

論文 繊維補強発泡ウレタン (FFU) のリサイクルに関する研究

松浦 将雄^{*1}・斎藤 康宏^{*2}・丸山 久一^{*3}

要旨：本論文では，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の増加によって大きく低下し，耐水性試験において，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，曲げ特性

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¹⁾や鉄筋コンクリート部材との接合方法の開発²⁾，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³⁾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，これに樹脂を噴霧，型枠にチップを一定の方向に揃えて詰め，高温・高圧下でプレスして供試体 (RFFU) を作製した。この時，供試体が所定の厚さになるまでプレスを行った。表 - 1 に供試体の作製方法と寸法を示す。本研究では，供試体 S を小さく切断 (供試体) して曲げ試験を行い，チップの方向と曲げ強度の関係について検討を行った。写真 - 1 に供試体作製に使用した FFU チップを示す。表 - 2 に，供試体の寸法および強度試験の方法を示す。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 ×t10	L500×w240 ×t30
プレス温度	180	180
プレス時間	15 分	15~20 分

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 積水化学工業株式会社 環境・ライフカンパニー 京都研究所商品開発センター

*3 長岡技術科学大学教授 工学部 環境建設系 Ph.D (正会員)



写真—1 FFU チップ

表 - 2 供試体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

材料設計の検討では、供試体(表 - 2 の) を用いて試験を行い、曲げ強度に影響すると考えられるパラメータ(1)～(3)の検討を行った。また、これらの実験結果を用いて重回帰分析を行い、それぞれの要因が供試体強度にどの程度影響しているのか考察を行った。試験は、曲げ強度試験を行い各パラメータと曲げ強度との関係を検討した。

(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 チップの質量+樹脂の質量)に対する樹脂の質量である。本実験では、供試体に占める樹脂量として、0.05・0.075・0.10・0.15・0.20 および 0.25 の 6 水準として供試体の作製を行った。樹脂の正式名称はジフェニル メタン ジイソシアネートである。式(1)にチップの質量(g)、式(2)に樹脂の質量(g)の算定式を示す。

$$\text{チップ (g)} = \frac{\text{厚さ} \times \text{幅} \times \text{長さ} \times \text{見かけ比重}}{1000(1 - \text{樹脂量})} \quad (1)$$

$$\text{樹脂 (g)} = \frac{\text{厚さ} \times \text{幅} \times \text{長さ} \times \text{見かけ比重}}{1000 \times \text{樹脂量}} \quad (2)$$

(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は一定として、供試体作製時のチップおよび樹脂の質量を決める場合に用いた比重である。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曲げ強度は異なると考えられる。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)を三角関数で数値化し、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、はチップに平行、は直行方向に供試体をカットして曲げ試験を行い、チップの方向と水平長さとの関係について検討を行った。

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

図 - 1 チップ配向度

3.2 曲げ特性の検討

力学的特性の検討では、供試体 L を用いて試験を行った。試験は、短期物性の評価として(1)

静的曲げ試験を，長期物性の評価として（２）疲労試験を行った。試験のスパンは 420mm とした。疲労試験の載荷荷重は，静的曲げ試験の結果から終局荷重を予測して求めることとした。疲労回数は 200 万回を上限として行った。

3.3 耐水性の検討

本検討では，供試体 S を用いて耐水性の試験を行った。また，比較として，RFFU と同寸法の FFU 材を用いて同じ試験を行い，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，その後曲げ試験を行い，強度物性の評価を行った。試験では，体積および質量の各変化率の検討を併せて行った。

4. 実験結果

4.1 材料設計条件に関する実験結果

（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 が若干小さくなった。また，樹脂量 0.25 の場合は樹脂量が過剰であったために，供試体作製プレス時に樹脂が型枠から漏れ，その結果強度のばらつきが大きくなったと考えられる。

（２）供試体の比重

図 - 3 は，樹脂量 0.05・0.1・0.15 のそれぞれについて，供試体の実比重と曲げ強度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 軸には供試体の樹脂量 - 見かけ比重を表示している。

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。図 - 4 より，今回の供試体作製において，樹脂量 0.1・見かけ比重 1.2 のときに最も多くのチップを使用し，強度も

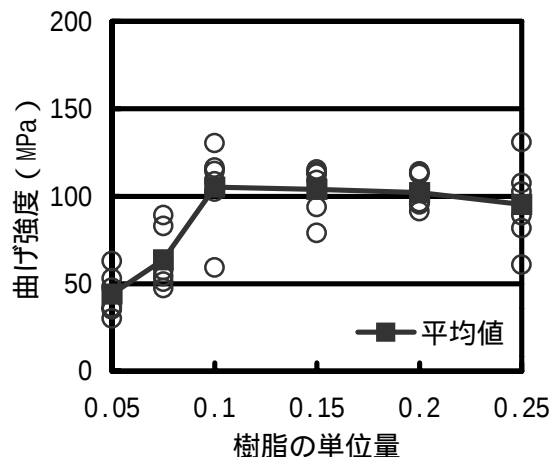


図 - 2 樹脂量と曲げ強度の関係
(見かけ比重 1.1)

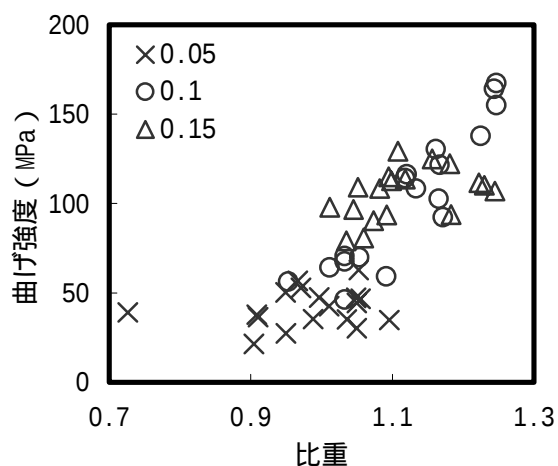


図 - 3 比重と曲げ強度の関係

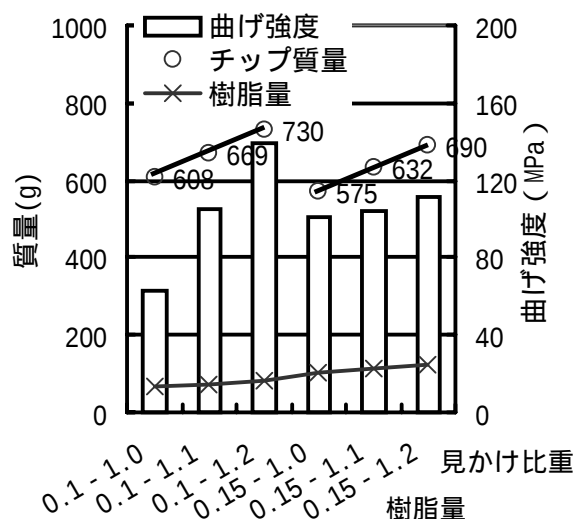


図 - 4 チップ量・樹脂量と
曲げ強度の関係

最大となった。また、チップ量の増減と曲げ強度の変動を比較すると2つは同様の挙動を示していることが分かる。以上より、強度の変動はチップ量と樹脂量の配合割合に関係すると考えられる。比重の増加によって強度も増加するが、樹脂量を多くすることでチップ量が減少し、比重の増加に伴う強度の増加率は低下する。本実験において、樹脂量 0.1 として見かけ比重を増加させることで、比重の増加に伴う強度の増加が最も顕著に認められた。

(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 の場合、チップ水平長さ 0.5 (cm) と 1.5 (cm) では曲げ強度は 5 倍程度異なる。

チップ水平長さは、今回の計算方法では荷重により発生する主引張応力の方向にチップが配向されているほどチップ水平長さが長くなる。チップ水平長さが長いほど、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

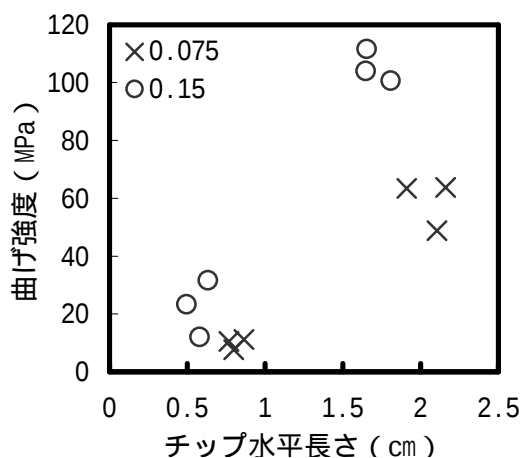


図 - 5 チップ水平長さと曲げ強度の関係

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	相関 係数 R ²
全結果	0.40	0.29	0.68	0.796
	0.73	0.37	- 0.02	0.823
*	0.73	0.37	—	0.839

$$\text{曲げ強度} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot X1 + \alpha_2 \cdot X2 + \alpha_3 \cdot X3 \quad (4)$$

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、(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、これらの要因がどの程度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、はチップに直行方向に荷重を載荷した試験結果、*はの試験結果を比重・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、 $X_3 = 0.68$ 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を用いた計算結果 () では、 $X_3 = - 0.02$ 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。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、*の結果はとほぼ同じであった。このことから、チップ水平長さが同程度である供試体において、供試体の曲げ強度は、比重と樹脂量によって決定されることが分かる。

曲げ特性に関する実験結果

(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。

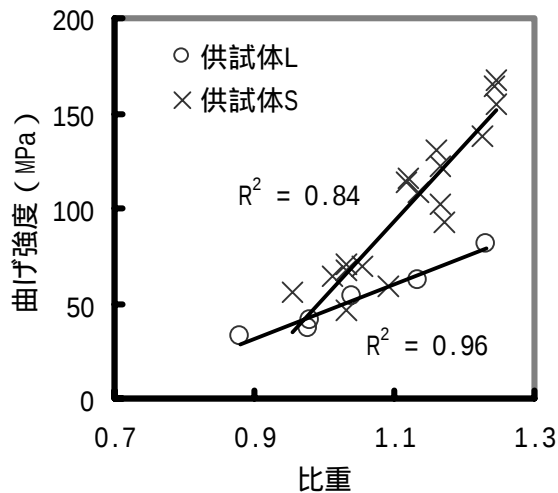


図 - 6 供試体寸法と曲げ強度の関係

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。また，曲げ試験の結果，供試体の破壊は L・S とともに，引張部（供試体下部）のチップ間の剥離によって生じた。

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，荷重を多く負担すると考えられる。しかし，チップの長さはほぼ一定であるため，供試体寸法が大きくなることでチップ同士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影響し，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 (RFFU) 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，疲労载荷荷重をその供試体の推定終局荷重で除した値である。

図 - 7 より，RFFU はコンクリート⁴⁾や FFU まくら木⁵⁾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破壊が起こっており，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であると考えられる。しか

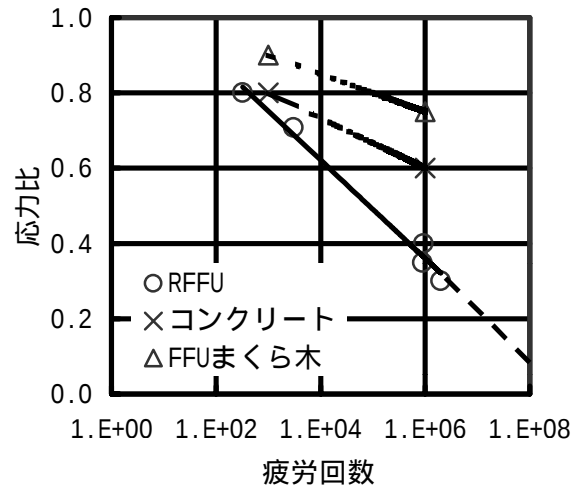


図 - 7 応力比と疲労回数の関係

し，RFFU は剥離部が大きく，加えて，供試体中に空隙も多く存在するため，コンクリートよりも疲労強度が小さいと考えられる。

4.3 耐水性試験の結果

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る。そのため，吸水によって厚さ方向に大きな寸法変化を示すと考えられる。

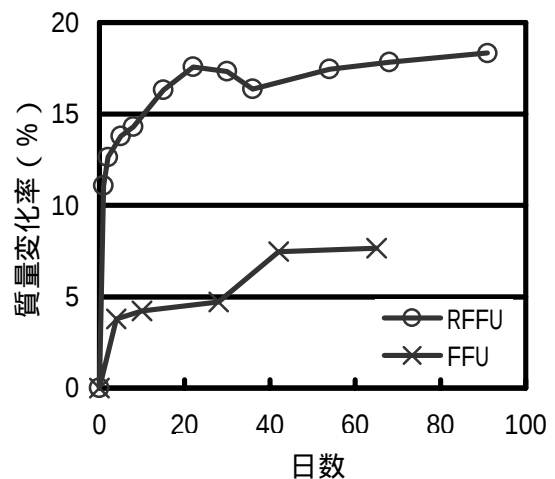


図 - 8 質量変化

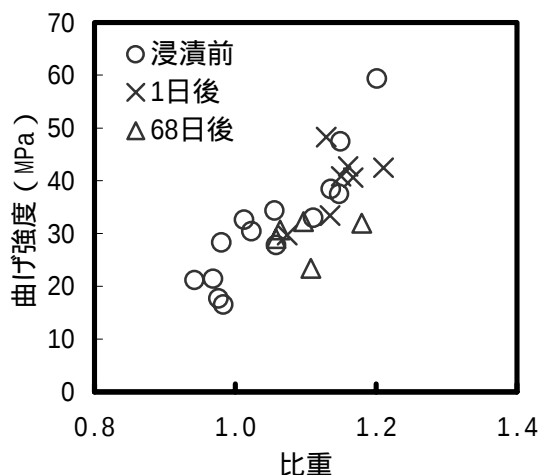


図 - 9 浸水前後の比重と曲げ強度の関係

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（図 - 3）。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、同一比重の供試体を比較すると、浸水させることで強度に低下する傾向が認められ、浸水 68 日後の強度は浸水前よりも 10% 程度低下していた。また、浸水 68 日後の試験結果は、浸水前に結果よりも同一比重における強度差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水性試験を行った結果、以下の結論が得られた。

1) 供試体の設計条件について、

強度および経済性を考慮すると、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) 耐水性について、

60 日程度の浸水によって、質量変化率は 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、曲げ強度は低下する傾向が認められる。

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，pp68，1994
- 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：pp16，2002