

# ガラス繊維強化フェノールフォームをコアとするサンドイッチはりの特性評価

邊 吾一 (機械工学科), 南条尚志 (日東紡績株)

## 1. 緒言

フェノール樹脂は、電気絶縁性、耐高温性、難燃性、低発煙性、低価格などの特徴が上げられる。応用分野としては、木工産業、断熱材、成形材料として多く用いられてきた。しかし、熱硬化性のレゾール型フェノール樹脂は、強化繊維への含浸を十分に行うためには粘度が高く、水または溶剤を加えて粘度調整するばかりでなく、成形時に縮合水が生成される。この水分が硬化時に蒸発し、マトリクスに微小なボイドとなって残るといった問題があり、樹脂の改質や、薄板での引抜成形条件の検討などが行われている。そこで、逆の発想から母材を発泡させたフェノールフォームとし、連続ガラス繊維を強化材としたフェノールフォーム複合材料 (以下PFC) の引抜成形法を確立してきた。このPFCは軽量で衝撃吸収、断熱性に優れ、熱・炎に強く、加工性としては、木材のように切ったり、釘やネジで接合したりすることも可能な新素材<sup>1)</sup>である。

また、機械的性質の向上、表面美麗性の改善、難燃特性の向上を目指してPFCをコア材とし、薄層のフェノールGFRPあるいはCFRPを表板に使用したサンドイッチはりの成形する手法を開発した。ここで示すPFCをコア材とするサンドイッチはりは、一般のフォームコアのものとは比べ強度・剛性が高く、軽量で難燃性の高い構造部材として、建築、車両、船舶など、災害が起こった際、逃げ道の選択が限定されてしまうような閉鎖空間や様々な分野での利用が期待される。

## 2. 成形法の概要

本研究室はこれまで、通常の引抜成形法を基礎に、発泡体を母材としFRP成形に適する成形技術

の開発<sup>2)</sup>を行ってきた。一般的な引抜成形法は、連続繊維を強化材とし、母材となる樹脂に含浸後、金型内で加熱硬化させ、引抜く成形法である。したがって、引抜方向に対して一定の断面形状を有し、任意の長さの成形部材を得ることが可能となっている。PFCの成形の場合は、樹脂に発泡剤と硬化剤を連続的に混合・供給し、金型の温度制御によって発泡・酸硬化させて成形している。試作成形品では、バルキーロービングを使用(Vf=6%)して、引抜成形を行った。金型断面の寸法は52mm×32mmである。

本研究では、このPFCをサンドイッチ材のコア材とし、コア材の金型後方に2組のロービングガイドと表板成形用金型を設け、繊維の種類をガラス繊維あるいは炭素繊維に変えることでフェノールGFRPとCFRPを表板としたサンドイッチ材の一体成形技術を確立した。母材は共にレゾール型フェノール樹脂であるが、コア材が酸硬化であるのに対して、表板は熱硬化による成形である。表板の厚さは0.5mmになるように設計した。

つまり、PFCがコア材、表板がフェノールGFRP、あるいはCFRPのサンドイッチ材が同一ライン上かつ接着工程なしで成形可能となった。

本研究で試作設計した成形装置をFig.1に、また成形条件をTable1に示す。

Table1 Molding conditions

	PFC	GFRP	CFRP
Molding method	Pultrusion (Impregnation jig)	Pultrusion (Resin bath)	Pultrusion (Resin bath)
Reinforcement	Glass fiber (Bulky roving)	Glass fiber (Yarn)	Carbon fiber (Roving)
Matrix	Phenolic resin (with foaming agent)	Phenolic resin	Phenolic resin
Curing method	Acid cure	Heat cure	Heat cure
Die temperature	75°C (max)	180°C (max)	180°C (max)
Content of reinforcement	6vol%	56vol%	53vol%

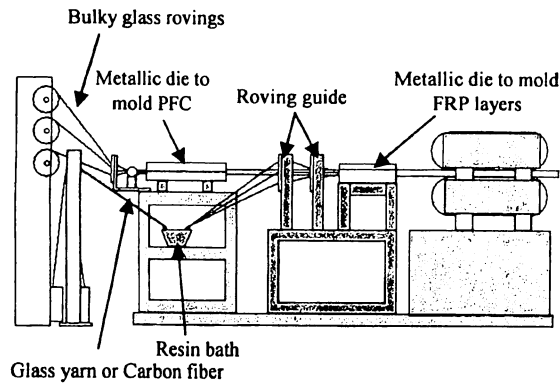


Fig.1 Pultrusion facilities

### 3. 成形品

成形法により試作したGFRP表板サンドイッチはり（以下SWPFC[GFRP]）とCFRP表板サンドイッチはり（以下SWPFC[CFRP]）をFig.2 に示す。表面層はガラス繊維および炭素繊維ともに平滑であり表面美観性が良い結果となった。表板は繊維が一方向に配列しているため、繊維色と樹脂色から、特にガラス繊維の場合は木目のような様相が得られる。

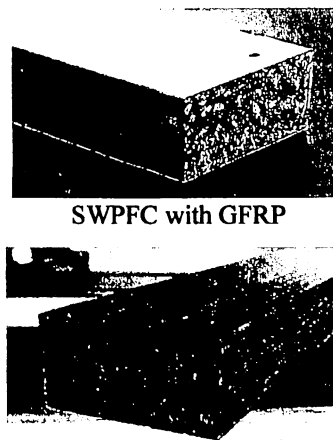


Fig.2 Appearances of SWPFC

### 4. 高温環境下における圧縮特性

#### 4.1 試験片

試験片はフェノールフォーム複合材 (Vf=6%) と、フェノールフォーム複合材は木材のように扱えるので比較として杉と2種類を準備した。また、繊維方向と、繊維方向に対して垂直方向にそれぞれ圧縮試験を行うため試験片寸法は2種類作成

した。試験片端部は面外の変形を拘束するため、3M社製の耐熱アルミテープ(幅9mm)を巻いた。

#### 4.2 試験方法

圧縮試験は島津製作所(株)製オートグラフを使用し、恒温槽の雰囲気温度は室温、100℃、200℃の3種類とした。試験法は繊維方向および繊維に垂直方向の2種類とし、共に試験片を槽内にセットし約10分経過後、槽内温度が条件温度の±0.2℃以内の範囲で、試験速度を1.0[mm/min]として圧縮試験を行った。

#### 4.3 試験結果

まず、繊維方向に対しての圧縮試験の結果をFig.3, Fig.4 に示す。杉は高温環境になるほど、比強度、比剛性ともに急激に下がり、室温に比べ200℃の時は50%近くそれぞれ低下した。特に杉は室温から100℃の時の低下が大きかった。一方、フェノールフォーム複合材の場合の値は若干低いものの、杉に比べ急激な変化は見られなかった。

次に、繊維に対し垂直方向の圧縮試験の結果をFig.5, Fig.6 に示す。繊維に垂直方向の圧縮の場合、母材の発泡体が徐々につぶれるような破壊が起こり、応力は急激に低下しないが、はじめのピーク値を圧縮強度とした。また、環境温度の変化に対するフェノールフォーム複合材の圧縮特性については繊維方向、繊維垂直方向で大きな違いはない。以上の結果より温度環境が変わってもフェノールフォーム複合材の強度と剛性は安定していることが明らかになった。

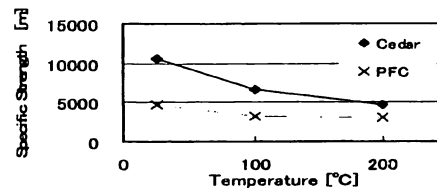


Fig.3 Longitudinal strengths under temperatures

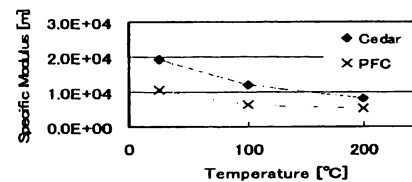


Fig.4 Longitudinal modulus under temperatures

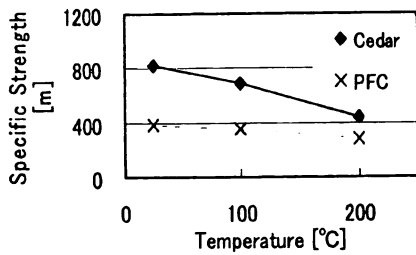


Fig.5 Transverse strengths under temperatures

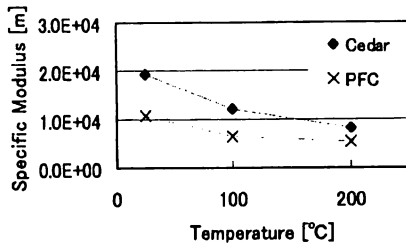


Fig.6 Transverse modulus under temperatures

## 5. 熱伝導率試験

### 5.1 試験片

試験片はPFC, SWPFC(GFRP), SWPFC(CFRP)の3種類を用いて作成した。試験片サイズは成形品を並べて接着し 200mm×200mmとなるように切り出し、熱伝導率測定装置HC-072を用い、試験時間を約10分として行った。

### 5.2 試験結果

熱伝導率の結果をTable2に示す。測定値はPFC, SWPFC(GFRP)は0.06[W/mk]付近での値で大差はみられなかった。SWPFC(CFRP)の値がSWPFC(GFRP)より高い値を示したのは炭素繊維がガラス繊維より熱伝導率と大きいためだと思われる。

熱伝導率は小さい程、断熱性能が高いことを示し、3種類とも断熱性能はほぼ等しく十分に高いといえる。

Table 2 Thermal conductivity

Thermal conductivity	
	Thermal conductivity [W/mk]
PFC	0.0610
SWPFC(GFRP)	0.0601
SWPFC(CFRP)	0.0673

## 6. 燃焼試験

### 6.1 試験片

試験片は熱伝導率試験と同様にPFC, SWPFC(GFRP), SWPFC(CFRP)の3種類を用い、

それらの試験片は成形品を並べて接着し、100mm×100mmに切り出した。試験装置は燃料分析システムコーンカロリメーターⅢを使用し、試験時間は20分間で行なった。

### 6.2 試験結果

試験片それぞれについて、試験開始からの発熱速度(H.R.R)をFig.7, 総発熱量(T.H.R)をFig.8, 質量の各変化(Mass)をFig.9に示す。

PFCは開始60秒で着火したが、試験片3種類の中で最も着火時間が早かったため、総発熱量43.06[MJ/m<sup>2</sup>], 質量減少率18%, とともに一番高い数値を表した。SWPFC(GFRP)は、着火時間は試験開始96秒後に着火し、質量は12%低下した。SWPFC(CFRP)は、試験開始70.7後に着火し、質量は14%低下した。着火時間と試験後の質量低下率で3種類の試験片を比較すると、SWPFC(GFRP)が一番低い結果を示した。着火までの過程はPFCの一部から発煙し、その煙で全体が着火するという傾向だった。サンドイッチ材となるSWPFC(GFRP)とSWPFC(CFRP)の表板はコア材に比べて繊維含有率が高く、フタの役割をしたため、表面に発煙させる時間を遅らせることによって、着火時間を遅らせることができたと考えられる。

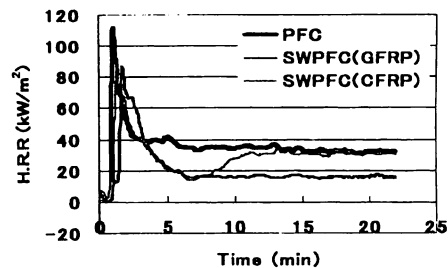


Fig.7 Heat Release Rate VS. time

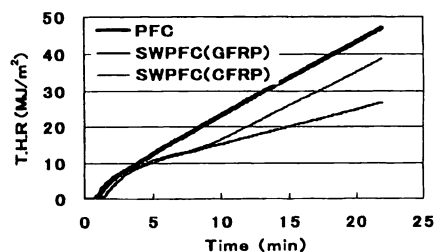


Fig.8 Total Heat Release VS. time

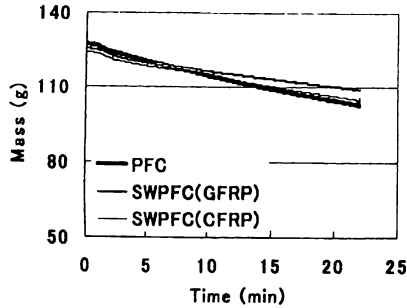


Fig.9 Mass VS. time

### 7. 曲げ試験

表板のないPFC, SWPFC(GFRP), SWPFC(CFRP)の3種類で3点曲げ試験を行った。せん断応力で破壊しないよう十分に支点間距離を取り試験を行った。試験では荷重とりの中央下部にダイヤルゲージを用いてたわみを検出した。

試験によって得られた曲げ弾性率, 破壊応力をTable3に示す。サンドイッチ材は, PFC単体よりも, SWPFC(CFRP)とSWPFC(GFRP)の破壊応力は共に約4倍向上した。曲げ弾性率はそれぞれ1.8倍, 3倍向上した。

さらに, サンドイッチはりの曲げ剛性について, 理論値と実験値との比較検討を行なった。曲げ剛性の理論値と実験値を比較した結果をFig.10に示す。同図より, PFCをコア材としたサンドイッチ梁の曲げ剛性は, SWPFC(CFRP)とSWPFC(GFRP)共に複合梁の理論式によって算出した値とよく一致<sup>3)</sup>した。

Table3 Results of bending test

	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Modulus of Elasticity [GPa]	Bending strength [MPa]
PFC	0.40	4.95	14.8
SWPFC (GFRP)	0.44	8.83	63.5
SWPFC (CFRP)	0.42	14.58	65.7

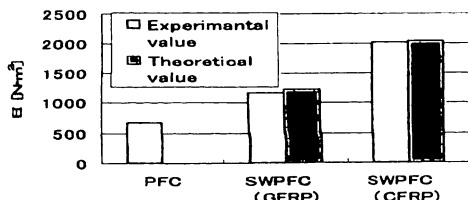


Fig.10 Comparisons of experimental values with theoretical ones for bending rigidity

### 8. 破壊様相

曲げ試験時の破壊の様子をFig.11に示す。PFC, SWPFC(GFRP), CFRP SWPFC(CFRP)ともに, 圧縮側で破壊が見られた。

特にサンドイッチ材は圧縮側中央部付近から表板が剥離し, コア材を付着させたまま, 持ち上がるような状態が見られ, 表板が波を打つように座屈破壊が見られた。このことから特に, CFRP材は表板の特性を完全には発揮しきれずに破壊したと考えられる。

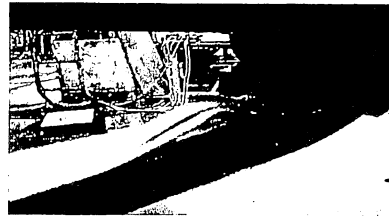


Fig.11 Fracture mode

### 9. 結言

ガラス繊維強化フェノールフォーム (PFC) の成形後, PFCをコア材とし, その上下面にフェノールGFRPあるいはCFRPを接着しないで置いただけで, サンドイッチ材の一体成形が引抜き法により可能となった。

環境温度の変化に対するフェノールフォーム (PFC)の圧縮特性については, 繊維方向, 繊維垂直方向共に, 比強度, 比剛性ともに安定している。

PFCおよびサンドイッチ材の熱伝導率は0.06W/mK付近を示し, 大差は見られなかった。

繊維含有率の高いフェノールFRPを有するサンドイッチ材の難燃性能はPFCよりも向上した。

サンドイッチ材は, PFC単体よりも, 破壊応力はSWPFC(CFRP)とSWPFC(GFRP)ともに約4倍向上した。曲げ弾性率はそれぞれ1.8倍, 3倍向上した。さらに, サンドイッチ梁の曲げ剛性はサンドイッチ梁の理論値とよく一致した。

### 10. 参考文献

- 1) 邊吾一他, 「材料」第52巻, 第11号 (2003)
- 2) G. Ben, A. Shoji, ACM, Vol.14, No3, (2005)
- 3) M. Soma et al, Proc.JISSE9 2009(CD Rom Ver.