した。比重はJIS K7112により測定した。機械的特性としては、JIS K7055による3点曲げ試験、JIS K7111によるノッチなしフラットワイズ方向のシャルピー衝撃試験を行った。また、衝撃試験片の破断面を走査型電子顕微鏡(SEM)により観察した。

3. 結果と考察

3.1 樹脂成形体の性質

3.1.1 HLU砕成物を充填した樹脂成形体

HLU砕成物を充填した樹脂成形体のUP樹脂配合比率と空隙率の関係を充填した砕成物のサイズおよび成形方法別に図1に示す。

圧縮成形では、2～17%と低い空隙率を示したが、樹脂配合比率が低くなると空隙率が高く、成形体の表面も粗くなり、外観がやや不良の樹脂成形体となった。また、その傾向は砕成物のサイズが大きいほど顕著であった。

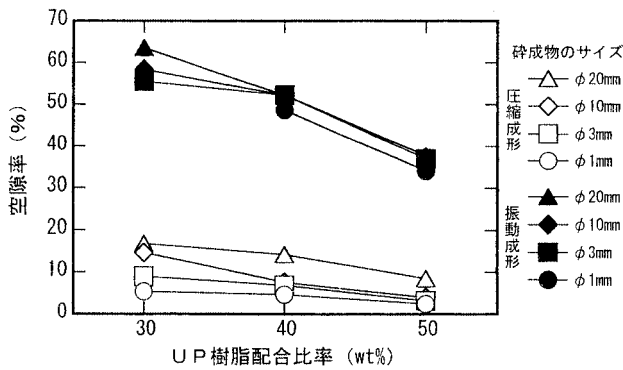


図1 HLU 砕成物を充填した樹脂成形体の空隙率

一方、振動成形では、いずれの粒径サイズでも空隙率が30%以上と圧縮成形より高い値であった。この原因は、HLUの砕成物には、繊維束状の形状をしている砕成物やガラス繊維のモノフィラメントが多く含まれ、砕成物同士が絡まり合い成形材料の流動性が非常に悪いいため成形型内に充填され難く、空隙率が高くなったと考えられる。また、HLU 砕成物の粒径分布は、各サイズとも大きい方に片寄っているため、砕成物は密に充填され難いことも、樹脂成形体の空隙率が非常に高くなった原因と思われる。

圧縮成形による樹脂成形体のUP樹脂配合比率と曲げ強度および引張強度の関係を図2および図3に示す。φ20mmの砕成物を用いた場合は、いずれの強度とも小さかった。砕成物のサイズがφ10mm以下では、曲げ強度はUP樹脂配合比率に関係なく40MPaでほぼ一定であったが、サイズが大きいほどバラツキが大きくなる傾向にあった。また、引張強度は、何れのUP樹脂配合比率においても砕成物のサイズが小さいほど高く、バラツキも小さくなる傾向であった。

樹脂配合比率の強度への影響があまり認められなかったのは、樹脂配合比率が減少するに従い、UP樹脂の砕成物への含浸不足が生じ砕成物とマトリックス樹脂との接着が不良となったことおよび空隙率が増加し破壊の基点となりやすい気泡などの欠陥が増えたことにより、砕成物配合比率の増加に

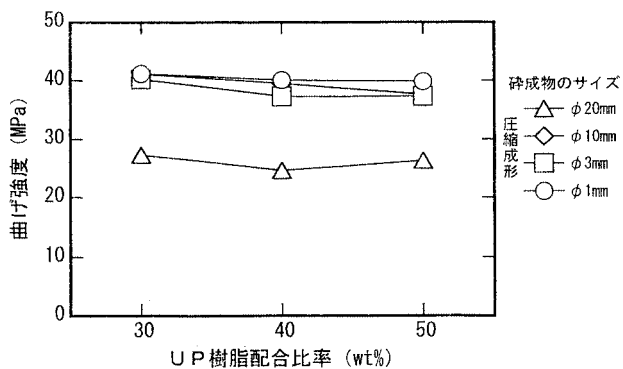


図2 HLU 砕成物を充填した樹脂成形体の曲げ強度

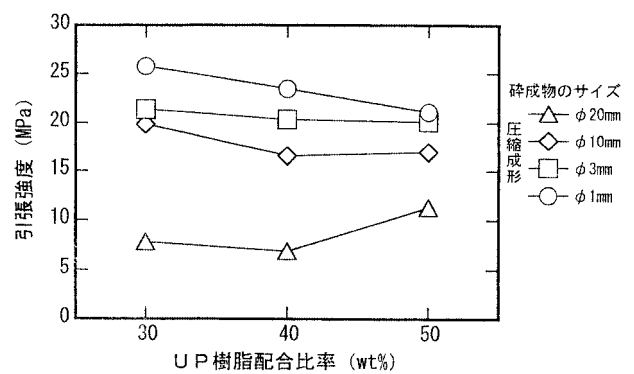


図3 HLU 砕成物を充填した樹脂成形体の引張強度

伴う補強効果による強度の向上が打ち消されたためと考えられる。

これらのことより、HLU 砕成物をUP樹脂の充填材として利用する場合には、振動成形は不適であるが、圧縮成形で砕成物のサイズを小さくすることにより強度が高く安定した製品が得られることがわかった。

3.1.2 SMC 砕成物を充填した樹脂成形体

SMC 砕成物を充填した樹脂成形体の空隙率を図4に示す。

圧縮成形では、HLUと同様に成形圧力を調整することにより、砕成物のサイズに関わらず樹脂配合比率が30~50wt%で成形が可能であり、空隙率が5%以下の樹脂成形体を得られた。また、その外観は、HLU 砕成物を利用したものより良好であった。SMC 砕成物は、粒径分布が幅広く、0.1mm以下の小粒径の砕成物も多く含まれているため、密に充填されやすく、表面性状が良好となったと思われる。

振動成形では、サイズがφ1およびφ3mmの砕成物を樹脂配合比率が50wt%で成形したものは、空隙率が圧縮成形品と同等の樹脂成形体となったが、φ10およびφ20mmの砕成物では高い空隙率を示した。また、樹脂配合比率が下がると空隙率が高くなり、表面が荒れた粗悪な樹脂成形体となった。

SMC 砕成物を用いた樹脂成形体の曲げ強度および圧縮強

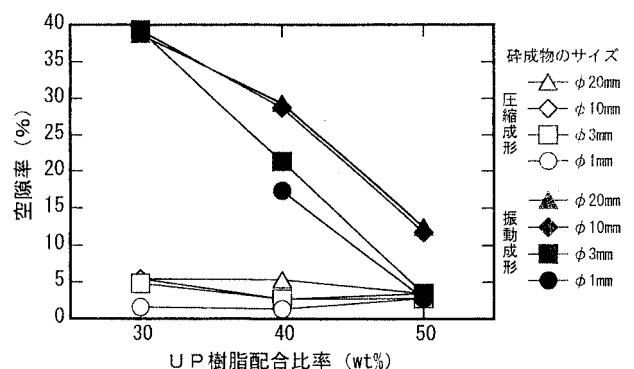


図4 SMC 砕成物を充填した樹脂成形体の空隙率

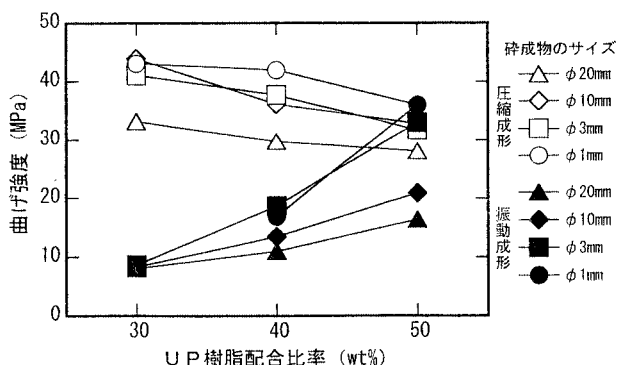


図5 SMC碎成物を充填した樹脂成形体の曲げ強度

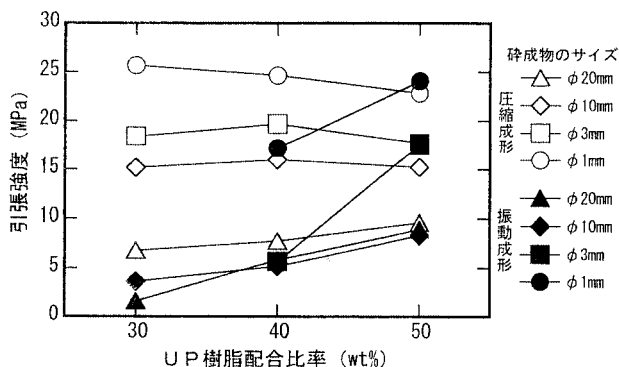


図7 SMC碎成物を充填した樹脂成形体の引張強度

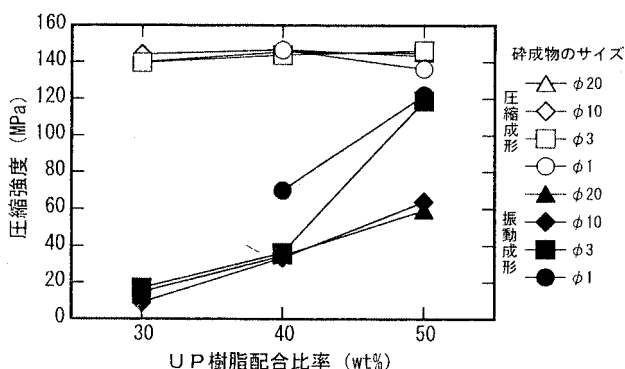


図6 SMC碎成物を充填した樹脂成形体の圧縮強度

度と樹脂配合比率の関係を図5および図6に示す。振動成形では、樹脂配合比率50wt%、碎成物サイズφ1、φ3mmの樹脂成形体が高い曲げ強度と圧縮強度を示した。しかし、碎成物のサイズがφ10mm以上または樹脂配合比率が40wt%以下で空隙率が10%を越える樹脂成形体は、曲げおよび圧縮強度とも圧縮成形の60%以下と非常に低い値であった。

圧縮成形では、曲げ強度については各サイズとも樹脂配合比率が少ないほど、つまり樹脂成形体中に占めるSMC碎成物の比率が高くなるほど曲げ強度が高くなり、SMC碎成物による補強効果が現れたと考えられる。しかし、圧縮強度は配合条件に関係なく140MPa程度と補強効果は認められなかった。

図7に、樹脂成形体の引張強度と樹脂配合比率の関係を示す。振動成形では、曲げおよび圧縮強度と同様の傾向を示し、樹脂配合比率50wt%、碎成物サイズφ1、φ3mmの樹脂成形体が圧縮成形と同程度の引張強度を示した。しかし、圧縮成形では、引張強度は、碎成物のサイズの影響を大きく受け、樹脂配合比率に関わらず粒径が小さいほど引張強度が高く、バラツキも小さかった。

この碎成物サイズの影響が大きかった理由として、次のようなことが考えられる。すなわち、図8に引張試験後の試験片の破断状態を示すが、その破断面には、碎成物の表面が観

察され、その剥離面の大きさは配合した碎成物の最大粒径に近い大きさであった。このことは、碎成物と樹脂との接着が弱く界面から破壊が進行していることを示し、碎成物の粒径が大きいと一つの界面の破壊がただちに試験片の破壊につながったと考えられる。

これらのことより、SMC碎成物をUP樹脂の充填材として利用する場合は、碎成物のサイズを小さくすることにより比較的外観が良く、機械的特性も優れた樹脂成形体を得られ、樹脂配合比率を50wt%にすることにより振動成形のような簡易な成形方法でも十分に成形が可能であることがわかった。

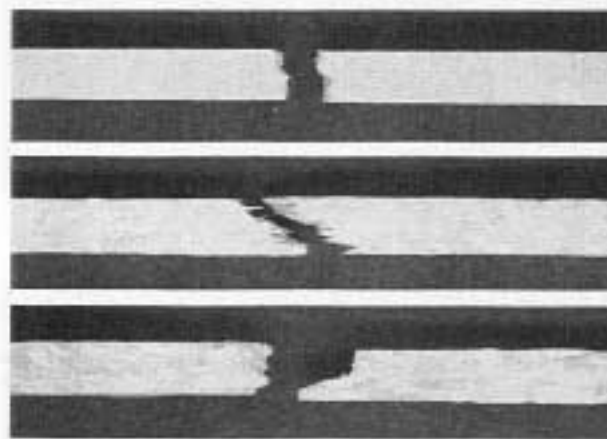


図8 圧縮成形品の引張試験後の破断状態 (上段：φ20mm, 中段：φ10mm, 下段：φ3mm)

3.1.3 BMC碎成物を充填した樹脂成形体

BMC碎成物を充填した樹脂成形体の空隙率を図9に示す。BMC碎成物の場合は、何れの樹脂配合比率でも空隙率が低い樹脂成形体を得られ、HLUやSMCと異なりその空隙率は圧縮成形より振動成形の方が低かった。これは、BMCの碎成物は、繊維状の成分がほとんど無く塊状をしているため、成形材料の流動性が非常に高く、振動成形が効果的だったと思われる。しかし、φ20mmの碎成物では、粒径の大きい碎成物が樹脂成形体の表面に浮き上がり、表面の凹凸が激しくな

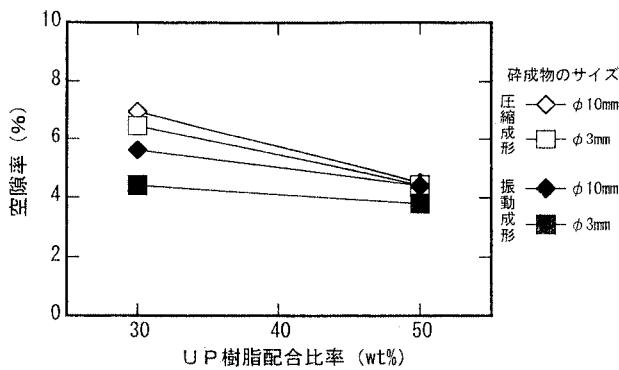


図9 BMC碎成物を充填した樹脂成形体の空隙率

り、厚さ10mmの薄い樹脂成形体を成形するのが困難であった。

BMC碎成物を用いた樹脂成形体の曲げ強度を図10に示す。曲げ強度は、H L U碎成物やS M C碎成物を用いた樹脂成形体より低く、各サイズともBMC碎成物の配合比率が高くなるほど曲げ強度が低くなったことから、BMCの補強効果が認められなかった。

これらのことより、BMC碎成物をUP樹脂の充填材として利用する場合は、成形作業性は良いが機械的特性が低いことから、低強度部材として利用することが望ましいと考えられる。

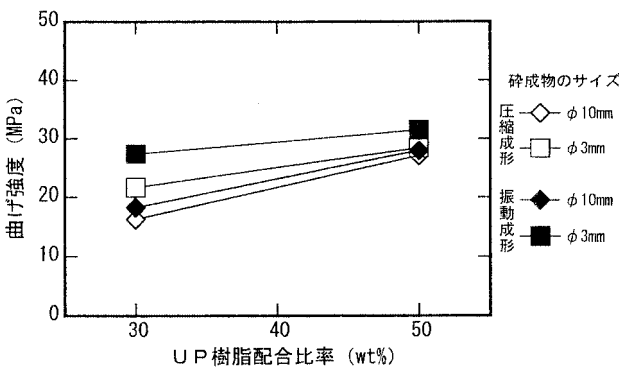


図10 BMC碎成物を充填した樹脂成形体の曲げ強度

3.2 FRP碎成物を配合したRECの性質

珪砂など充填材の一部をS M CまたはH L U碎成物に置き換えたUP樹脂をマトリックスとするRECの適切な配合条件を求めるため、種々の配合条件で成形試験を行った。予備実験の結果、S M CおよびH L U碎成物を配合したRECは、樹脂配合比率を一定とした場合、碎成物の配合比率が高くなるほど成形材料の流動性が低下し、充填不足や気泡などの欠陥が発生し易く、成形作業性も悪くなった。一方、樹脂配合比率を高めると、成形材料の流動性は良くなるが、プレス成形時に余剰のUP樹脂だけが金型から流出し、大量のバリが

発生するなどの問題が生じた。したがって、標準のRECと同じ成形作業性を保つためには、碎成物の配合比率は最大で約20wt%であり、碎成物の配合比率に合わせて、UP樹脂を30~40vol%の範囲で調節する必要があった。

FRP碎成物を配合したRECの配合比率の例を表1に示す。また、その配合比率で成形したRECの物性値を表2に、曲げ試験における荷重-たわみ曲線を図11に示す。RECにS M CまたはH L U碎成物を配合することにより、曲げ強度で約1割の向上が認められた。また、標準のRECが曲げ破壊時のたわみ量が小さく脆性的な破壊になるのに対し、各碎成物を混入すると曲げ破壊までのたわみ量が増加し、衝撃強度も大幅に向上した。その効果は、各碎成物の配合比率が高くなるほど大きくなり、S M C碎成物よりH L U碎成物の方が影響は顕著であった。

図12にH L U-2のシャルピー衝撃試験後の破断面の様子を示す。供試体の破断面には、マトリックスから飛び出したガラス繊維が多数観察された。ガラス繊維がマトリックスから引き抜かれる抵抗によりRECの靱性が向上し、その結果、

表1 FRP碎成物を配合したRECの配合例

試料名	配合比率 (vol%)			
	UP樹脂	FRP碎成物	混合珪砂	炭酸カルシウム
標準	30.1	0.0	50.5	19.4
S M C-1	31.1	7.4	41.7	19.8
S M C-2	34.7	21.2	29.9	14.2
H L U-1	33.1	8.2	39.8	18.9
H L U-2	39.0	21.9	26.5	12.6

表2 FRP碎成物を配合したRECの物性値

試料名	比重 (-)	曲げ強さ (MPa)	曲げ弾性率 (GPa)	曲げ破壊時のたわみ量 (mm)	衝撃強さ (kJ/m ²)
標準	2.15	27.3	18.4	0.65	3.9
S M C-1	2.08	30.6	19.5	0.73	3.9
S M C-2	1.91	31.3	13.5	1.33	6.1
H L U-1	2.02	27.4	17.5	0.76	5.8
H L U-2	1.79	30.9	10.1	1.80	10.0

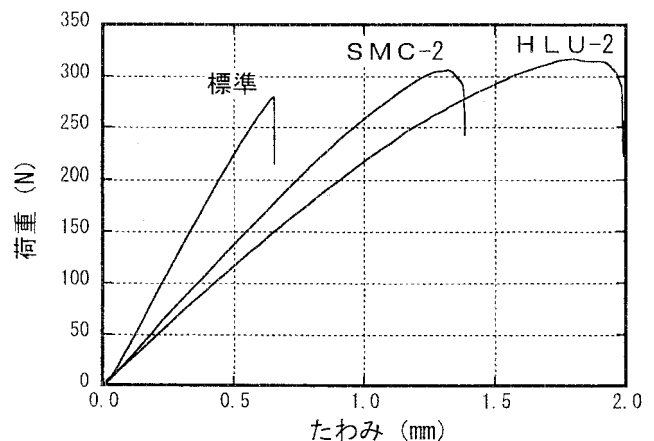


図11 曲げ試験の荷重-たわみ曲線

砕成物にガラス繊維が多く含まれるH L Uの方がより顕著に補強効果が現れたと考えられる。

これらのことより、SMCおよびH L U砕成物をR E Cの充填材として添加した場合、補強効果が認められ、その効果はH L U砕成物の方が高いことがわかった。

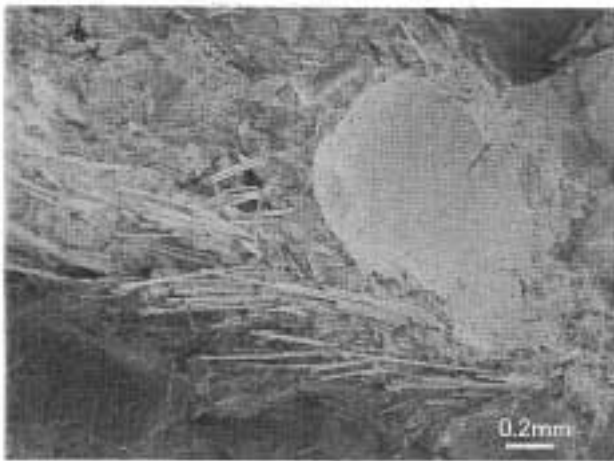


図12 HLU砕成物を配合したRECの衝撃試験後の破断面

4. FRP廃棄物リサイクル製品の試作

これまでの結果をもとに、FRP成形工場から発生するFRP廃棄物を再利用した製品を試作した。

図13に、FRP製品裏面の補強部材にSMC廃棄物を利用した浴室用防水パン(1200×800mm)の床断面のカットサンプルを示す。成形方法は、上下一対の成形型を用いた振動成形である。FRP防水パンは、床面の剛性を高めるため補強部材として木製合板などが使用されている。試作した成形品は、熱硬化性樹脂にSMC砕成物を充填した補強部材で、従来の合板より優れた曲げ剛性を有し代替材料としての機能を十分有することが明らかになった。さらに、木材と違いFRPと同一の素材であることから廃棄された場合の再資源化または処理が容易になることも期待できる。

次に、REC製マンホール蓋(φ450mm)について検討し



図13 試作した浴室用防水パンのカットサンプル

た。RECは、従来の骨材の組成に対してH L U砕成物を約20wt%置き換えた組成で試作した。その結果、既存設備での成形が可能であり、成形作業性も良好であった。

図14に載荷重試験の様子を示す。マンホール蓋の中央部分にφ150mmの硬質ゴムを介して毎分10mmの速さで負荷し破壊荷重を測定したところ、圧縮破壊荷重は既存製品と同程度であったが、製品重量が約15%軽量化されたことなどから、H L U砕成物を効果的に適用出来る再利用方法であると考えられる。

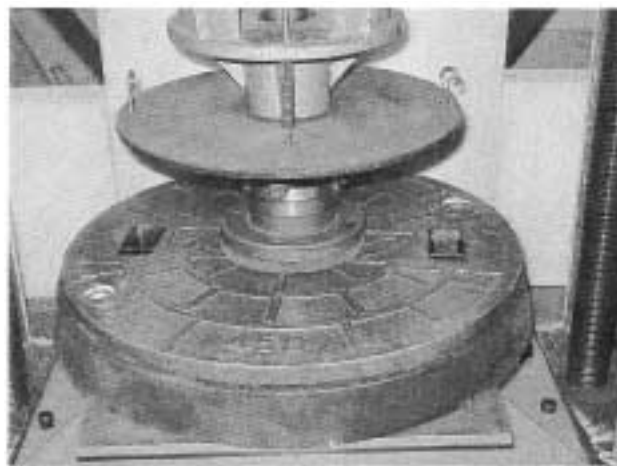


図14 試作したマンホール蓋の載荷重試験

5. まとめ

FRP廃棄物の再資源化を目的に、各種FRP廃棄物を粉碎し、その砕成物を熱硬化性樹脂およびレジンコンクリート(REC)の充填材として再利用する方法について検討を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) H L U砕成物は、砕成物サイズを小さくし、圧縮成形することによりUP樹脂の充填材として利用が可能と考えられる。
- 2) SMC砕成物は、圧縮成形では樹脂配合比率が30~50wt%で良好な樹脂成形体が得られた。また、振動成形では、砕成物のサイズを小さくすることにより成形が可能となり、その時の適正な樹脂配合比率は50wt%であった。
- 3) BMC砕成物は、UP樹脂の充填材として利用した場合、成形作業性に優れているが、得られた樹脂成形体の機械的特性が低く、砕成物の補強効果は期待できない事がわかった。
- 4) RECにSMCまたはH L U砕成物を20wt%まで添加しても、UP樹脂の配合比率を調節することにより、ホットプレスによる成形が可能であった。

5) RECにSMCまたはHLU砕成物を添加することにより、靱性の向上が図られるなどの補強効果が認められた。また、その効果は、SMC砕成物よりHLU砕成物の方が高かった。

以上、リサイクル率や成形方法などの制約はあるが、適切な成形条件を確立することにより強度特性などが優れたリサイクル成形品が得られ、FRP砕成物は十分に有効利用できることが確認された。

6. 引用文献

- 1) 大市貴志ほか：FRP廃棄物の再利用技術に関する研究（第一報）－FRP砕成物の特性－，北海道立工業試験場報告，No.299，pp.7－12，（2000）