

自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の安全設計技術

[技術賞(日本複合材料学会)「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」平成22年5月25日]

日大生産工 ○ 邊 吾一

1 まえがき

地球温暖化防止のためCO₂の抑制, そのため
に自動車の軽量化による燃費の向上は緊急の
課題である. 受賞者はこの緊急課題を解決す
るNEDOプロジェクトに委託研究のリーダーと
して参加し, 本プロジェクトの研究開発を成
功裏に実施し, 大きな技術的成果を得た. そ
の功績に関して日本複合材料学会の技術賞が
授与された.

本報告では, このプロジェクトの中でCFRP
を自動車構造へ適用した場合の車体安全設計
技術の開発のために, 自動車構造部材の衝撃
応答シミュレーション技術の確立について,
紹介する.

2 自動車構造部材衝撃応答シミュレーシ ョン技術の確立

側面衝突用のインパクトビームに対しては
曲げ破壊型エネルギー吸収部材であるCFRP/
アルミ合金ハイブリッドビームについて, 正
面衝突用のフロントサイドメンバーに対して
は, 圧縮破壊型エネルギー吸収部材である
CFRP角柱筒について, 両者の衝撃破壊挙動を
精度よくシミュレーション可能な解析手法の
確立を行った. 実物大部材の衝撃実験結果と
有限要素法による解析結果の比較・検討によ
り, 精度の良いシミュレーション技術を確立
(1)できたので, ここではその結果について報
告する.

2. 1 CFRP/アルミ合金ハイブリッドビー ムの衝撃曲げ破壊に関するシミュレーシ ョン技術(2)

(A) 衝撃曲げ実験 衝撃曲げ吸収エネルギ
ーを飛躍的に向上させることを目的として,
全長1mのアルミ合金ビームの引張応力が作用
する面のみに高い引張強さを持つCFRPを接着
したハイブリッドビームを考案したが, CFRP
材の種類と厚さ, 幅を変え, さらにアルミ合
金材とCFRP材間の接着剤を変えて, 表1に示

す18種類の試験体を用意した.

実物大のハイブリッド・インパクトビーム
の衝撃曲げ実験の概略図を図1に示す. 落錘
体を高さ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, ビームに衝突さ
せたが, 試験体支持部に埋めた. ロードセル
で衝撃荷重を, 高速度ビデオカメラによりハ
イブリッドビームの変位を計測した. また,
衝撃荷重と変位の応答曲線の面積から, 変位
が150mmまでのエネルギーを算出した. この変
位の条件は, 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, 1500Jから
1900Jであるが, ハイブリッドビームの吸収
エネルギーは, 表1に示す試験体18種類の中
で最も高いもので1822J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
1027J/kg~1301J/kgに対し, ハイブリッドビ
ームは1510J/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できた.

(B) 有限要素法による衝撃解析 解析には
衝撃解析に特化した“PAM-CRASH SOLVER”を
使用した. この解析モデルでは, 実験で用いた
ハイブリッド試験体, 落錘子, 支持部について
は全てシェル要素でモデル化している. アル
ミ合金は弾塑性シェル要素“MAT103”を使用
し, CFRPは積層シェル要素の“MAT131”で, 「単
一方向複合材グローバル積層モデル」(ITYP
= 1)を適用した. 落錘子, 支持部はシェル要
素に対するヌルマテリアルとして“MAT100”
を適用して剛体定義をした. 飛散防止用ナイ
ロンベルトには弾性シェル要素“MAT101”を
使用した. 落錘子とビームとの間には1mmの空
走距離を設け, 落錘子には初速度15.3mm/msec
と, 質量105kgを与えた.

CFRPはアルミニウム合金のように, 1枚の
シェル要素ではなく, 複数のシェル要素を使

用した. 具体的には, CFRP4plyにつき 1 枚のシェル要素を使用し, 厚さ3mmのCFRPの場合は 24plyとなるので, シェル要素は 6 層として CFRPを表現した. そして, 各CFRPの層間は「強度」のみ入力する接触要素“LINK MATERIAL 301”を使用して, CFRP同士を積層している. アルミ合金とCFRPの間には, 「強度」と「弾性率」を入力する接触要素“LINK MATERIAL 303”を使用して, この要素で接着剤を表現した.

表 1 アルミ合金CFRPハイブリッド材の種類

No.	Type of CFRP	Thickness of CFRP [mm]	Width of CFRP [mm]	Type of Adhesive	Absorbing energy in Experiment [J]	Absorbing energy in Analysis [J]	Error [%]
1	T700	1	36	Urethane	1345	1384	2.9
2	T700	2	28	High-elongatio	1342	1358	1.2
3	T700	3	20	High-strength	1605	1685	5
4	M40	1	28	High-elongatio	1531	1529	0.13
5	M40	2	20	High-strength	—	—	—
6	M40	3	36	Urethane	1583	1574	0.57
7	T800	1	36	High-strength	1626	1737	6.8
8	T800	2	28	Urethane	—	—	—
9	T800	3	20	High-elongatio	1371	1470	7.2
10	T700	1	20	High-elongatio	1549	1595	3
11	T700	2	36	High-strength	1570	1627	3.6
12	T700	3	28	Urethane	1487	1591	7
13	M40	1	20	Urethane	1322	1430	8.2
14	M40	2	36	High-elongatio	1815	1748	3.7
15	M40	3	28	High-strength	1569	1663	6
16	T800	1	28	High-strength	1667	1692	1.5
17	T800	2	20	Urethane	1636	1613	1.4
18	T800	3	36	High-elongatio	1827	1822	0.27

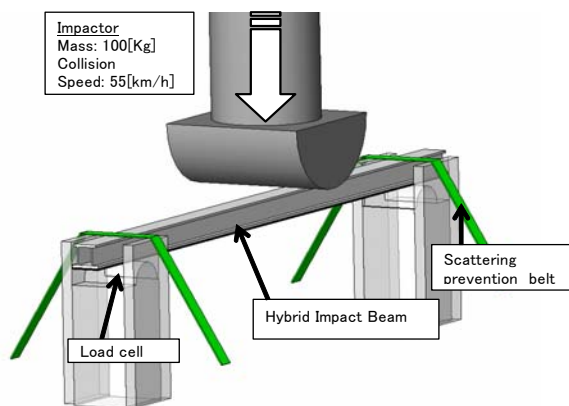


図 1 実験装置の概略図

有限要素法の計算において, 総接点数は 64863, 要素数は56, 456で, 衝撃応答計算における時間ステップは要素サイズによって, ソルバーによって自動的に与えられる. また, 強度則は, CFRPについては最大応力説を用い, アルミ合金については, 要素の初期の厚さが引張りの場合は 5 %減少した場合, 圧縮の場合は 3 0 %増加した場合を破壊と定義し, それぞれの要素を削除した.

C) 数値解析結果と実験結果の比較・検討

前述のTable 1に全試験体の衝撃エネルギー吸収量の解析結果を実験結果の横に記し, 両者の誤差を示す. 誤差の最小値は試験体 No. 4の0. 18%で, 最大値は試験体No. 13の8. 2%で, 全試験体16本の平均値は3. 7%となり, 良い一致が得られた.

図 2 に一番吸収エネルギーが一番高かった, 試験体No. 18のハイブリッドビームの荷重－変位の実験結果と解析値を重ねた結果を示す. 衝撃荷重と変位応答曲線の全体的な傾向は良い一致を示し, 衝撃変位量150mmまでの吸収エネルギーの誤差は0. 27%であった. 図 3 に破壊モードを比較した図を示す. 右側の解析結果の図は, シェル要素を複数枚に分けてモデル化したので, 実験結果のように, CFRPが最外層から, 逐次破断していく様子が見られた. このようにCFRPを複数層のシェル要素でモデル化を行ったため, 逐次破断の視覚化が可能となり, 破壊様相の確認の面でも, このモデル化の手法は有用であると考えられる.

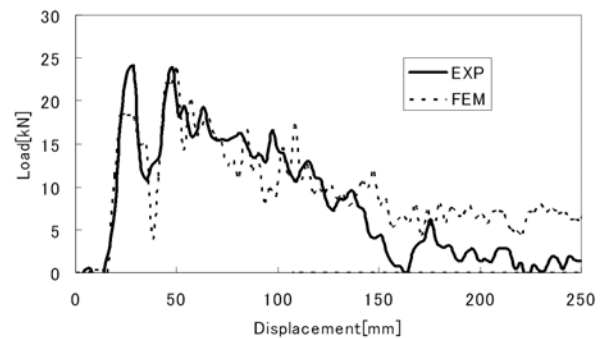


図 2 No. 18の応答曲線の実験と解析の比較

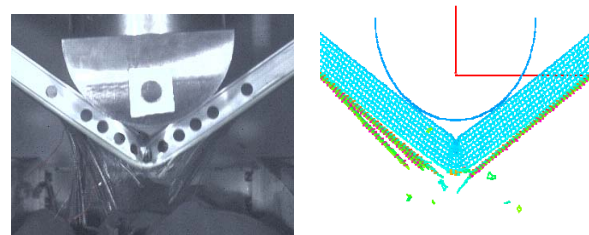


図 3 No18の破壊モードの実験と解析の比較

本研究で開発した有限要素法の有用性を示すために、CFRPの破断だけではなく、CFRPのはく離によって破壊した試験体No. 12の実験結果に解析結果を重ねた場合を図4に示す。この場合も初期の衝撃荷重のピーク以外は、両者の応答曲線よく一致し、変位150mmまでの衝撃荷重—変位線図から求めた両者の衝撃エネルギー量の誤差は7%となった。両者の破壊モードを図5に示すが、両者ともに接着層破壊が先行し、その結果CFRPがはく離し、衝撃エネルギー吸収量が大きくならなかったことを示している。

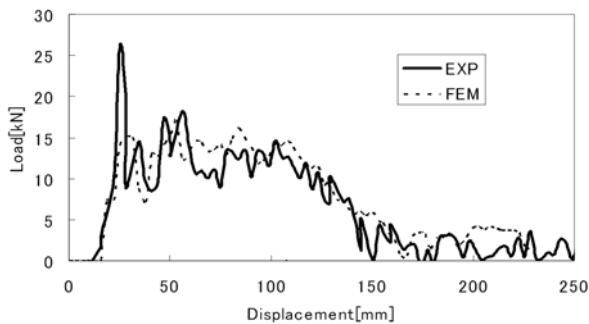


図4 No. 12の応答曲線の実験と解析の比較

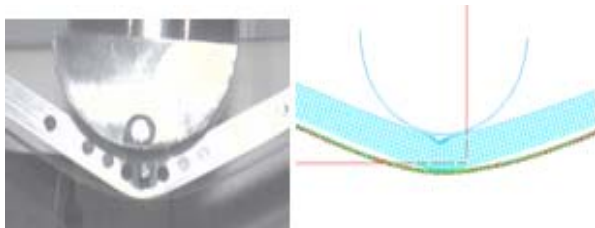
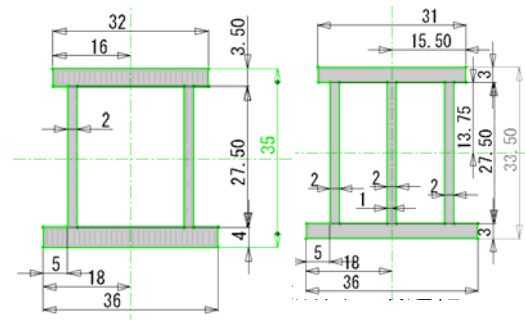


図5 No12の破壊モードの実験と解析の比較

D) アルミ合金断面の最適化⁽³⁾

更なる衝撃吸収エネルギー量の増大を目指して、実験で用いてきた図6の左側のアルミ合金の断面に対して、同図の右側に断面積が等しい別の断面を示す。この断面のアルミ合金に厚さ3mm、幅36mmのT700のCFRPを高伸度接着剤で貼り付けたハイブリッドビームについて、FEMで数値解析を行った結果、衝撃変位が150mmまでの衝撃エネルギーの吸収量が2245Jの結果を得た。この結果は現状のスチール製のインパクトビームの値(1500J~1900J)を大幅に上回り、軽量化の効果も合わせてアルミ合金とCFRPハイブリッドビームの有用性を大きく示した。

2. 2 CFRP角柱筒の衝撃圧縮破壊に関するシミュレーション技術⁽⁴⁾



(A) 衝撃圧縮実験 試験体として、一方向配向炭素繊維プリプレグ（東レ(株)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ディング法により長方形CFRP角柱筒を製作した。試験体の角柱部分の積層構成は $[(0/90)_6/0]_s$ 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7に示す。

落錘衝撃試験は高さ12m（衝突スピード：約

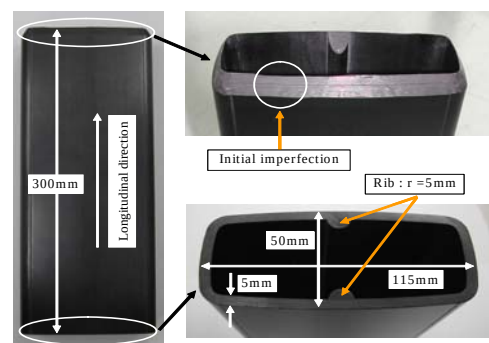


図7 試験体の形状および寸法

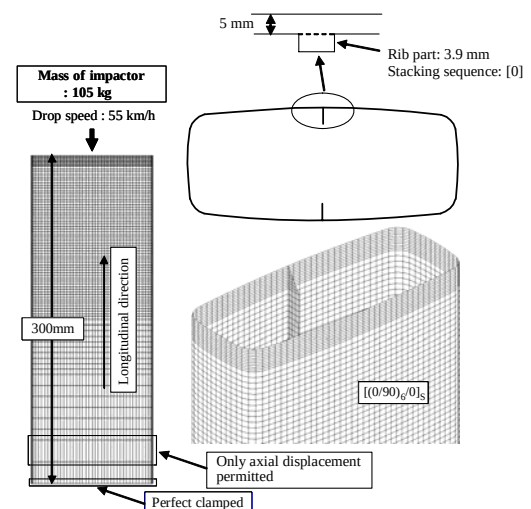


図8 有限要素法解析モデルの詳細

55km/h)から質量105kgの落錘体を自由落下させた。衝撃荷重はロードセルを試験体の下に取付けて計測し、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。落錘体の変位とロードセルの得られた荷重－変位線図の面積から求めた衝撃エネルギー吸収量、最大衝撃荷重および最大変位に関する5つの試験体の平均値はそれぞれ12.8kJ、172.8kNおよび138.1mmであった。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った。

(B) 解析技術の開発 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) のシェル要素を使用して解析モデルを作成した。図8に有限要素モデル (Model 1) の詳細を示すが、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、下部は荒く分割した。その結果、総節点数は9,784、総要素数は9,656である。試験体の先端のテーパ部の中心線が垂直な場合をModel 1、実際の場合に対応させて中心線を角柱筒の内側に傾けた場合をModel 2とした。落錘体は剛体とし、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、要素の破壊則には、Chang-Chang破損則を用いて衝突時の破壊進展過程をシミュレートした。

C) 解析結果と実験値との比較・検討

図9にCFRP角柱筒の解析結果 (Model 2) と実験値との比較を示す。図中の実線はModel 2の解析結果を、破線は5本の実験結果をそれぞれ示す。モデルの最上部のテーパ部の中心線を内側に傾けたModel 2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。

表2にCFRP角柱の解析結果 (Model 1と2) と衝撃実験結果 (平均値) の要約を示す。Model 2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。

表2 解析結果と実験結果の比較

		EXP(Ave.)	Model 1	Model 2
Maximum load	[kN]	172.8	215.0	174.0
Final displacement	[mm]	138.1	136.0	140.0
Absorbed energy	[kJ]	12.8	11.9	12.1

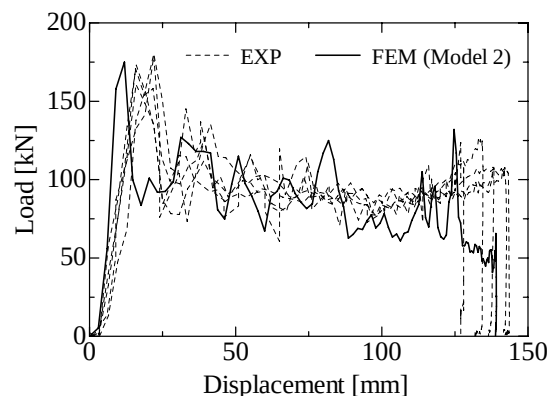


図9 解析結果と実験結果の比較

3. おわりに

自動車の側面衝突時に安全部材として使用されている現行のスチール製インパクトビームの代替として考案したアルミ合金とCFRPからなるハイブリッドビームと正面衝突時に安全部材として使用されているフロントサイドメンバーとして開発したCFRP角柱筒の両部材に対して、衝撃応答挙動、衝撃エネルギー吸収量と破壊モードに関する有限要素法の解析結果は実物大を用いた実験結果と良く一致し、本研究で開発したシミュレーション技術の妥当性を示した。また、衝撃曲げ負荷を受けるハイブリッドビームの衝撃エネルギー吸収量は、NEDOプロジェクトの数値目標である現行のスチール製インパクトビームの値の1.5倍以上になることを示した。

「参考文献」

- (1) 邊 吾一ほか：日本複合材料学会誌, 33巻, 2号, p41-47 (2007)
- (2) G. Ben, et al: Proceedings of the 12th U.S.-Japan Conference on Composites Materials (2006), pp. 379-389.
- (3) G. Ben, et al: Proceedings of the 16th International Conference on Composite Materials (2007)
- (4) H.S. Kim, et al: Proceedings of the 12th U.S.-Japan Conference on Composites Materials (2006), pp. 367-378.