

自動車の側面衝突時のエネルギー吸収用 CFRP/Al 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、CO₂ 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。特に自動車には 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 CO₂ 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うことが懸念される。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・インパクトビーム」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・インパクトビーム」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にも、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。

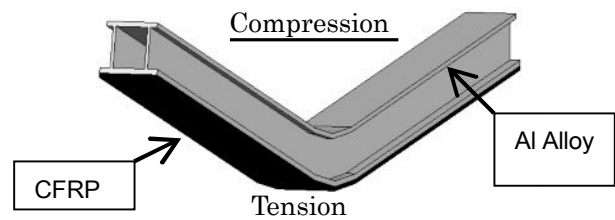


Fig.1 Hybrid Impact Beam

過去の研究 1)~3) から、正方形中空断面を持つ 7N01A1 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。

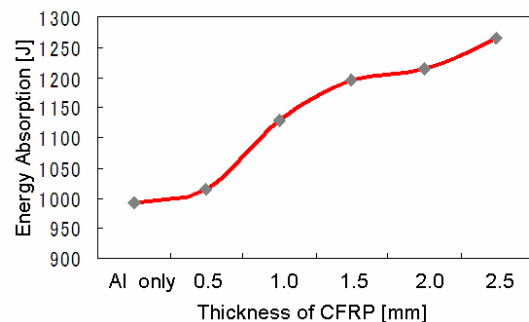


Fig.2 Hybrid effect of the Hybrid Beam

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

Nao SUGIMOTO, Goich BEN and Yoshio AOKI

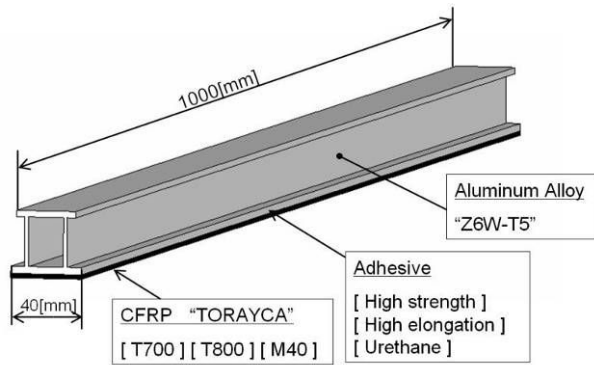


Fig.3 Test Specimen

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, 40mm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。

Table.1 Combination of the factor.

No.	CFRP	Thickness [mm]	Width [mm]	Adhesive
1	T 7 0 0	1	40	Urethane
2	T 7 0 0	2	28	High elongation
3	T 7 0 0	3	20	High strength
4	M 4 0	1	28	High elongation
5	M 4 0	2	20	High strength
6	M 4 0	3	40	Urethane
7	T 8 0 0	1	40	High strength
8	T 8 0 0	2	28	Urethane
9	T 8 0 0	3	20	High elongation
10	T 7 0 0	1	20	High elongation
11	T 7 0 0	2	40	High strength
12	T 7 0 0	3	28	Urethane
13	M 4 0	1	20	Urethane
14	M 4 0	2	40	High elongation
15	M 4 0	3	28	High strength
16	T 8 0 0	1	28	High strength
17	T 8 0 0	2	20	Urethane
18	T 8 0 0	3	40	High elongation

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 の単純支持上に置いた。試験体支持部の支点半径は、15 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。

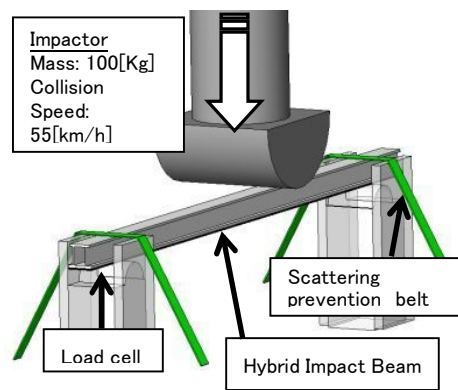


Fig.4 Outline of impact test

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、式(1)示すように、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。

$$E = \int_0^s Pds \quad (1)$$

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 40mm」, 「厚さ 3mm」の組み合わせの試験体で、1822[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 1510[J/kg]であり、ハイブリッド・インパクト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。

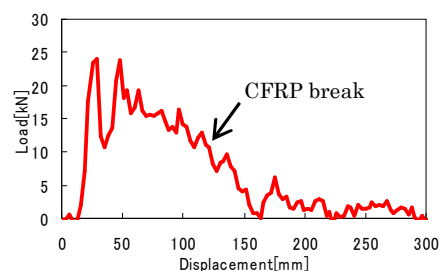


Fig.5 Displacement-Load curve in impact test

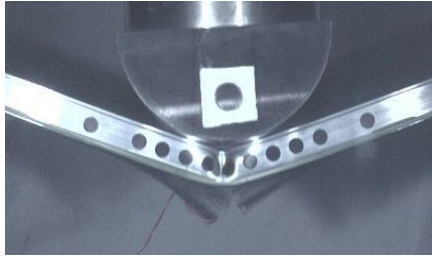


Fig.6 Break of CFRP layer.

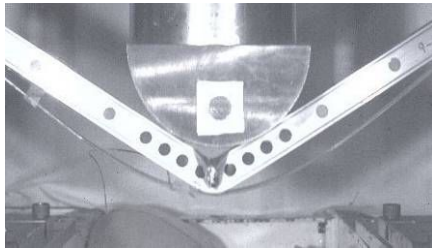


Fig. 7 Delamination of the adhesive layer.

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, 接着の品質だけではなく, 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 解析モデル

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.

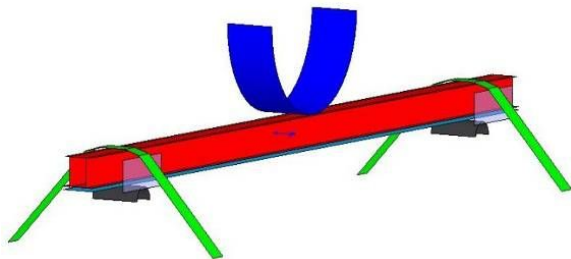


Fig.8 Analytical Model in FEM.

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 (CONTACT TYPE33)を用い. 摩擦係数(0.1)と, ペナルティー係数(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以下に示す

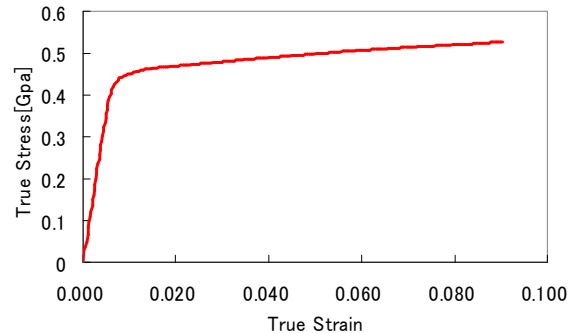


Fig.9 True stress-True strain curve of Al Alloy (Z6W-T5)

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.3 Material properties of Adhesive

Type of adhesive	σ_{max} [Gpa]	τ_{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

Table.4 Material properties of CFRP

CFRP	σ_1 [Gpa]	σ_{1c} [Gpa]	σ_2 [Gpa]	E_1 [Gpa]	E_2 [Gpa]	ν_{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

3.3 解析結果

Fig. 10 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. 11 に Fig. 10 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.

さらに, Fig. 12 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. 13 にその破壊モードの比較を示す.

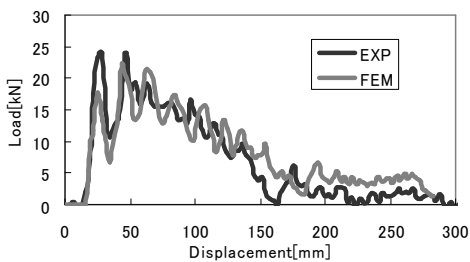


Fig.10 Comparison of Experiment results with that of FEM.

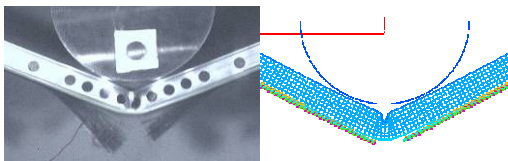


Fig.11 Comparison of Experimental Fracture mode with that of FEM.

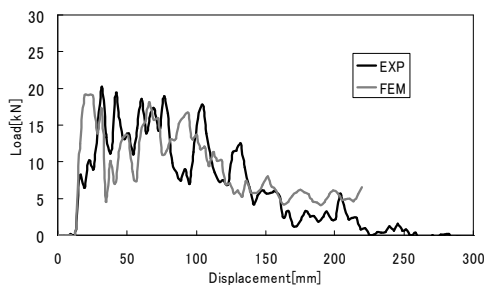


Fig.12 Comparison of Experiment results with that of FEM.

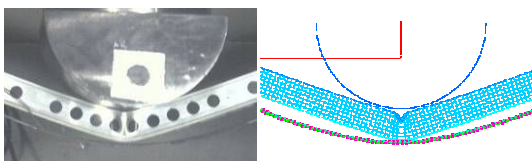


Fig.13 Comparison of Experimental Delamination Failure mode with that of FEM..

Fig. 11 から, 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. また, Fig. 13 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. 以上より, 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が分かった.

4. 結言

実験では, 高伸度接着剤を使用し, CFRP は「T800」, 「厚さ 3mm, 「幅 40mm」, という組み合わせの試験体が最も吸収エネルギーが高い結果となった. また, 接着層が剥離してしまうことで吸収エネルギーが低下してしまうことから, 接着の重要性が確認出来た. 解析では, 実験値とほぼ一致し, 破壊モードの再現も可能であることを示した. さらに精度を向上させれば, 様々な条件下での接着層の剥離の予測が可能となり, この動的解析手法を用いて, ハイブリッド・インパクトビームの最適設計を行うことが可能であるということが分かった.

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) 邊, 飯塚, 小林, 車両の側面衝撃吸収用の CFRP-Al ハイブリッド材の解析と実験, 第 30 回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2005), pp151-152
- 2) 邊, 杉本, 飯塚, 自動車の側面衝突用 CFRP/Al ハイブリッド材の開発と衝撃特性, 日本複合材料学会 2006 年度研究発表講演会予稿集, pp37-38
- 3) 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, (2006)