GRP/PUF/Al サンドイッチ板の曲げ強度特性*

宮 入 裕 夫** 永 井 正 洋*** 村 松 篤 良**

Flexural Properties of GRP/PUF/Al Sandwich Construction

by

Hiroo MIYAIRI, Masahiro NAGAI and Atsuyoshi MURAMATSU

(Institute for Medical and Dental Engineering, Tokyo Medical and Dental University, Tokyo)

Recently, fiber reinforced plastics (FRP) are being widely used as the elements of sandwich constructions. Such sandwich constructions are superior in improving flexural rigidity as well as making laminated structures. However, few fundamental studies have been carried out on the sandwich constructions composed of plastic materials, and their mechanical and functional properties remain unclear.

The present paper examines the mechanical properties of an unsymmetrically laminated sandwich construction which is composed of the polyurethane form (PUF) as the core material and aluminium (Al) and glass mat FRP (GRP) as the facing materials so as to enhance hybrid effectiveness. Particularly, the basic problems associated with flexural properties of the sandwich construction GRP/PUF/Al, such as the behaviors of flexural fracture, and the test methods of laminated construction are examined. Two types of flexural tests are carried out by using three and four point loading systems and the results are treated theoretically as well as experimentally to clarify the characteristics of the sandwich construction in which the core material has comparatively lower elastic modulus than the facing materials.

(Received Oct. 19, 1976)

キー・ワード：曲げ試験法，破壊の様相，ひずみ測定，曲げ剛性，軽構造メリット

1 緒 言

軽量構造材料としてアルミニウムは古くから用いられているが、最近ではガラス、カーボン、ボロンなどの優れた強化繊維の出現、発達により、これらとプラスチックマトリックスとの組み合わせによる繊維複合材料 (FRP) が広い領域に使用されており、軽量構造材料としての用途を拡大しつつある。^{1)~3)}しかしこれらの複合材料も、とくにガラス繊維を強化材としたものは、曲げ特性の要求される構造要素などの設計では金属材料に比較し曲げ剛性の極めて低いことが欠点となっており、用途によっては複合構造などを指向した新しい技術の開発に検討が加えられている。^{4)~7)}

そこで、曲げ剛性の向上に効果のある手段として、構造強度および機能開発などから近年とくにサンドイッチ構造が取上げられている。^{8)~10)}サンドイッチ構造は決して新しいものではないが、剛性の向上に優れた特性

を発揮し、複合構造として成形性にも優れているので、とくに最近では新しいフォーム材などの軽量心材を用いることによりこのような構造は一層活用されるようになってきている。しかも、軽量構造として遮音、遮熱性などの優れた機能特性を発揮できる構造であることから多機能化をめざす複合構造としても高く評価されている。^{11)~14)}

本報は、このようなサンドイッチ構造として力学的特性のみならず機能特性をも考慮した非対称構造のサンドイッチ板について、曲げ強度特性を検討したものである。サンドイッチ板の構成は、心材にポリウレタンフォーム (PUF) 材を、表面材にアルミニウム (Al) とガラスマット FRP (GRP) を用いたもので、ハイブリッド効果を指向した GRP/PUF/Al 積層板としたものである。また、GRP/PUF/Al サンドイッチ板の破壊強度特性としては複合構造で難しい曲げ変形、破壊挙動などに関する基礎的な問題と、複合構造に関する軽量性について検討した。曲げ試験は3点曲げ、4点曲げ試験法を採用し、それぞれの結果に対し、理論的、実験的な検討を加えたもので、とくに表面材に比

* 原稿受理 昭和51年10月19日

** 正 会 員 東京医科歯科大学医器材料研究所

東京都千代田区神田駿河台

*** 東京医科歯科大学医器材料研究所 東京都千代田区神田駿河台

べ弾性係数の低いフォーム材を心材としたサンドイッチ構造について基礎的な検討を行った。

2 試験片および試験方法

GRP/PUF/Al は Fig. 1 に示されるように板厚 $h_0 = 20$ mm のポリウレタンフォーム (PUF) を心材とし, 両表面には板厚 $h_g = 1.25$ mm のガラスマット FRP (GRP), 板厚 $h_A = 1.5$ mm のアルミニウム (JIS A1 P1-1/2H) の異なる 2 種類の表面材により構成される非対称構造のサンドイッチ板である。

曲げ特性は試験法による影響を考え, Fig. 2 に示した 3 点曲げおよび 4 点曲げ試験片を用い, Fig. 3 に示

Fig. 1. Stress distribution and dimension of GRP/PUF/Al

3-point flexural specimen

4-point flexural specimen

Thickness : 23.5 mm

Fig. 2. Flexural specimens of GRP/PUF/Al.

Fig. 3. Positions of strain gages.

したそれぞれの試験法により行った。曲げ試験はインストロン形万能試験機 (IS-5000 形) を用い, 負荷速度はクロスヘッド移動量で 5 mm/min とした。

曲げ試験による試験体のひずみ測定は荷重-たわみ ($P-\delta$) 線図の弾性範囲内で, (3 点曲げでは $P=30$ kg, 4 点曲げでは $P=40$ kg) 試験体の変形および中立軸の位置を確認するために行ったもので, Fig. 3 にそれぞれのひずみゲージでん付位置を示した。ひずみの計測は動的ひずみ測定器 (共和電業社製 DPM-6E) を用い, 電気抵抗線ひずみゲージのゲージ長は 10 mm として曲げ変形によるひずみ変化を連続的に測定した。

3 GRP/PUF/Al 積層板の応力および剛性

非対称構成のサンドイッチ板の曲げ変形は曲げモーメント M をうけると, Fig. 1 に示されるように, 板厚面の応力は弾性範囲内でひずみに比例し, また中立軸からの距離に比例して直線的に変化する。しかし, 中立軸は非対称積層のため, 図心とは一致せず, GRP と PUF との界面より h_0 なる距離に位置し, h_0 は当然基材構成と各層の板厚とに依存する。

Table I はサンドイッチ板を構成する各基材の機械的特性を示したもので, E_b は曲げ弾性係数を, σ_y , σ_b は曲げによる降伏値と破壊強度を示したものであ

Table I. Flexural properties of facing GRP, aluminium and core PUF.

Properties Specimens	E_b (kg/mm ²)	σ_y (kg/mm ²)	σ_b (kg/mm ²)
GRP	510	17.1	19.1
Aluminium	7000	16.4	22.4
PUF	0.820	0.021	0.035

る。このとき表面材 GRP, Al の縦弾性係数 E_g , E_A に比べ, 心材 PUF の E_F は極めて小さいので, PUF 部の曲げモーメントの負担を無視すると, 中立軸 h_0 ははり理論を用い, 次のように求められる。

$$h_0 = \frac{E_A h_A (h_A + 2h_c) - E_g h_g^2}{2(E_A h_A + E_g h_g)} \quad (1)$$

また表面材に生じる垂直応力分布は Fig. 1 のように与えられ, ここで各表面材に生じる最大曲げ応力はそれぞれ次のように求められる。

Al 部の最大垂直応力 σ_A は

$$\sigma_A = \frac{E_A (h_c + h_A - h_0) M}{D} \quad (2)$$

となり, GRP 部の最大垂直応力 σ_g は

$$\sigma_g = -\frac{E_g (h_g + h_0) M}{D} \quad (3)$$

となり, D は表面材の曲げ剛性として,

$$D = E_A I_A + E_g I_g \\ = \frac{b E_A}{3} \{ (h_A + h_c - h_0)^3 - (h_c - h_0)^3 \}$$

$$+ \frac{bE_g}{3} \{ (h_g + h_0)^3 - h_0^3 \} \quad (4)$$

ここで, $I_A \cdot I_g$: 各表面の断面 2 次モーメント

b : サンドイッチ板の板幅

である.

4 サンドイッチ板の曲げ強度特性

非対称構成のサンドイッチ板 GRP/PUF/Al の曲げ特性は, 表面材の力学特性に著しく関与し, 負荷方法の影響をかなり受ける. そこで, 試験結果を, 負荷方法によってアルミニウム部を引張側とする Type I と圧縮側とする Type II との二つに分け, それぞれについて曲げ試験を行った.

また, 曲げ強度特性は, サンドイッチ板の弾性挙動として曲げによる表面材のひずみ測定結果および曲げ破壊試験による破壊特性について検討した.

4.1 曲げ荷重-たわみ線図

Fig. 4 はサンドイッチ板の曲げ荷重-たわみ ($P-\delta$) 線図を示したもので, 荷重点および支持部は Fig. 3

(a) 3-point loading system

(b) 4-point loading system

Fig. 4. Relation between load and deflection of GRP/PUF/Al, where deflection is shown as the moved distance of loading noses.

に示した位置として, たわみ測定位置は図に示したとおりである.

Fig. 4 (a)は 3 点曲げ試験の結果を示したもので, 最大荷重は Type I と II とで相違がみられ, このときの試験片の破壊は両者ともに圧縮側表面材の荷重点で生じる. このように最大荷重に相違の生じた理由は表面材に起因し, ここで Type I を考えると, GRP の弾性係数は Al に比べ極めて低く, 板厚も小さいため, 圧縮弾性係数の低い心材部に, 荷重点が圧縮変形により凹みやすいためであると考え. 次に, 4 点曲げ試験の結果を Fig. 4 (b)に示す. この場合についても, 最大荷重は Type II の方が高く現れる傾向にあるが, 破壊様相は Type I と II とで異なり, その結果は Fig. 5 に示される. Type I の破壊は Fig. 5 (a)に示されるように, 3 点曲げ試験結果と同様であるが, Type II はアルミニウム部の凹みまたは心材部の破壊となり, 心材部の破壊は 6 本の試験片中 4 本に現れた.

また, Fig. 5 に示すように, GRP が圧縮側の Type I [(a), (c)] の場合, Type II [(b), (d)] のような荷重点部の凹みは示されていない. これは, 負荷中は Type II と同様の状態であるが, 曲げ試験後心材の圧縮変形の回復に伴い, GRP の変形が回復したためである.

4.2 表面材のひずみ

Fig. 6 は, 3 点曲げ試験による Type I の GRP/PUF/Al 積層板の表面材に, 集中荷重 P を $P=0 \sim 30$ kg の範囲で負荷したときの各点でのひずみを示したもので, 各点での曲げ荷重-ひずみ ($P-\epsilon$) 線図はすべて直線関係にあり, アルミニウム部に生ずる表面のひずみ ϵ_A は GRP 部のひずみ ϵ_g に比べ極めて小さいことが示される. ここで 3 点曲げの荷重点については表裏のひずみは同時に測定できないため Type I, Type II のそれぞれの試験結果より G3, G3' での値を求めたものである. そして, 曲げ荷重の増加に対し, 両表面のひずみ ϵ は直線的な変化を示すことから, これらの結果を用いて ϵ_g/ϵ_A の値を両表面のひずみの比として求める. Table II (a)は 3 点曲げの結果を示したもので, 同様に 4 点曲げの結果は Table II (b)に示される.

基材の弾性領域では表裏面のひずみの比 ϵ_g/ϵ_A は理論的にはゲージてん付位置にかかわらず一定となる. しかし, 実験結果では表に示されるごとく, 両者には相違が見られ, したがって, 中立軸の位置 h_0 の変化は心材の局部的変形, せん断変形などを示唆する.

そこで, ϵ_g/ϵ_A の結果を用い基材の弾性変形を仮定し, 幾何学的な関係を適用して中立軸の位置を求めると, h_0 は次式のように示される.

Fig. 5. Modes of flexural failure of GRP/PUF/Al.

Fig. 6. Relation between load and strain occurred at facings of GRP/PUF/Al.

$$h_0 = \left[\frac{\varepsilon_G}{\varepsilon_A} \right] h \left(1 + \frac{\varepsilon_G}{\varepsilon_A} \right) - h_G \quad (5)$$

Table III はひずみ測定の結果を(5)式を適用して h_0 を求めたものである。このとき Table I, Fig.1 で示した基材の弾性特性, 構成寸法を用いた(1)式の理論結果では $\bar{h}_0 = 18.16 \text{ mm}$ と求められたが, ここで得られた結果は $\bar{h}_0$ に比べ, いずれも小さな値となっている。

また, 各基材の引張り, 圧縮の荷重-たわみ線図が同じならば Type I と II との h_0 には差はないはず

Table II. Strain ratios ($\varepsilon_G/\varepsilon_A$) occurred at facings of GRP/PUF/Al.

(a)					
Positions	G1'/G1	G2'/G2	G3'/G3	G4'/G4	G5'/G5
Specimens					
Type I	5.354	5.286	1.886	2.893	3.867
Type II	5.100	4.565		4.847	3.267

(b)						
Positions	G1'/G1	G2'/G2	G3'/G3	G4'/G4	G5'/G5	G6'/G6
Specimens						
Type I	2.909	5.364	4.273	3.600	3.286	3.857
Type II	4.833	5.273	5.050	4.500	5.875	4.902

Table III. Distances of neutral axis h_0 from interface (GRP/PUF) of GRP/PUF/Al, calculated value $h_0 = 18.16$.

(a)					
Positions	G1'/G1	G2'/G2	G3'/G3	G4'/G4	G5'/G5
Specimens					
Type I	17.80	17.76	13.36	15.46	16.67
Type II	16.65	17.28		17.48	15.99

(b)						
Positions	G1'/G1	G2'/G2	G3'/G3	G4'/G4	G5'/G5	G6'/G6
Specimens						
Type I	15.49	17.81	17.04	16.39	16.02	16.66
Type II	17.47	17.75	17.62	17.22	18.08	17.52

であるが, 両者には多少の差のあることが示される。しかし両者の差は3点曲げの点4と4点曲げの点1, 5を除けば最大ではほぼ5%弱程度であるので, 弾性範囲の小さいポリウレタンを心材とするサンドイッチ板

としてはほぼ無視できる範囲であろうと考える。しかし、このように局部的に中立軸に差の生じることは、比較的薄い GRP と弾性係数の極めて低い PUF を用いているためで、また、Type I, II との h_0 の相違は、曲げ荷重の増大に伴い、更に大きな差となって現れることが予想される。

また 3 点曲げ試験における荷重点での h_0 の値は他のものに比べ極めて小さいが、これは、アルミニウムより弾性係数の低い GRP が圧縮側のとき、荷重点で局部的な圧縮変形を生じ、これがアルミニウム部の変形に影響を与えたものと考えられ、サンドイッチ板としたため、荷重点には比較的大きな荷重が負荷されて生じたものである。このように、Table III に示した h_0 の値は計算結果 $\bar{h}_0$ の値と明らかに差異が見られる。これは、ひずみ測定に用いた荷重は破壊荷重に比べかなり小さいにもかかわらず、破壊時に観察された心材部への集中荷重の影響が充分考えられる。したがって、ここで採用した一般の曲げ試験方法は、比較的薄い表面材を用いたサンドイッチ板の曲げ特性を把握するためには難しいことが示唆され、さらに組合せはりの理論の適用を困難なものとしている。そこで、荷重点の心材部への陥入阻止を講じた試験方法を考察することにより、このようなサンドイッチ板に対し正確な曲げ特性が期待され、また前章で述べた理論の適用は充分可能となることが示唆される。

4・3 曲げ強度

曲げ破壊試験による曲げ荷重-たわみ線図は、Fig. 4 に示されるとおりであるが、GRP/PUF/Al 積層板のように機械的特性の異なる基材構成ではその破壊挙動もさまざまである。曲げ破壊の状況はすでに Fig. 5 に示されるように、試験片の大部分はこのような荷重点近傍における心材の圧縮破壊となる。しかし荷重点での圧縮変形を避けた 4 点曲げによる Type II の試験片では、引張側の GRP が大きな変形に追従するために 6 本の試験片のうち 4 本の試験片に心材での破壊が観察され、Fig. 5 (e) に示すような複雑な破壊を示す。他の 2 本の試験片は、アルミニウムが荷重点間で急激にはく離を生じて破壊し、また、心材破壊のものと比べ曲げ強度に差はみられない。

Table IV は 3 点曲げおよび 4 点曲げ試験により得られたサンドイッチ板の見掛けの弾性係数および曲げ破壊強度を示したもので、結果は 6 本の試験片の平均値として求めたものである。3 点曲げおよび 4 点曲げ試験法により、非対称積層板の曲げ特性は異なった値を示し、また、同一試験法においても、Type I と II とでもその特性値は異なる。そこで、このように試験方法により曲げ特性値の相違のみられた理由について次に述べる。

Table IV. Flexural properties of GRP/PUF/Al.

Test methods Properties Specimens	3-point flexural test		4-point flexural test		
	E_b (kg/mm ²)	σ_b (kg/mm ²)	E_b (kg/mm ²)	σ_b (kg/mm ²)	$\sigma_b' (= 0.714\sigma_b)$ (kg/mm ²)
Type I	153	1 09	218	1.56	1.11
Type II	169	1 60	232	1.91	1 36

最初に、曲げ弾性係数の結果について調べると、4 点曲げ試験による強度特性は 3 点曲げの結果より約 40 %程度高く示された。このことは、両曲げ試験片は Fig. 2 に示されるように、3 点曲げでは短冊形を、4 点曲げではダンベル形と異っているにもかかわらず、後者では最小板幅 ($b=50$ mm) を考慮し真直はりとして計算したためであり、ここではとくに、GRP/PUF/Al の曲げ破壊強度を主体に検討したので見掛けの曲げ弾性係数としてこのような結果となったものである。次に曲げ強度について述べる。GRP/PUF/Al の破壊様相は、3 点曲げおよび 4 点曲げ試験の結果、4 点曲げ試験の Type II を除き、圧縮側表面材部で局部破壊を生じ、純粋な曲げ破壊を示さなかった。したがって、Table IV に示した 4 点曲げ試験による曲げ強度 σ_b は、最小板幅を考慮して計算したことから、3 点曲げ試験結果との相違が見られたものと考えられる。そこで、局部破壊部の板幅 ($b=70$ mm) を考慮すると、このときの曲げ強度 σ_b' は $\sigma_b' = 0.714\sigma_b$ となり、Table IV に示されるように、ほぼ 3 点曲げ試験より求めた曲げ強度に一致する。しかし、Type II における σ_b' の値は 3 点曲げ試験の結果より小さな値を示すが、これは完全な局部破壊に達する前に、支点部近傍の心材または圧縮側接着界面が、Fig. 5 (d, e) に示すように、局部変形とせん断力との影響により急激に破壊したことに起因する。この場合、最大曲げ荷重を生じたときのたわみ δ_b は、3 点曲げ試験では $\delta_b = 12 \sim 20$ mm、4 点曲げ試験では $\delta_b = 27 \sim 41$ mm となっており、4 点曲げ試験結果のほうが大きいたわみ、その結果心材は大きな変形に追従できなくなり急激な破壊を生じたものと考えられる。

また、Type I と II の曲げ強度を比較すると、Type I の方がやや小さな値となっている。これは、Type I の場合、圧縮側表面材 GRP の板厚は $h_g = 1.25$ mm と極めて薄いため、Al よりも圧縮荷重による局部破壊を生じ易くなったものと考えられる。よって、破壊応力の求め方および真の曲げ破壊を生じさせる試験片の形状、試験方法については、今後充分検討しなければならない課題である。

5 GRP/PUF/Al の軽構造メリット

サンドイッチ構造は軽量構造用材料として、曲げ剛

性の向上, 基材の有効利用などを目的とした多機能材料への開発が盛んである. 曲げ剛性の向上は断面 2 次モーメントの増大のため板厚が増加することはやむを得ないが, サンドイッチ板の軽量性は開発の大きな因子と考えられる. したがって, 基材の曲げ剛性を基礎にサンドイッチ板の軽量構造としてのメリットについて検討する.

サンドイッチ板の基材であるアルミニウム, GRP 単体で, サンドイッチ板と曲げ剛性の等しい平板を作製した場合について考えると, サンドイッチ板の曲げ剛性 D は(4)式を用いて

$$D = E_A I_A + E_G I_G \quad (6)$$

のように与えられる. 一方, アルミニウム, GRP 単体の曲げ剛性を D_A^* , D_G^* と与えて, 下記のように定める.

$$D_A^* = E_A I_A^*, \quad D_G^* = E_G I_G^* \quad (7)$$

$$\text{ここで } I_A^* = b h_A^3 / 12, \quad I_G^* = b h_G^3 / 12$$

b : 板幅

そして, 各平板の曲げ剛性を等価となるように

$$D = D_A^* = D_G^* \quad (8)$$

と置き, ここでサンドイッチ板と各基材単体の板幅を等しくすると, (6)~(8)式より各基材単体の板厚は次のように求められる.

$$h_A^* = \sqrt[3]{4[(h_A + h_G - h_0)^3 - (h_G - h_0)^3] + 4 \frac{E_G}{E_A} [(h_G + h_0)^3 - h_0^3]} \quad (9.a)$$

$$h_G^* = \sqrt[3]{\frac{4E_A}{E_G} [(h_A + h_G - h_0)^3 - (h_G - h_0)^3] + 4[(h_G + h_0)^3 - h_0^3]} \quad (9.b)$$

したがって, サンドイッチ板としての軽量性は(9)式で求められた h_A^* , h_G^* とそれぞれの密度 ρ_A , ρ_G との積と, サンドイッチ板の板厚 h と見掛けの密度 ρ_s との積 $\rho_s h$ との比を求めることにより検討できる.

Table V は基材単体およびサンドイッチ板について, 密度 ρ , 板厚 h , 単位幅当りの重量 ρh を等価曲げ剛性の考えを適用して求めたものである. これらの結果は, 平板の曲げ試験結果を基礎に得たもので, カッ

内の数値は(9)式を用いて求めたものである.

サンドイッチ板の板厚は GRP の 1.47 倍, アルミニウムの 3.52 倍と厚くなっているが, 単位幅当りの重量では GRP の 0.34 倍, アルミニウムの 0.47 倍と等価曲げ剛性を有する材料としては構造軽量化に寄与しているところは大きいことが示される. また, 表中カッコ内に示した計算値は実験結果と異った値を示したが, GRP/PUF/Al の曲げ荷重によるたわみは圧縮荷重点での局部変形に大きく影響され, 表面材の機械的特性を充分活かした真の曲げ剛性が得られなかったことに起因している. したがって, GRP/PUF/Al を構造部材として用いる場合, 圧縮荷重の影響を避けた設計を行うことにより, GRP/PUF/Al は計算値に近い曲げ特性を有するものとして期待される.

6 結 言

サンドイッチ構造材 GRP/PUF/Al は, ポリウレタンフォームの心材表面に, ガラスマット FRP (GRP) およびアルミニウム (Al) を表面材として接着した非対称積層板である. これは曲げ強度特性の向上と多機能性を考慮した構造で, ハイブリッド効果を指向した複合構造である.

GRP/PUF/Al サンドイッチ板の曲げ強度特性は 3 点曲げおよび 4 点曲げ試験により, 曲げ破壊挙動を検討したもので, 得られた結果を要約すると, 次のとおりである.

(1) 両表面材の弾性範囲内でのひずみ測定の結果, GRP に生じるひずみはアルミニウムのそれよりも約 5 倍程度大きくなり, 中立軸は, 図心と一致せず, アルミニウム側に大きく偏り, その値は理論値より小さい.

(2) サンドイッチ板の曲げ挙動は 3 点および 4 点曲げ試験による試験法と異り, とくに, 曲げ荷重-たわみ ($P-\delta$) 線図の最大荷重を越えた領域で現れる. 3 点曲げ試験では, 圧縮側表面材が GRP の場合 (Type I), アルミニウムの場合 (Type II), 両者ともに $P-\delta$ 線図は緩やかに低下する. しかし, 4 点曲げ試験では, Type I の場合は 3 点曲げ試験と同様の傾向を示すが, Type II の場合では, 最大荷重に達すると, $P-\delta$ 線図は急激に低下し, このような相違は, 曲げ破壊様相に起因する.

(3) GRP およびアルミニウムが圧縮側となる Type I と II との曲げ破壊強度を比較すると, Type II の破壊強度は Type I の破壊強度に比べ, 3 点曲げで 46.8%, 4 点曲げで 22.4% といずれの場合も高い値となる. このような結果は基材の特性によるものではなく, むしろサンドイッチ構造であるために生ずるもので, 両者の弾性係数にも Type II はそれぞれ, 3 点曲げ, 4 点曲げによる試験法でそれぞれ, 10.5%,

Table V. Structural advantage of GRP/PUF/Al of comparing with GRP or aluminium, where $h_s = 22.75 \text{ mm}$.

Properties Specimens	Density ρ (g/cm ³)	$h^*/(h)_s$	$\rho h^*/(\rho h)_s$
GRP/PUF/Al	0.36	1.000	1.000
GRP	1.56	0.679 (0.929)	2.941 (4.016)
Aluminium	2.71	0.284 (0.389)	2.132 (2.924)

(). Calculated values

6.4%と優れた特性となることが示された。

(4) 曲げ破壊様相は、3点曲げ試験 Type I, II および4点曲げ試験 Type I では圧縮側表面材の荷重点における凹み破壊であり、4点曲げ試験 Type II では、心材部の破断と圧縮側界面ではなく離破壊を示した。また、各試験ともに、引張側表面材の破壊は観察されない。

(5) GRP/PUF/Al サンドイッチ板の構造メリットは、GRP, Al 単体を対照に、等価曲げ剛性を思考し検討した結果、等価曲げ剛性を有するサンドイッチ板の板厚は GRP の1.47倍、アルミニウムの3.5倍と厚くなるが、重量では GRP の0.34倍、アルミニウムの0.47倍と大きく軽量化される。

なお、この研究は、サンドイッチ板の真の曲げ特性を把握するために、試験方法を課題としさらに検討するものであることを付記する。

おわりに本研究に関し、試料の提供にご協力いただいた日本化薬(株)、小松剛課長、岩武周佐課長に対し、厚くお礼申し上げます。

(昭和51年5月20日 日本材料学会第25期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Kulkarni, S. V., J. S. Rice, and B. W. Rosen, Composites, **6**, 5, 217 (1975).
- 2) Bowen, D. V., and K. S. Ayers, Composites, **6**, 4, 152 (1975).
- 3) Parratt, Fiber Reinforced Materials Technology, Van Nostrand Reinhold, p. 101 (1972).
- 4) 古田敏康, 野口義男, 酒谷芳秋, 山口泰弘, 複合材料学会誌, **2**, 3, 114 (1976).
- 5) David, E., Walrath, and D. F. Adams, Jr., Composite Materials, **10**, 44 (1976).
- 6) Sih, G. C., P. D. Hilton, R. Badalian, P. S. Shenberger, and G. Villarreal, Analysis of Test Methods for High Modulus Fibers and Composites, STP 521, ASTM, 98 (1973).
- 7) Harris, B., and A. R. Bunsell, Composites, **6**, 5, 197 (1975).
- 8) 島村昭治, 宮入裕夫, サンドイッチ構造, p. 167 (1974) 日刊工業新聞社刊
- 9) Broutman, L. J., and R. H. Kroch, Composite Materials, Structural Design and Analysis, Part II, Edited by Chamis, C. C. Academic Press **8**, 231 (1975).
- 10) Phillips, L. N., Composites, **7**, 1, 7 (1976).
- 11) Salkind, M. J., and G. S. Holister, Application of Composite Materials, STP 524, ASTM, 163 (1973).
- 12) 中村康二, 複合材料設計, **2**, 1, 37 (1975).
- 13) Ogorkiewicz, R. M., and Sayigh, Composites, **4**, 6, 254 (1973).
- 14) 宮入裕夫, 工業材料, **24**, 9, 21 (1976).