

# 自動車の側面衝突時のエネルギー吸収用 CFRP/Al 合金ハイブリッド材の応答特性

日大生産工 (院) ○杉本 直 日大生産工 邊 吾一  
日大理工 青木義男

## 1 緒言

現在,地球温暖化防止が叫ばれる中,CO<sub>2</sub> 排出量の低減が急務となっている.温暖化の元凶である自動車の排出ガスを少なくするために車両の大幅な軽量化が必要となってきた. CFRP (炭素繊維強化プラスチック) は比強度,比剛性に優れていることから幅広い分野で使用されている.特に自動車に CFRP を使用することによって車体の大幅な軽量化が可能となる.それに伴い燃費向上,さらには CO<sub>2</sub> の排出量を削減することが見込める.実際に車体の構造自体を CFRP 化すれば,現在の自動車の約半分にまで軽量化することが可能となり,燃費は平均で約 7.5[km/liter]以上向上するという試算がなされている.そこで自動車のボディ構造が CFRP となった時に問題となってくるのが衝突安全性である. CFRP は金属材料のように塑性変形を起こさないため,衝突した際の吸収エネルギーが比較的低くなってしまふことが懸念される.特に,側面衝突は 150[mm]という少ないクラッシュ・ストロークで衝撃エネルギーを吸収しなくてはならないため,側面衝突時の安全性の確保が重要な課題となってくる.

本研究では自動車ドア内部にあるスチール製側面衝突エネルギー吸収部材の代用品として設計されたアルミニウム合金に CFRP を構造用接着剤で接着した,軽量で実物大の「ハイブリッドビーム」に対して落錘衝撃実験を行ない,それらの衝撃応答挙動を明らかにする.また,有限要素法ソルバーPAM-CRASHを用いた衝撃解析を行ない,解析結果と実験結果との関連性とハイブリッドビームの最適化についても言及する.

## 2 落錘衝撃実験

### 2.1 試験体

「ハイブリッドビーム」は Fig. 1 に示すように,衝撃荷重により曲げ変形をし,引張力が作用する面のみ,2400[MPa]以上の高い引張強さを持つ CFRP を接着することにより,極僅かな重量増加で,吸収エネルギーを飛躍的に向上させることを狙って開発された.

過去の研究[1],[2]から,正方形中空断面を持つ 7N01

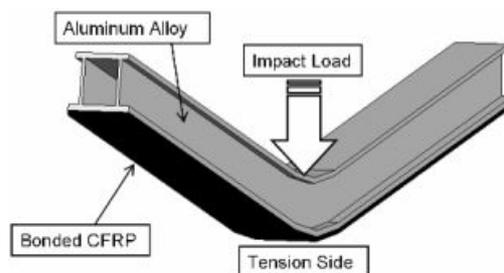


Fig.1 Hybrid Beam

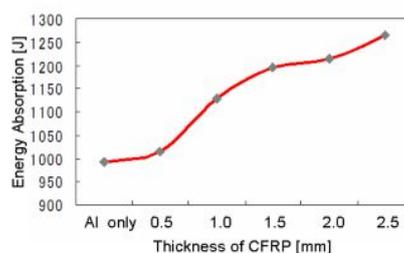


Fig.2 Hybrid effect of the Hybrid Beam

Al 合金に CFRP T700 を高強度接着剤で接着させたハイブリッドビームの衝撃曲げ実験と解析を実施して, Fig. 2 に示すように, Al 合金に接着する CFRP 材の厚みを増していくと,吸収エネルギーが高くなっていくことが明らかになり,ハイブリッドビームのハイブリッド効果を確認できた.

本研究では,スチール製インパクトビームの吸収エネルギーを超える,より軽量なハイブリッドビームの開発に向けて Fig. 3 に示すように CFRP を「T700」,「T800」,「M40」の 3 種類(東レ株式会社製「TORAYCA」)を用意し,CFRP の厚さを 1mm, 2mm, 3mm, 幅を 20mm, 28mm, 36mm と変化させた.また,Al 合金と CFRP を接着する,接着剤の種類も「高強度接着剤」,「高伸度接着剤」,「粘着剤」の 3 種類用意して,それらの因子を組み合わせた Table. 1 に示す試験体 18 本を用意して,衝撃曲げ実験に用いた.

## Response Properties of CFRP/Al Hybrid Members for Absorbing Impact Energy in Side Collision of Automobiles

Nao SUGIMOTO, Goich BEN and Yoshio AOKI

## 2.2 試験方法

これらの試験体を Fig. 4 に示すように、支点間距離 800 mm の単純支持の治具に置いた。試験体支持部の支点半径は、25 mm である。落錘子の質量は 100kg、先端は半径 100 mm の半円筒形、幅は 200 mm で、飛散防止のナイロン製のベルトで上から押さえた上で、落錘子を高さ 12m（衝突速度約 55km/h）からガイドは使用せず自由落下させて衝撃曲げ実験を行った。試験体支持部に埋めたロードセルで衝撃荷重を、高速度カメラにより落錘子の変位を計測し、また試験体の変形も観察した。

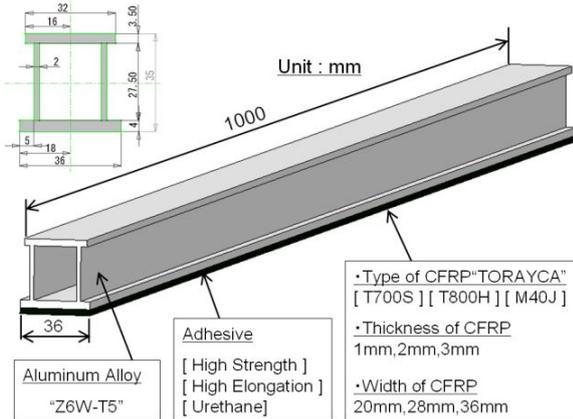


Fig.3 Test specimen

Table.1 Combination of design factor

No.	CFRP	Thickness[mm]	Width [mm]	Adhesive
1	T700	1	36	Urethane
2	T700	2	28	High elongation
3	T700	3	20	High strength
4	M40	1	28	High elongation
5	M40	2	20	High strength
6	M40	3	36	Urethane
7	T800	1	36	High strength
8	T800	2	28	Urethane
9	T800	3	20	High elongation
10	T700	1	20	High elongation
11	T700	2	36	High strength
12	T700	3	28	Urethane
13	M40	1	20	Urethane
14	M40	2	36	High elongation
15	M40	3	28	High strength
16	T800	1	28	High strength
17	T800	2	20	Urethane
18	T800	3	36	High elongation

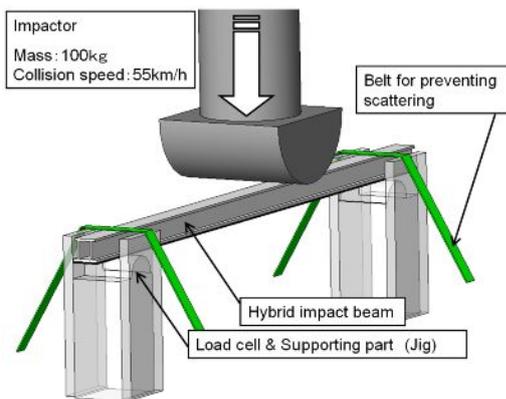


Fig.4 Outline of impact test

## 2.3 実験結果

実験結果の一例として Fig. 5 に最も吸収エネルギーが高かった試験体の荷重-変位線図を示す。エネルギー吸収量は、Fig. 5 の衝撃応答曲線の面積積分から、変形変位 150[mm]までの吸収エネルギーを算出した。これは、側面衝突エネルギー吸収部材として考えたとき変位量の最大値として 150mm 以内でエネルギーを吸収させることを目安としているためである。

性能目標値であるスチールビームの吸収エネルギーは、1500[J]~1900[J]であるが、ハイブリッドビームの吸収エネルギーは、最も高いもので「T800」、「高伸度接着剤」、「幅 36mm」、「厚さ 3mm」の組み合わせの試験体で、1827[J]となり、スチールビームとほぼ同じ値となった。また、単位重量当りの吸収エネルギーは、スチールビームが 1027[J/kg]~1301[J/kg]に対し、ハイブリッドビームは 1827[J/kg]であり、ハイブリッドビームの優位性を示すことが出来た。

試験体は落錘子衝突後 24kN 程の最大衝撃荷重を示し、その後、試験体の変形により、一瞬、荷重は低下するが、再び増加した後に過渡応答による変動と共に荷重は低下していき、試験体が折損して、負荷能力が失われる。そして変位が 121 mm の時、Fig. 6 で示すように、CFRP が中央部で繊維破断をし、衝撃荷重も低下していく。

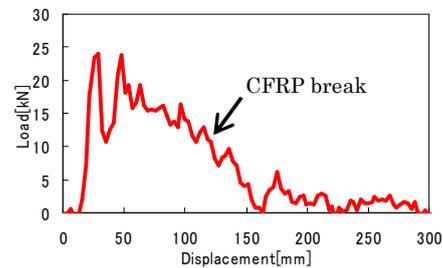


Fig.5 Displacement-Load curve in impact test

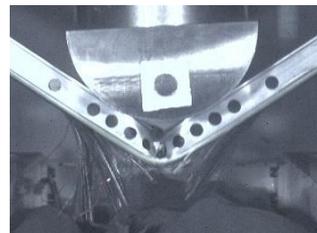


Fig.6 Break of CFRP layer.



Fig.7 Delamination of adhesion layer.

全ての試験体が Fig. 6 のように繊維破断するのではなく、Fig. 7 のように、接着層は全面剥離してしまうケースもある。これは、「高強度」、「高伸度」、「粘着剤」の3種の接着剤全てに見られた破壊挙動であり、原因として、単に接着剤の種類だけではなく、接着面の性状、CFRP の種類、厚さ、幅にも依存していると考えられる。また、接着層が全面剥離してしまう試験体の吸収エネルギーは、いずれも 1600[J]前後と低いことから、接着層は全面剥離しないで、CFRP の繊維破断が起きることが、望ましい破壊モードである。

### 3 有限要素法による衝撃解析

#### 3.1 FEM 解析モデル

FEM 解析モデルは落錘衝撃試験の試験体、落錘子、支持部の寸法に基づき作成された。なお、落錘子および支持部は衝突に影響する先端部の一部のみをモデル化し、落錘子には付加質量を与えた。Fig. 8 に解析モデルの概観を示す。

#### 3.2 使用要素

解析には、動的陽解法を用いた有限要素法衝撃解析プログラム”PAM-CRASH SOLVER 2006”を使用した。試験体の Al 合金に弾塑性シェル要素(MAT103)、CFRP には積層シェル要素(MAT131、グローバル積層)を用いた。落錘子と支持点は剛体(MAT100)とした、また、落錘子には初速度 55[km/h]を与え、落錘子と試験体、試験体と落錘子、治具との接触には面と面の接触タイプ

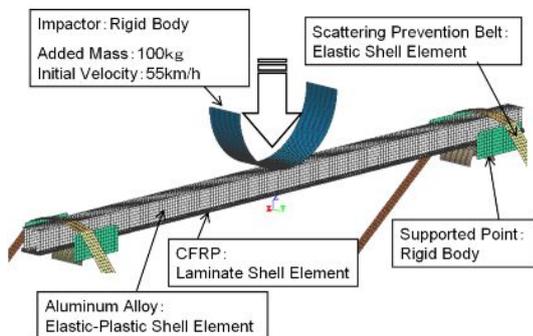


Fig.8 Analytical Model in FEM.

Table.2 Material properties of Al Alloy (Z6W-T5)

Young Modulus [GPa]	Poisson ratio	Proof stress [Gpa]	Tensile strength [Gpa]	Largest point strain [%]
70GPa	0.33	0.445	0.480	9.45

Table.4 Material properties of CFRP

CFRP	$\sigma_1$ [Gpa]	$\sigma_{1c}$ [Gpa]	$\sigma_2$ [Gpa]	$E_1$ [Gpa]	$E_2$ [Gpa]	$\nu_{12}$
T700	2.55	1.47	0.069	135	8.5	0.34
T800	2.84	1.57	0.080	160	7.8	0.34
M40	2.45	1.27	0.053	230	7.7	0.3

Table.3 Material properties of Adhesive

Type of adhesive	$\sigma_{max}$ [Gpa]	$\tau_{max}$ [Gpa]	E [Gpa]	G [Gpa]
High Strength	0.03	0.025	3	1.15
High Elongation	0.013	0.013	0.36	0.138
Urethane	0.001	0.001	0.00001	0.0000038

(CONTACT TYPE33)を用い、摩擦係数(0.1)と、ペナルティ係数(0.1)を与えた。Al 合金とCFRPの間には接着を表現する要素である”Link Material”(MAT303)を使用した。また、Al 合金自体にも自己接触(CONTACT TYPE 36)を定義した。CFRP の破壊基準は最大応力説を、Al 合金は厚さベースの破壊基準値を用い、厚みが30%増加もしくは、8%減少した時要素を破壊とみなして、削除した。解析に用いた材料特性を Table2, Table3, Table4 にそれぞれ示す。

#### 3.3 解析結果

Fig. 9 に一番吸収エネルギーが高かったハイブリッドビームの荷重-変位線図 (Fig. 5) に解析値を重ねた図を示す。ピーク値と CFRP 破断後に若干の差が見られるが全体的な傾向は良い一致を示している。

また、Fig. 10 に Fig. 9 の実験結果と解析結果の破壊モードを比較した図を示す。実験結果の破壊モードと解析結果の破壊モードは、両者とも試験体中央部で繊維破断をしている。

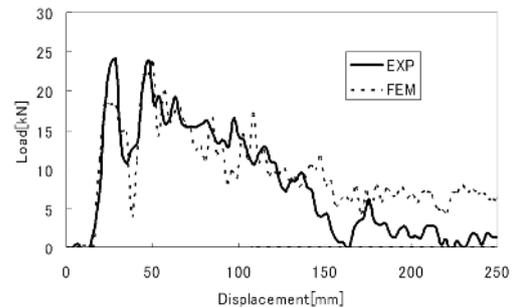


Fig.9 Comparison of Experiment results with that of FEM.

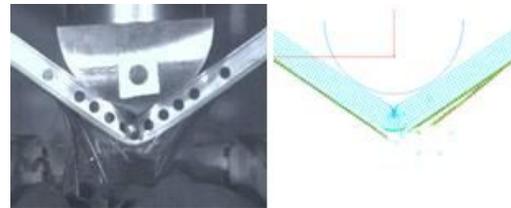


Fig.10 Comparison of Experimental Fracture mode with that of FEM.

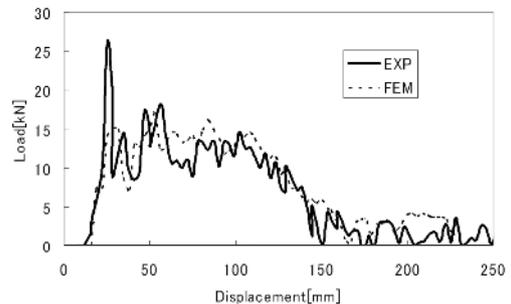


Fig.11 Comparison of Experiment results with that of FEM.

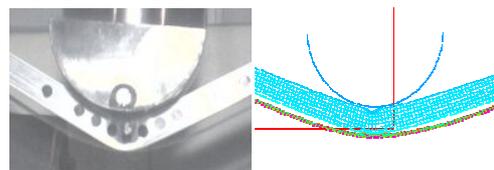


Fig.12 Comparison of Experimental Delamination Failure mode with that of FEM..

さらに, Fig. 11 に接着層が全面剥離した結果 (Fig. 7) の荷重-変位線図の実験値と解析値との比較を, Fig. 12 にその破壊モードの比較を示す. Fig. 12 は接着層が全面剥離してしまった実験の破壊モードを解析結果が再現していることを示している.

解析結果は実験結果と比較して, Table 1 の 18 本中の 16 本試験体の誤差は平均で 3.7% の一致を得た. (2 本の試験体のデータは得られなかった)

以上より, 研究で開発した FEM 解析手法は, 荷重-変位線図上での一致だけでなく, 破壊モードの一致も確認することが出来, 衝撃解析にて, 試験体の特徴を再現することが可能であることを示した.

#### 4 FEM 解析による最適化

FEM 解析の結果は実験結果と良く一致し, その有用性が認められたので, FEM 解析による最適設計を試みた. Fig. 13 に示した 4 種のビーム断面を考案し, 断面形状以外は, これまでと同じ条件の下で, FEM 解析を実行した. また, これらの断面積は  $366[\text{mm}^2]$  で全て統一させている.

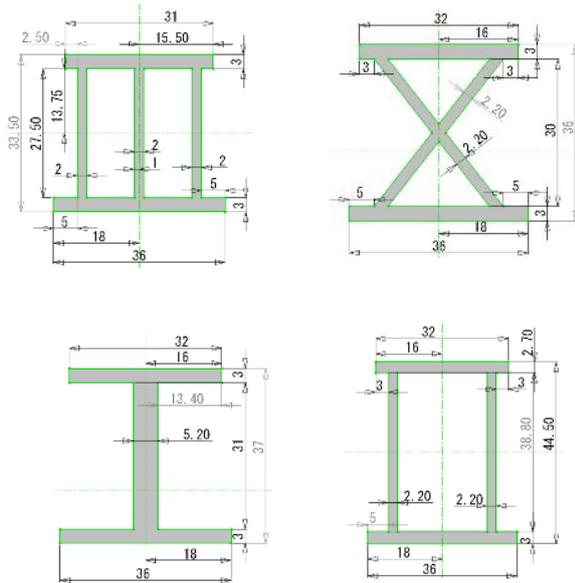


Fig.13 Four shapes of Al cross-section.

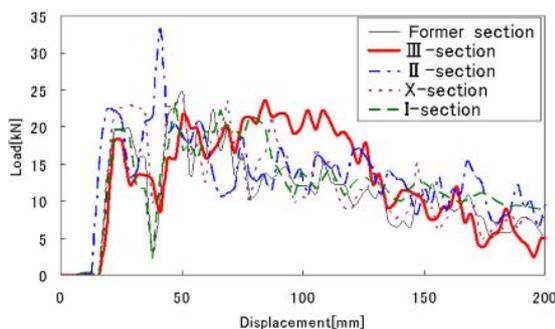


Fig.14 Displacement-Load curves of analytical results of four shapes of Al cross-sectional form, and Former beam.

この中で, 最も吸収エネルギーが高かった断面形状は, Fig. 13 左上のローマ数字の “III” の形をした断面形状のハイブリッドビームであり, 吸収エネルギーは, 2245J であった.

Fig. 14 に変位-荷重線図を示す. “III-Section” はピーク値こそ低いものの, 変位 110mm まで一定して 20kN の荷重を長く受け持っており, 吸収エネルギーは実験において最も吸収エネルギーが高かった No. 18 の 1827J と比べると, 吸収エネルギーは 23% 向上するという結果が得られた. また, “H-Beam” は形状から曲げ剛性が高いことから, ピーク値が高いが, 早期にビームが圧縮側で潰れて, 屈曲し, 高いレベルでの荷重保持が出来なくなり, 結果的に吸収エネルギーは “III-Beam” よりも低くなった.

#### 5 結言

軽量でかつ衝撃エネルギー吸収量の大きいビームを開発するためにアルミ合金と CFRP からなるハイブリッドビームの安全性技術の開発において, 実験では, CFRP の種類, 厚さ, 幅と接着剤の種類を変化させた 18 種類 (各 1 体) のビームについて実験を行い, 2 種類の実験結果は得られなかったものの, 16 種類の実験結果を得た. その結果, 層間強化型の CFRP (T800) の厚さ 3mm, CFRP 貼付幅 35mm と高伸度接着剤を用いたビームが, 150mm 変形時で, 1800J 以上の衝撃曲げエネルギー吸収量の最大値を示した.

解析では汎用有限要素法ソフト PAM-CRASH により, ハイブリッドビームの衝撃曲げ応答挙動及び衝撃曲げエネルギー吸収量を解析的に求める手法を確立した. その結果, 衝撃曲げ応答挙動と衝撃エネルギー吸収量に関して, 解析結果は実験結果と比較して, 誤差は平均で 3.7% の一致を得た. アルミ合金材の種類とビーム材の形状を変え, さらに接着剤の検討を行うことで, より大きな衝撃エネルギー 2200J 以上が得られる計算結果も提示した.

本研究は NEDO (独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構) による「自動車軽量化炭素繊維複合材料の開発」プロジェクトの一部として実施された.

#### 参考文献

- [1] G.Ben et al, comparison of Experimental Results with FEM for Impact Behavior of Al Door Guarder Beam Reinforced with CFRP, Proceedings of 12th US-Japan conference on Composites, p379-389(2004)
- [2] G.Ben, Y.Aoki and N.Sugimoto, Proceedings of 16th ICCM, "FrFM1-02"(2007,CD-ROM)