# 自動車のフロントサイドメンバ用 CFRP 角柱の衝撃実験と解析

## 1. まえがき

自動車から放出される温室効果ガスのひと つである CO<sub>2</sub>ガスは地球温暖化の大きな要因 であることは良く知られており、CO<sub>2</sub>ガスを 減らすための努力は様々な産業において活発 に行われている。自動車産業においては、CO<sub>2</sub> ガスを減らすもっとも有効な方法として自動 車の燃費を向上させることが挙げられる。自 動車の燃費を向上させるためには色々な方法 が考えられるが、もっとも有効的なアプロー チとしては比強度・比剛性に優れている炭素 繊維強化複合材料 (Carbon fiber reinforced plastics: CFRP) などの軽量材料を用いた自動 車の軽量化であろう。

著者ら<sup>1)</sup>は従来の自動車ドア部のスチール 製サイドインパクトビームの代用品として CFRP 薄肉ベルトを開発し、落錘衝撃試験お よび有限要素解析を行い衝撃応答挙動につい て明らかにし、その有用性について検討した。

本研究では、自動車の前面衝突時衝撃吸収 部材として長方形 CFRP 角柱を開発し、衝撃 吸収部材としての有用性を明らかにするため に落錘衝撃試験を行った。また、有限要素ソ ルバーLS-DYNA<sup>2)</sup>を用いて衝撃応答解析を行 い、落錘衝撃試験結果との比較検討も行った。

### 2. 落錘衝擊試験

#### 2.1 試験体

一方向配向炭素繊維プリプレグ(東レ㈱製 P3052s-20、マトリックス樹脂:エポキシ)を 用いてシートワインド法により長方形 CFRP 角柱を製作した。試験体の角柱部分の積層構 成は[(0/90)<sub>6</sub>/0]<sub>s</sub>とした。また、補強リブ部分 の場合は 0°方向繊維のみとなっている。試験 片の先端には安定的な衝撃破壊挙動を得るた めに角度 45°のテーパ加工を施した。試験体 の形状および寸法を図1に示す。 日大生産工(非常勤講師) 〇金 炯秀 日大生産工 邉 吾一

#### 2.2 試験方法

落錘衝撃試験は高さ12m(衝突スピード:約55km/h)で質量105kgの落錘体を自由落下 させることにより行った。衝撃荷重はロード セルを試験体の下に取付けて計測した。また、 高速度カメラにより落錘体の変位と衝撃圧縮 破壊プロセスも観察した。図2に落錘体の形 状と装着された試験体の様子を示す。



Fig. 1 Configuration of the rectangular CFRP tube with two ribs



(a) impactor (b) mounted specimen Fig. 2 Drop impact test setup

2.3 実験結果および考察

5 つの試験体ごとの荷重-変位線図を図 3 に示す。図中の荷重はロードセルの値を、変 位は落錘子の変位を用いた。No.1とNo.5 試

Experimental and FEM Analysis of Rectangular CFRP Tubes for Front Side Members of Automobiles under Impact Loading

Hyoung-Soo KIM and Goichi BEN

験体の最大変位が他の3本のそれに比べて低い値を示しているが、すべての試験体において同等な衝撃応答挙動を示しているといえる。



Fig. 3 Load-displacement curves in all test specimens

落錘子が試験体に衝突し、最大衝撃荷重を 示した後、急激な荷重の低下を示さず、落錘 子が跳ね返るまで安定的な衝撃荷重を示して いる。変位 100mm 前後からやや荷重の増加 が見られるが、これは試験体の破壊時に破片 が外側に向けて飛び散って行くと同時に、内 側にも破片が詰まることで抵抗力が上昇した ためである。

表1に衝撃実験結果の要約を示す。表中の エネルギー吸収量は落錘子の変位とロードセ ルの荷重から得られた荷重-変位線図の面積 から求めたものである。最大衝撃荷重におい てはすべての試験体において同等な値を示し ている。エネルギー吸収量に関しては No. 1 試験体が、最大変位に関しては No. 1 と No. 5 試験体が低い値を示している。その詳細はま だはっきりしていないが、No. 1 と No. 5 試験 体は他の3本の試験体との製作時期が半年ほ ど違うことを付言しておく。

Table 1 Summary of the experimental results

|                         | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | No. 5 | Ave.  |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Max. load [kN]          | 179.0 | 173.1 | 170.9 | 160.8 | 180.3 | 172.8 |
| Absorbed<br>energy [kJ] | 11.7  | 13.7  | 12.7  | 13.1  | 12.9  | 12.8  |
| Final displacement [mm] | 128.0 | 142.6 | 138.3 | 146.8 | 134.6 | 138.1 |

図4に衝撃実験後の試験体の様子を示す。

図からは安定的な衝撃破壊進展挙動を示して いることが分かる。図示していないが、実際 の高速度カメラの映像からも確認できた。破 壊様子を見ると、破壊の大半は外側に向けて 進展しているが、内側にも破片が詰まってい る場合もある。



Fig. 4 Photographs of CFRP tube with a rib after impact test

- 3. 有限要素法による解析
- 3.1 有限要素解析モデル

衝撃実験結果と比較のために有限要素ソル バーLS-DYNA (Ver.970、LSTC 社)を用い解 析を行った。シェル要素を使用して解析モデ ルを作成したが、有限要素モデルの詳細<sup>3)</sup>は 文献3を参照されたい。このモデルの場合(以 下 Model 1 と称する)、補強リブ部のモデル化 はその面積を考慮し、モデルの厚さを厚くし (補強部の厚さ:8.9mm)、さらに積層構成を 調整することで行った。モデルの積層構成は 角 柱本体および補強リブ部がそれぞれ [(0/90)<sub>6</sub>/0]<sub>8</sub>と[0<sub>10</sub>/(0/90)<sub>6</sub>/0]<sub>8</sub>である。メッシュ は解析時間をセーブするためにモデルの上部 は細かく、また、下部は荒く分割したが、総 節点数は8,316、総要素数は8,125 である。

上述のモデル以外に、試験体をより現実的 にモデル化するために補強リブ部をT字型 (図5参照)としたモデル(以下 Model 2と 称する)も用意した。このモデルの総節点数 は9,784、総要素数は9,656である。しかし、 上記2つのモデルの最上部(試験体のテーパ 部を表現した部分)は落錘子に対して垂直で ある。つまり、最上部テーパの中心は不変で、 角柱本体の厚さの中心と一致している。実際 の試験体のテーパ部の中心が試験体の内側に 傾いているのと異なる。そこで、Model 2を 改良し、モデル上部の厚さの中心を内側にず らしたモデル(図6参照、以下 Model 3と称 する)も作製し解析を行った。



Fig. 5 Details of the finite element model

Model 2 および Model 3 の積層構成は本体 および補強リブ部がそれぞれ[(0/90)<sub>6</sub>/0]<sub>s</sub> と[0] (厚さ 10mm を積分点 8 個でモデル化)であ る。なお、全てのモデルにおいて、モデルの 上部 10mm までは安定的な衝撃破壊挙動を得 るために厚さを線形的に変化させた方法を導 入した(図 7 参照)。厚さ一定のモデルと厚さ を変化させたモデルの衝撃応答挙動を比較し た結果を図 8 に示す。初期衝撃荷重値を比較 すると、厚さ一定のモデルが厚さを変化させ たモデルより約 2 倍程度高い。また、破壊過 程での衝撃荷重では厚さ一定のモデルの方が 低くなっている。厚さを変化させたモデルの 方が、より衝撃実験での衝撃応答挙動に近い 傾向を示したので、この方法を導入した。



Fig. 7 Details of the thickness-constant (a) and thickness-changed (b) models



Fig. 8 Comparison of the thickness-constant and thickness-changed models

3.2 境界条件および解析条件

落錘子は剛体とし、Z 軸変位のみを許し、 初速度 15.27m/sec (55km/h) を与えて解析を 行った。試験体の最下部は完全固定し、また、 最下部から 40mm までは Z 軸変位のみを許し、 それ以外の部分はフリーとした。

接触条件は落錘体と試験体の間には面-面 接触条件を、試験体には自己接触条件を与え た。また、モデルの試験体には、Chang-Chang 破損側<sup>4)</sup>を用い衝突時の破壊進展過程をシミ ュレートした。

本解析で用いた CFRP の材料定数を表2 に 示す。

Table 2 Material properties of rectangular CFRPtube used in the FE analysis

| Longitudinal Young's modulus      | $E_a$          | 140.0 GPa |
|-----------------------------------|----------------|-----------|
| Transverse Young's modulus        | $E_{b}$        | 9.0 GPa   |
| Minor Poisson's ratio             | $v_{ba}$       | 0.0219    |
| Shear Modulus in plane (ab)       | $G_{ab}$       | 4.0 GPa   |
| Shear Modulus in plane (bc)       | $G_{bc}$       | 2.0 GPa   |
| Longitudinal tensile strength     | $X_T$          | 2.6 GPa   |
| Longitudinal compressive strength | X <sub>C</sub> | 1.5 GPa   |
| Transverse tensile strength       | $Y_T$          | 0.07 GPa  |
| Transverse compressive strength   | $\dot{Y_C}$    | 0.05 GPa  |
| Shear strength in plane (ab)      | $S_C$          | 0.09 GPa  |
|                                   | -              |           |

## 3.3 解析結果

図9にすべてのモデルにおいての衝撃荷重 -変位線図を示す。同図は同等な衝撃応答挙 動が得られたことを示している。最大荷重は Model 2 が、最大変位は Model 1 の方が一番高 い値を示している。初期衝撃荷重が低く、破 壊進展時の衝撃荷重が比較的高い Model 3 の 方が実験での衝撃応答挙動により近いと思われる。また、破壊進展過程時の衝撃荷重は3 つのモデル共に同等な値を示している。また、 モデルの最上部を厚さを変化させてモデル化 を行うことにより安定的な破壊進展挙動が得られている



Fig. 9 Load-displacement curves obtained from the FEM analysis

4 解析結果と実験値との比較・検討 図 10 に CFRP 角柱の解析結果(Model 3) と実験値との比較を示す。図中の薄色の線は 5 本の実験結果を示す。図より、解析結果は 衝撃応答挙動において実験値とよい一致を示 した。特に、モデルの最上部の軸中心を内側 にずらした Model 3 の結果は、初期衝撃荷重 で実験結果とよく一致し、全体的に実験の衝 撃応答挙動と同じ傾向が得られた。



Fig. 10 Comparison of experimental and predicted (Model 3) load-displacement curves

表3にCFRP角柱の解析結果と衝撃実験結

果(平均値)の要約を示す。Model 3 のエネ ルギー吸収量は実験結果とよい一致を示し、 また、最大衝撃荷重値および最大変位に関し てもよい一致を示した。

Table 3 Comparison between the experimental and FEM results of the rectangular FRP tubes

|                            | Model 1 | Model 2 | Model 3 | Exp.<br>(ave. values) |
|----------------------------|---------|---------|---------|-----------------------|
| Max. load [kN]             | 196.0   | 215.0   | 174.0   | 172.8                 |
| Absorbed<br>energy [kJ]    | 11.8    | 11.9    | 12.1    | 12.8                  |
| Final<br>displacement [mm] | 146.0   | 136.0   | 140.0   | 138.1                 |

## 5. まとめ

本研究では、自動車の前面衝突時衝撃吸収 部材として長方形 CFRP 角柱を開発し、衝撃 吸収部材としての有用性を明らかにするため に落錘衝撃試験を行った。また、有限要素ソ ルバーLS-DYNA を用いて衝撃応答挙動およ び吸収されたエネルギーの予測を行い、以下 の知見を得た。

1) 長方形CFRP 角柱の前面衝突時衝撃吸 収部材としての有用性が確認できた。

2) 衝撃応答解析において、Model 3 の結果 は、初期衝撃荷重で実験結果とよく一致し、 全体的に実験の衝撃応答挙動と同じ傾向が 得られた。また、衝撃吸収エネルギー量に 関しても実験結果と若干差があるもののよ い一致を示した。

「参考文献」

 1) 邉, 夘沢, 金, 青木, 三石, 北野, CFRP 薄肉ベルトの衝撃応答挙動とその 強度,日本機械学会論文集(A編),70 巻 694 号,(2004), pp.824~829.

2) LS-DYNA 970 Manuals, LSTC Co. (2003)

3) H.S. Kim, G. Ben and Y. Aoki, 12<sup>th</sup> U.S.-JAPAN Conference on Composite Materials, (2006), 367~378.

 F.K. Chang and K.Y. Chang."A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentration", J. of Composite Materials, Vol. 21, (1987), pp.809~833.