

# 繊維補強発泡ウレタン (FFU) のリサイクルに関する研究

コンクリート研究室 松浦 将雄  
指導教官 丸山久一  
下村 匠  
日比野 誠

要旨：FFU (Fiber reinforce Foamed Urethane) と呼ばれる熱硬化性樹脂発泡体をガラス繊維で強化した高分子材料について、その切削廃材の再利用に関する検討を行った。FFU 端材を主材料として合成材料を作製、鉄道のまくら木への利用を目的として材料設計条件と曲げ強度の関係、短期・長期曲げ特性の検討、耐候性の検討を行った。主として結合樹脂の使用量、供試体の比重、チップの長さを検討要因として、曲げ強度との関係を考察した。その結果、チップが同様に配向された供試体の曲げ強度は、比重と樹脂量に影響されることが確認された。疲労強度は、荷重の繰り返し回数によって大きく低下し、耐候性では、浸水させると質量が増加し、曲げ強度は若干低下する傾向も認められた。

キーワード：FFU, リサイクル, 強度特性

## 1. はじめに

これまで、産業活動の進展に伴い多くの材料が開発・使用されてきた。近年は、加えて環境に対して、より負荷の少ない材料開発が行われている。しかし、どのような材料でも廃棄物として処分した場合、少なからず環境に負荷を与える。焼却による有毒ガスの発生、大量廃棄による処分場の減少等、最終処分には多くの問題を抱えている。

研究に使用した繊維補強発泡ウレタン (FFU) は、これまで、土木分野への利用方法として、グラウンドアンカー受圧板への適用<sup>1)</sup>や鉄筋コンクリート部材との接合方法の開発<sup>2)</sup>、リサイクルの研究では、セメントと組み合わせ、斜面安定に用いる受圧板の不陸調整材への適用に関する研究<sup>3)</sup>などが行われている。

本研究では、FFU 製造の際発生するチップ状廃材を焼却することなく、それを基本材料として、新たに人工木材を作製した。鉄道のまくら木として利用することを目的として、静的曲げ試験・疲労試験を行い、曲げ物性の検討を行った。特に、結合樹脂の使用量、チップ状材料の寸法、部材の比重をパラメータとして、曲げ強

度物性との関係について評価を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体作製方法

本実験では、使用済み FFU、および加工工程において切削くずとなる FFU 廃材を粉砕機によってチップ状に粉砕し、これに結合のための樹脂 (正式名称：ジフェニル メタン ジイソシアネート) を噴霧、型枠に詰めて高温・高圧下でプレスして供試体 (以下 RFFU) を作製した。供試体作製に使用した FFU の粉砕チップを写真 - 1 に示す。本研究では、寸法の異なる供試体を作製し、供試体 S・L とした。供試体の作製方法および寸法を表 - 1 に、供試体 S の寸法および試験方法を表 - 2 に示す。詳細については、本章の各検討要因において述べる。

表 - 1 供試体作製方法と寸法

	供試体 S	供試体 L
寸法 (mm)	L260×w260×t30	L500×w240×t30
プレス温度	180	180
プレス時間	15 分	15~20 分



写真 - 1 FFU 粉碎チップ

表 - 2 供試体 S の寸法および試験方法

寸法 (mm)	: L160× w30×t10	: L180× w20×t10
スパン (mm)	140	160
試験方法	3 点曲げ試験	
載荷速度	5mm/min	
参考試験方法	JIS Z 2101	

### 3 検討要因

#### 3.1 材料設計条件と曲げ強度の関係

##### (1) 樹脂の単位量

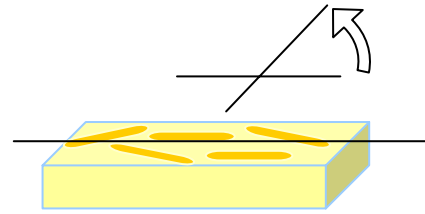
樹脂の単位量（以下、樹脂量）とは、供試体の全質量（FFU チップ質量 + 樹脂質量）に対する樹脂量である。本実験では、供試体に占める樹脂量として、0.05・0.07.5・0.10・0.15・0.20・0.25 (g/cm<sup>2</sup>) の 6 水準として供試体の作製を行った。式 (1) にチップ質量の算定式を、式 (2) に樹脂質量の算定式を示す。

$$\frac{\text{厚さ} \times \text{幅} \times \text{長さ} \times \text{見かけの比重}}{1000(1 - \text{樹脂の単位量})} \quad (1)$$

$$\frac{\text{厚さ} \times \text{幅} \times \text{長さ} \times \text{見かけの比重}}{1000 \times \text{樹脂の単位量}} \quad (2)$$

##### (2) 供試体の比重

供試体の比重は、作製した供試体の体積と質量から求めた。現段階では完全な比重の制御が困難であるため、供試体の作製前に見かけの比重を決定した。ここに、見かけの比重とは、作製される供試体の体積を一定として、供試体の



$$\text{チップ長さ} = L_i \cdot \cos \theta_i / N \quad (3)$$

図 - 1 チップ配向度

質量（FFU チップ質量 + 樹脂質量）を計算したものである。本実験では、見かけの比重は 1.0・1.1・1.2 の 3 水準を用いて供試体の作製を行った。

##### (3) FFU チップの向き・長さ

FFU は、熱硬化性樹脂発砲体をガラス長繊維で強化した異方性の材料である。そのため、チップの向きや長さによって供試体の強度は異なると推測される。そこで、本研究ではチップをできるだけ一定の方向に揃えるようにして供試体を作製して、表面を撮影し、チップの配向方向に対してチップの角度 (θ) を測定した。チップの角度 (θ) を数値化し、チップの向きおよび水平換算長さ（以下、チップ水平長さ）を計算した（図 - 1）。式 (3) にチップの水平長さの計算式を示す。表 - 2 より、θ はチップに平行・θ は直行方向に供試体を切断して曲げ試験を行い、チップの方向・水平長さとの関係について検討を行った。

#### 3.2 曲げ特性の検討

曲げ特性の検討では、供試体寸法と曲げ強度の関係を検討するため、寸法の異なる供試体 S・L を用いて静的曲げ試験を行った（表 - 1）。また、供試体の長期曲げ物性の評価として、供試体 L を用いて疲労試験を行った。疲労試験の載荷荷重は、静的曲げ試験の結果から比重と曲げ強度との関係について近似曲線を求め、終局荷重を予測、応力比から載荷荷重を決めて行った。疲労回数は 200 万回を上限として行った。

### 3.3 耐候性の検討

耐候性の検討では、供試体 S を用いて耐水性の試験を行い、浸水による供試体物性への影響を検討した。また、同寸法の FFU 材を用いて同試験を行い、質量や強度の変化について比較・検討を行うこととした。試験は水中に一定期間浸漬した後、軽く水をふき取り曲げ試験を行った。浸水による強度物性への影響、供試体体積および質量の各変化率の検討を行った。

## 4. 実験結果および検討

### 4.1 料設計条件と曲げ強度に関する実験結果および検討

#### (1) 樹脂の単位量

図 - 2 は、見かけ比重 1.1 で作製した供試体の樹脂量と曲げ強度の関係を示したものである。

図 - 2 より、樹脂量 0.1 以上において、平均の曲げ強度は 100 (MPa) 程度となった。サンプル数は 6 体としたが、強度のばらつきを比較すると樹脂量 0.15・0.2 で若干小さくなった。また、樹脂量 0.25 の場合は樹脂量が過剰であったために、供試体作製時に樹脂が型枠から漏れ、曲げ強度がばらついたと考察される。

#### (2) 供試体の比重

図 - 3 は、樹脂量 0.05・0.1・0.15 として作製した供試体について、見かけの比重と曲げ強度

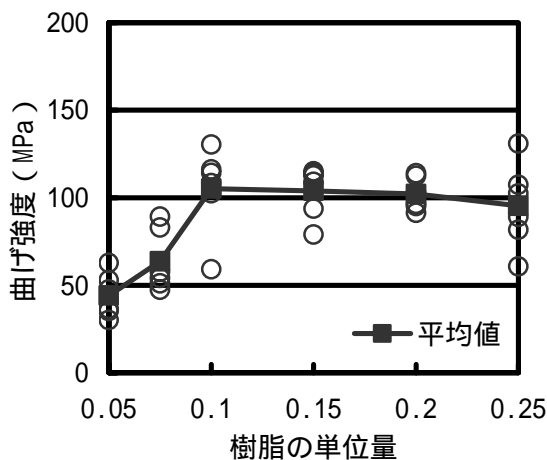


図 - 2 樹脂量と曲げ強度の関係 (見かけ比重1.1)

の関係を示したものである。図 - 4 は FFU チップと樹脂量の変動および曲げ強度を示したものである。X 軸は、供試体の樹脂量 - 見かけ比重である。

図 - 3 より、樹脂量 0.1 において最も高い強度が得られた。樹脂量 0.15 の場合、比重 1.1 付近で強度が最大となった。強度の変動原因は、供試体のチップと樹脂量に関係していると考えられ、図 - 4 より、今回の供試体作製においては、樹脂量 0.1・見かけ比重 1.2 のとき、最も多くのチップ量が供試体中に混入される。見かけ比重 1.1 の結果では (図 - 2)、樹脂量 0.1 以上混ぜても曲げ強度はほとんど増加しない。しかし、図

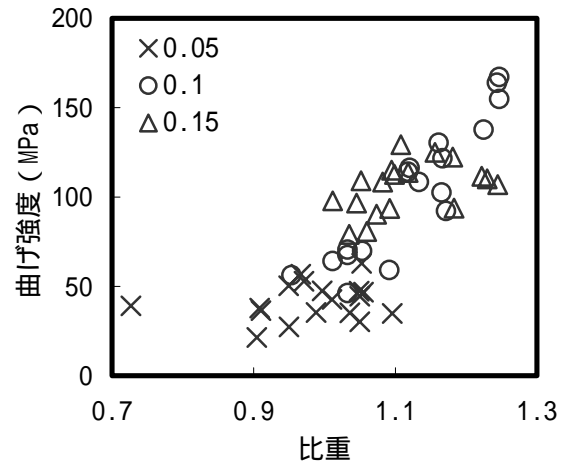


図 - 3 比重と曲げ強度の関係

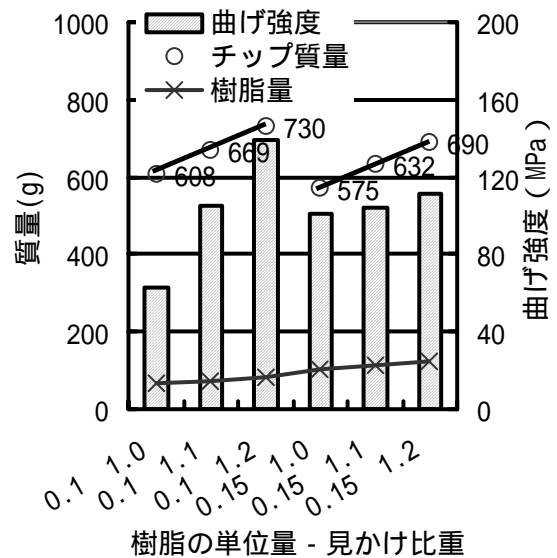


図 - 4 チップ量・樹脂量と曲げ強度の関係

- 4 ではチップ量の増加とともに曲げ強度は増加していることが分かる。以上の結果より、曲げ強度が 100 (MPa) 程度以上の場合、強度は供試体に含まれるチップ量に影響され、チップが増加することによって強度も増加していると考えられる。

### (3) チップの向き・長さ

図 - 5 は、樹脂量 0.075・0.15、見かけ比重 1.1 として作製した供試体のチップの平均水平長さ（以下、チップ水平長さ）と曲げ強度の関係を示したものである。

図 - 5 より、樹脂量による強度差はあるが、チップ水平長さによって曲げ強度は大きく異なる。樹脂量 0.15 では、チップ水平長さ 0.5 (cm) と 1.5 (cm) で 5 倍程度の違いがある。

チップ水平長さは、今回の計算方法では、荷重の載荷方向に直行する方向にチップが詰まっているほど長くなる。チップ長さが長いほど、チップによる荷重負担率が高くなり、短ければチップ間の樹脂による接着力によって荷重の負担が行われると考えることができる。実験結果から、チップを一定の方向に揃えて詰めることで曲げ強度は大きく増加することが分かった。

### (4) 曲げ強度と検討要因の相関性

供試体の曲げ強度は、検討要因 (1) ~ (3) の結果より、樹脂量・比重・チップの水平長さの全てに影響されることが分かった。そこで、

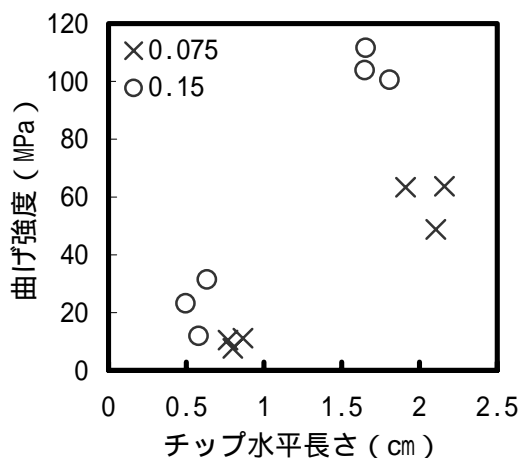


図 - 5 チップ水平長さとは曲げ強度の関係

表 - 3 重回帰分析の計算結果

	比重 X1	樹脂量 X2	チップ長さ X3	決定係数 R <sup>2</sup>
全結果	0.43	0.24	0.70	0.796
	0.71	0.37	-0.06	0.823
*	0.73	0.37		0.839

$$\text{曲げ強度} = \text{ }_0 + \text{ }_1 \cdot \text{X1} + \text{ }_2 \cdot \text{X2} + \text{ }_3 \cdot \text{X3} \quad (4)$$

これらの要因がどの程度曲げ強度に影響しているのかを検討するため、重回帰分析を行うこととした。検討要因を説明変数に、曲げ強度を目的変数として計算を行った。表 - 3 に重回帰分析の計算結果を、式 (4) に重回帰式を示す。

表 - 3 において、 $\text{ }_3$  はチップに直行方向に加重を載荷した試験結果、 $*$  は  $\text{ }_3$  の試験結果を比重・樹脂量の 2 つを説明変数として計算した結果である。表 - 3 の全結果より、荷重載荷方向が異なる供試体の曲げ試験結果を用いた場合、 $\text{X}_3 = 0.70$  となり、チップ水平長さによる強度への影響が最も大きい。しかし、チップ水平長さが同程度である供試体の試験結果だけを用いた計算結果 ( $\text{ }_3$ ) では、 $\text{X}_3 = -0.06$  となり曲げ強度には影響しない。その一方で、比重による曲げ強度への影響が大となる。 $\text{ }_1$  の試験結果を、説明変数として比重・樹脂量を用いて計算を行うと、 $*$  の結果は  $\text{ }_1$  とほぼ同じであった。この

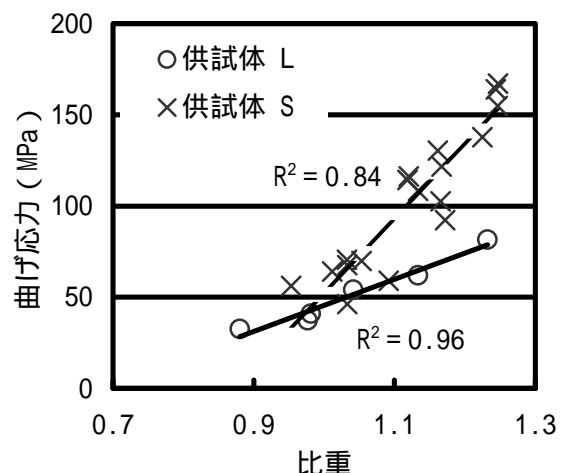


図 - 6 供試体寸法と曲げ応力

ことから、チップを同様に配向することによって、供試体の曲げ強度は比重と樹脂量に依存すると言える。

#### 4.2 曲げ特性に関する実験結果および検討

##### (1) 静的曲げ試験結果

図 - 6 は、供試体 L・S の曲げ試験結果である。樹脂の単位量は 0.1 とした。目視によって、曲げ試験での破壊は供試体 L・S とともに、引張側（供試体下部）で生じ、主にチップ間の剥離が原因であった。

図 - 6 より、供試体 S の近似曲線の傾きは、供試体 L よりも大きい。供試体寸法と曲げ強度の関係について、供試体寸法が小さい場合、チップがより繊維材料に近い挙動を示し、チップが荷重を多く負担すると考えられる。しかし、供試体寸法が大きくなることで、樹脂との結合部が多くなり、供試体耐力は樹脂とチップとの結合部分に依存することになる。また、今回用いた供試体 L は供試体 S より配向性が劣っていたこともあり、比重の増加による曲げ強度の増加率が低下したと考えられる。

##### (2) 疲労試験結果

図 - 7 は、供試体 L (R (Recycle) FFU) の疲労試験の結果である。樹脂量は 0.1 とした。ここに、応力比とは、疲労荷重を終局荷重で除した値である。

図 - 7 より、RFFU はコンクリート<sup>4)</sup>や FFU まくら木<sup>5)</sup>と比べて、疲労強度が小さい。RFFU は、静的曲げ試験において、終局荷重に達した後すぐに破壊に至っている。RFFU の破壊までのプロセスは、荷重の繰り返し载荷によってチップ間の剥離が徐々に増加し、挙動として、コンクリートの微細ひび割れの発生と同様の現象によって破壊が起こっていると考えられる。しかし、RFFU はコンクリートよりも剥離部分が多く、また、供試体中に空隙も多く存在するため、疲労強度が小さいと考えられる。

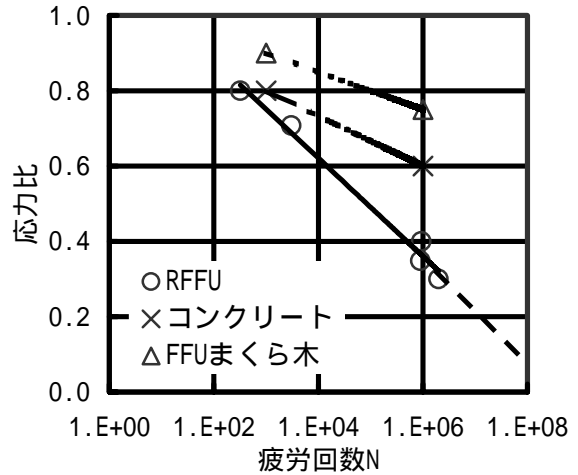


図 - 7 応力比と疲労回数の関係

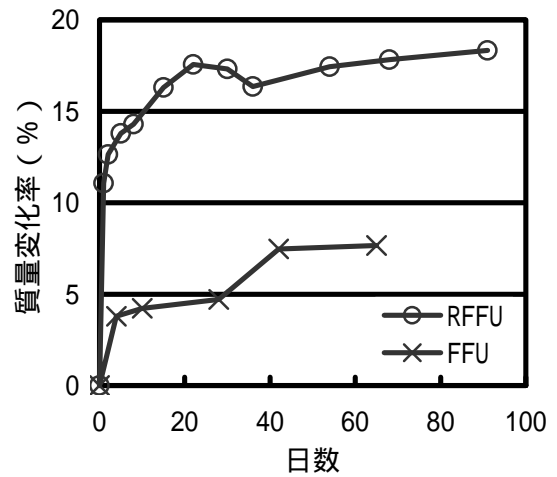


図 - 8 質量変化

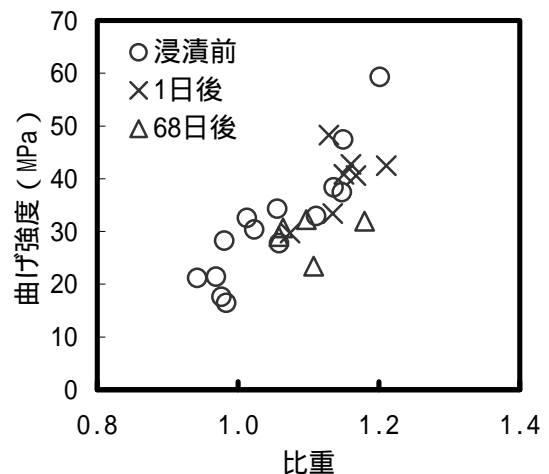


図 - 9 曲げ強度への影響

#### 4.3 耐候性試験の結果および検討

図 - 8 は、RFFU および FFU の浸水試験による質量変化の結果である。樹脂量は0.1とした。

図 - 8 より、浸水日数 60 日程度で質量変化率は一定となり、RFFU は FFU の 2 倍程度増加している。また、RFFU の寸法変化率は、厚さ方向が最も大きく、FFU は 0.5%であったのに対し、RFFU は 1.0%程度であった。この原因は、供試体の作製方法にあると考えられ、RFFU は上方向からのプレスによって作られるため、多くのチップが平状になり、吸水によって厚さ方向に大きな寸法変化を示す。また、チップの詰まり具合（比重）によっては部分的に空隙を生じるため、浸水によって吸水量が多くなり、FFU よりも大きな質量増加となった。しかし、浸水試験の測定 1 回目以降、質量変化率は RFFU・FFU とともに小さく、浸水直後に最も吸水し、その量は収束すると予想される 1/2 程度であると考えられる。

図 - 9 は、RFFU の浸水前および浸水後の曲げ試験の結果である。樹脂量は 0.1 とした。

RFFU は、比重が同程度であっても供試体間で強度のばらつきがある。そのため、単純に比重と強度の関係から比較することはできない。しかし、図 - 9 より、浸水によって曲げ強度はやや低下する傾向が見られた。また、浸水後 68 日の試験結果は、浸水前よりも強度のばらつきが大となる傾向が認められる。これは、供試体中のチップの形状分布が異なることと、チップの吸水の度合いが異なるため、強度の低下とばらつきが同時に生じた結果であると考えられる。

#### 5. まとめ

FFU 端材をチップ状に粉碎して、樹脂を噴霧し、高温・高圧下でプレスして合成材料を作製し、短期・長期の曲げ強度試験および耐候試験を行った結果、以下の結論が得られた。

- 1) 材料設計条件と曲げ強度の関係について、  
樹脂の単位量として 0.1~0.15 が適当である。  
比重の増加に伴って、曲げ強度は増加する。  
チップを一定の方向に配向することで曲げ強度は増加し、配向した供試体の強度は比重による影響が最も大となる。
- 2) 曲げ特性について、  
供試体の寸法が異なる場合、小であるほど比重の増加による曲げ強度の増加率は大きくなる。  
破壊の形態は、供試体 L・S とともに引張側のチップ間の剥離によって起こる。  
疲労強度は、コンクリートよりも小さい。
- 3) 耐候性について、  
60 日程度の浸水によって、重量変化率は FFU の 2 倍程度増加する。寸法変化率は、厚さ方向の変形が特に大となる。  
浸水によって、曲げ強度の低下および強度の不均一性の増加する傾向が認められた。

#### 参考文献

- 1) 橋本崇・青柳計太郎・丸山久一：FFU のグラウンドアンカー受圧板への適用に関する研究、土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集、pp244-245、1996
- 2) 深田和志・丸山久一・竹中計行：FFU 部材と鉄筋コンクリート部材の接合方法の開発およびその力学的挙動に関する研究、土木学会論文集、No.620/V-43、pp95-107、1999
- 3) 長谷川秀・岩井英夫・丸山久一：繊維状高分子廃棄物の再利用に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp337-342、2001
- 4) 河野清・田澤栄一・門司唱：新しいコンクリート工学、pp68
- 5) 積水化学工業株式会社 エスロンネオランバーFFU 総合技術資料：pp16