

CFRTP による衝突安全自動車ボンネットの検討

東京大学大学院 工学系研究科
環境海洋工学専攻 安全評価工学研究室
76326 小山 洋 指導教員 高橋 淳

1. 序論

1.1. CFRTP による車両軽量化

自動車における効果的な省エネルギー技術の一つとして車体軽量化による燃費向上が挙げられる。特に比強度・比剛性に優れた CFRP(炭素繊維強化プラスチック)はその効果が大きいことから、次世代の代替材料として非常に注目されている。

しかしながら、CFRTP は現在のところ、コスト・量産性・加工性・リサイクル性等に問題があることから、量産車への本格的な適用には至っていない。そのため、これまで構造解析による軽量化率の算定やリサイクル法の検討に関して多くの研究が取り組んできた。

1.2. 本研究の目的

一方で、自動車を取り巻く大きな問題として認識されているのが交通問題である。自動車対歩行者間衝突において、大部分の歩行者傷害は頭部傷害によって生じる。事故分析データによれば、ボンネットが深刻な頭部傷害を引き起こす主要な原因であることを示しており、その障害リスクはボンネットの構造に依存しているといわれている¹⁾。

先行研究²⁾は、材料物性に着目し、CFRTP(炭素繊維強化熱可塑性プラスチック)の歩行者安全性に対する有効性を示すことで材料の新たな魅力を明らかにした。本研究では、CFRTP を用いたボンネットの構造に着目することで、軽量性とともにも安全性も備えた自動車用 CFRTP 部材の開発とその評価を行うことを目的とした。材料のポテンシャルの高さを有効に活用することで、車両の安全性を高め、CFRTP の更なる適用フロンティアの拡大を目指す。

2. 安全性評価指標と材料物性

2.1. 対人安全性の再定義

従来、材料の安全性は衝撃試験等によって計測される衝撃吸収エネルギーという項目によって評価されてきたが、衝突対人安全性と材料の衝撃吸収エネルギーは同値ではない。対人衝突を考えた場合、重要となるのは「いかに材料が壊れないか」ではなく「いかに人にダメージを与えないか」であり、例えば衝突時には全壊したとしても人体に与えるダメージが少ない材料・構造が本研究で定義する「安全性」である。

本研究では、安全性の評価基準として歩行者頭部保護基準の HIC(Head injury criteria)を用いる。HIC は、頭部外傷分類である AIS(Abbreviated Injury Scale, 略式傷害尺度)と密接な関係があり(Fig 1), HIC を低下させることが、「安全性」を高めることがつながる。

$$HIC = \left[\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \frac{a}{9.8} dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

a : 三軸合成加速度(m/s²)
 t_1, t_2 : $t_2 - t_1 \leq 15$ ms

歩行者頭部保護基準とは人間の頭部ダミーを一定の条件下において、ボンネットに向けて衝突させることで、車両の対人安全性の評価を行うというものである。式(1)で表される、頭部傷害の指標は頭部インパクトが受ける合成加速度の関数 HIC (Head Injury Criterion)を用いて表されており、HIC < 1000 が国土交通省規定の歩行者頭部保護基準の衝突試験におけるひとつの目安である²⁾。

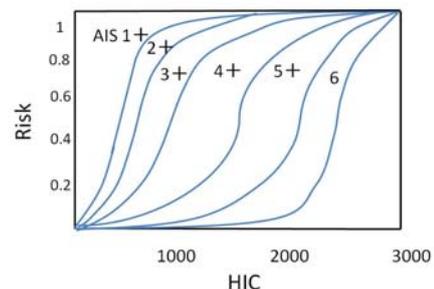


Fig 1 Head injury risk curve

2.2. CFRTP 製ボンネットの開発指針

HIC と材料物性値の関係性については、先行研究²⁾において既にいくつかの知見が得られ、開発指針が作られている。構造面の検討を行う上で、その制約についてまず検討を行った。安全性の高い材料の開発指針とは、①適度なヤング率、②大きな弾性変形域(降伏ひずみ)、③優れた衝撃吸収能力、そして軽量性の指針である④低比重の 4 点を満たすことが挙げられる。HIC 及び最大合成加速度の減少に関してはヤング率・降伏応力の減少が最も有効である。また、ボンネットには耐デント性と呼ばれる塑性変形のしにくさを表す指標があるが、その向上には弾性変形による衝撃エネルギーの一時保管領域を広げる、降伏歪みの増大が有効であると考えられる。

しかしながら、低ヤング率で構成されたボンネットは衝撃に対して大きくたわむことが考えられ、ボンネット下部にあるエンジン部への衝突の危険性が増すこととなる。よって、材料物性の変更によってたわみやすくなったボンネットを、構造で補うことが設計に望まれる基本スタンスとなる。

3. 歩行者頭部衝突シミュレーション手法の構築

3.1. 歩行者頭部保護基準

CFRTP 製ボンネットの構造最適化にあたって、まず既存 Steel 製ボンネットの FE モデル上での再現を試みた。本研究では、現在自動車の歩行者安全性の基準となっている、国土交通省規定の歩行者頭部保護基準の衝突試験を FEM(Finite Element Method)によって再現することで、ボンネットの安全性を評価した。

本研究においても当該基準をもとに FEM 解析を行い、Steel 製ボンネットの評価を行った。なお、本研究の FEM 解析は全て、プリポストには JVISION ver. 2.6、ソルバには LS-Dyna ver. 971 を用いている。

3.2. 頭部インパクト FE モデルの設計

歩行者頭部保護基準に沿った衝突解析を行うにあたり、まずは FE モデルの精密な検討を行う必要がある。衝突物である歩行者頭部インパクトの仕様については、国土交通省及び IHRA によって質量・直径・慣性モーメントなどが詳細に規定されており、本研究で用いるモデルもこれらを満足するものでなければならない。

その各項目の中でも、最も重要とされているのが、自由落下試験における最大合成加速度である。歩行者頭部インパクトの FE モデルに関する検討は既に幾つかの論文において研究されているが、そのほとんどが HIC に直結する自由落下試験における最大合成加速度に焦点を当てており、衝突解析を正確に行うためにはこの基準を十分に満足する必要がある。

本研究では各種公開資料をもとに、上記基準を満足させる、頭部インパクト FE モデルの設計を試みた。Fig.2 に作成した FE モデルを示す。頭部インパクトの構成部材は、塩化ビニルにて構成される Skin 部と、主にアルミニウムにて構成される Core 部とに大別される。規定された条件を満たすように適時再設計・修正を行い、条件にて自由落下シミュレーションを行った。Fig.3 及び Table1 にその結果を示す。

Fig 3 は本研究によって行われた FEM 解析と、実際の自由落下試験の時間-加速度曲線を比較したものである。曲線の外形は良く一致しており、算出された HIC 及び最大合成加速度も±2%程度に収まっていることから、頭部インパクト FE モデルは良好な精度にてモデリングを行うことが出来た。

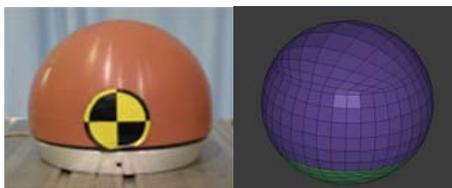


Fig 2 Head-form impactor FE model

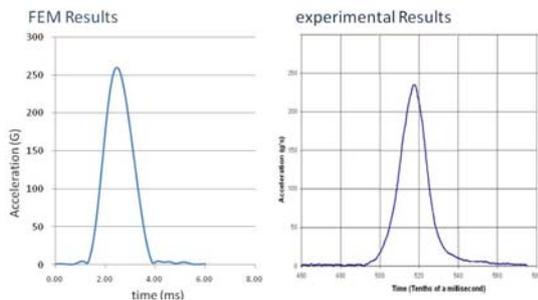


Fig 3 Comparison of time-acceleration curve

Table 1 FEM and experimental result in biofidelity test

	FEM result	Experimental result	% Error
HIC	859	875	-1.6%
Peak acceleration (G)	259	255	1.8%

3.3. 乗用車ボンネット FE モデルの作成

次に被衝突物である乗用車ボンネットの FE モデルを作成した。ボンネットは一般に曲率と角度を持った複雑な形状をしており、裏面のリブ配置や各部材の板厚も衝

突解析において直接的に影響する因子であることから、自力で FE モデルを開発・評価することは困難であるだけでなく再現性に乏しい。

よって本研究では The George Washington University の研究機関である National Crash Analysis Center³⁾にて無料公開されている FE モデルの中から一般的なセダントタイプの車種を選定し、頭部衝突の際に影響すると思われるパーツを抽出・修正を行うことで、ボンネット FE モデルを作成する手法を用いた。

また、その際にはボンネット部分だけではなく、サイドフレームやバンパなど衝突時に干渉する周辺部材や、衝突時、ボンネットの過度の変位によって接触する可能性のあるエンジンルーム内機器等も位置情報を保ったまま抽出することで再現性の向上に努めた。材料物性・要素特性等は Steel 製モデルのものが Default で設定されていたため、本研究においてはその値を採用した。Fig 4 に頭部衝突解析において使用した解析モデルの概観とその衝突条件を示す。

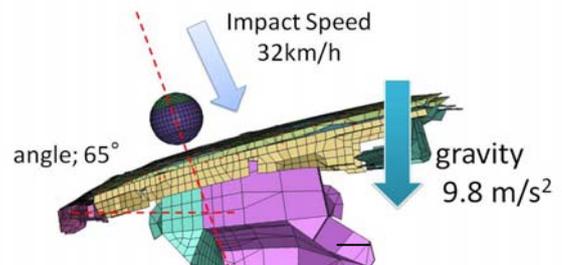


Fig 4 Head-form impact test FE model

3.4. ボンネット中央部における解析結果

Fig 5 及び Fig 6 にボンネット中央部に頭部インパクトを衝突させた際の FEM 解析の結果を示す。ボンネットは衝突点で大きくたわみ、裏面の補強リブの形状を伝う形で応力伝播が起こっている。応力の最大値は衝突点における 307(MPa)であり、ボンネット表面部の降伏応力である 300(MPa)に達しており、衝突部を中心とした局所的な塑性変形を確認することができた。

安全性の基準である HIC は 589、及び最大合成加速度は 192G となった。実車試験による結果は車種によって異なるものの、ボンネット中央部における HIC は概ね 600~1000 の範囲、最大合成加速度は 100~150(G)の範囲のものが多く、それらと比較すると最大合成加速度においてやや大きな値が得られたが、許容の範囲であると考え実車試験における再現性にも問題ないものと考えた。

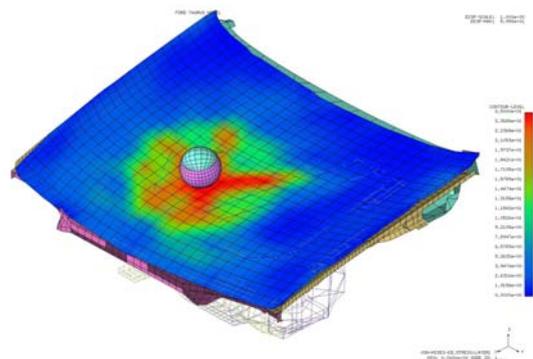


Fig 5 FEM result in steel bonnet (Contour: Von Mises Stress)

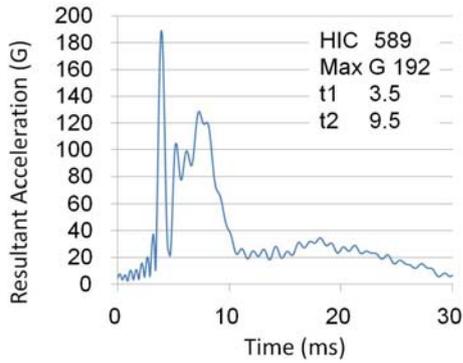


Fig 6 Time - Acceleration curve of head-from impactor

3.5. 危険部位における解析結果

実車試験による報告によると、周辺部材の影響が大きい端部においては HIC が高くなるのが指摘されている。本研究の FEM 解析においても、その検証を行うため複数地点における衝突シミュレーションを行い、危険部位の判定を行った。また、車種によってはエンジン類とボンネットのクリアランスが非常に小さいものがあるため、エンジンルーム内の初期位置をボンネット裏面近傍にまで近づけ、衝突によってボンネット裏面がエンジンに接触した際の影響も併せて確認した。

Table2 にその結果を示す。HIC・最大合成加速度共に中央部衝突における結果よりも大きくなっており、危険部位の存在が示唆された。特にエンジンとの接触時における HIC は、中央部の衝突時の値の 5 倍以上となっている。一般に HIC と死亡確率には密接な関係があるとされ、HIC=1000 のときの死亡確率が 7%なのに対して、HIC \geq 3500 のときには死亡確率は 100%となっており、エンジン部との接触を防ぐためのクリアランスの重要性が示される結果となった。

Table 2 HIC and peak acceleration in dangerous point

	Impact at bonnet edge	Contact with internal parts
HIC	1747	4835
Peak acceleration (G)	276	349

4. 自動車ボンネットの構造最適化

4.1. 開発指針

安全性の指針である、①適度なヤング率、②大きな弾性変形域（降伏ひずみ）、③優れた衝撃吸収能力、そして軽量性の指針である④低比重、の四点を考慮すると、CFRTP パネル材の安全面での優位性は高い。一方で衝突時におけるボンネット自身の変位量の大きさが既存 steel 製ボンネットとの大きな相違点であり、既存モデルによってはボンネット下部に存在するエンジン機器との衝突を起こすリスクを増大させるため、この点について構造面からの検討を行う。

ボンネットとエンジンとのクリアランスを制約条件として考慮し、エンジンとの衝突を防ぐための最適化を構造変更によって行う。構造最適化を行うために、各部材について構成要素を抽出し、それぞれのパラメータ変更と衝突安全性との関連性を調べた。ボンネット構成要素であるリブ構造およびフード構造についてそれぞれの部材ごとに検証を行った。

4.2. リブ構造感度解析

リブ構造の構成要素を Fig 7 のようにリブ深さ h 、リブ幅 l 、設置角度 α 、カーブの r に分類し、感度解析を行った¹⁾。リブによる効果を測定するため、中央部、およびリブ設置箇所の 2 点における安全性を検証する。

その結果、リブ深さが最大変位に対して感度が最も高いことが分かった。リブを浅く設置する方が、いずれの地点においても HIC を低下させるものの、ボンネットの全体剛性を低下させ、その結果エンジンとの衝突が生じる。エンジンと衝突しない程度にリブの再設計を施し、その際の HIC の算出を行った(Fig 9)。またリブの深さは衝突地点間の HIC のばらつきを生じるため、中央部における HIC 低下は達成されたものの、リブにおける危険性は既存モデルよりも大きくなる結果が得られた。

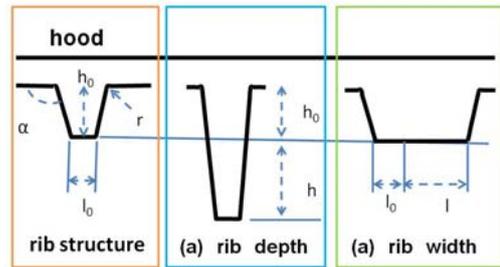


Fig 7 Parameter of rib structure

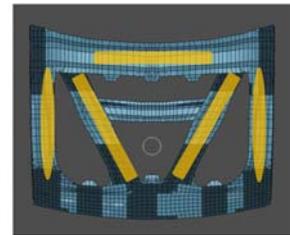


Fig 8 Modified area

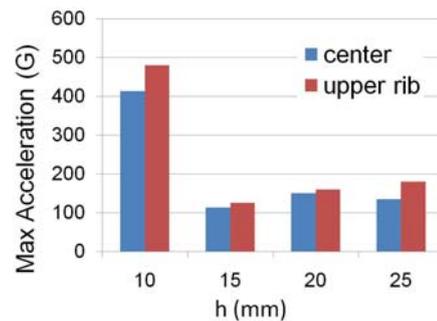


Fig 9 Relation between acceleration and h

4.3. フード構造感度解析

フード構造については、板厚、剛性一定下の板厚、設置角度をパラメータとして感度を調べた。その結果、同じ曲げ剛性を有するフードでもヤング率が低く、板厚をもった構造のものが変位を一定に保ちながらもより HIC が低くすることができることが明らかになった(Fig 10)。ヤング率を低くすることでより長い時間をかけて衝突エネルギーを吸収することが出来るが、この効果が板厚の上昇による剛性の上昇よりも大きいことが検証によって分かった。

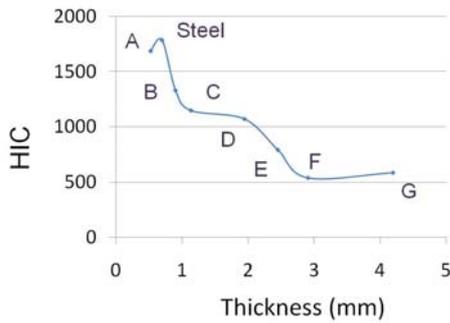


Fig 10 Relation between HIC and hood thickness

4.4. 考察

以上の検証の結果および先行研究における材料物性値感度解析の結果から、①板厚を有するがその代りなるべくヤング率が低く、②大きな弾性変形域(降伏ひずみ)を有し、③荷重保持の性質を有する、④なるべく比重の小さい材料がボンネット用部材として望ましいという開発指針を定めた。

5. ボンネット用 CFRTP サンドイッチ材の開発

5.1. 開発指針

前章において得られた指針に基づいて、CFRP パネル材の開発を行い、力学特性評価を行った。それにより、次章において行う CFRP 製ボンネットの設計時の FEM 解析に用いる物性値を得ることが本実験の目的である。材料構造として荷重保持および低比重の項目の達成が期待されるサンドイッチ構造を採用し、さらに材料として繊維には擬似等方性を確保するために CF3k クロス材を用い、樹脂および心材(コア材)にはポリプロピレン(PP)およびエポキシ樹脂(EP)を用いることで熱可塑性樹脂と熱硬化性樹脂の特性の違いを比較する。

5.2. 材料成形

試験片は、CF/PP フォームコアサンドイッチ材、CF/EP フォームコアサンドイッチ材、比較のために薄板 CF/PP コアサンドイッチ材、及び現在ボンネットに使用されている冷延鋼板の計 4 種類を用意した。CF/PP フォームコアサンドイッチ材については、プレス機を用いてまず 0°/90° および ±45°、2ply の表皮層部分のプリプレグシートを作成した後に、片面ずつコアフォーム材とプレス処理を施す事で成形した。それぞれの材料を成形後、静的・動的三点曲げ試験において比較を行った。

5.3. 静的・動的三点曲げ試験結果

CF/PP フォームコアサンドイッチ材、CF/EP フォームコアサンドイッチ材の実験結果を以下 Table 3, Fig 11~Fig 13 に示す。冷延鋼板および CF/PP コアサンドイッチ材については著しく物性値が異なるため、グラフ上では割愛する。

Table 3 Properties of specimen

	Thickness(mm)	Density(g/cm ³)
CF/PP foam Sandwich	15.4	0.28
CF/EP foam Sandwich	15.1	0.684

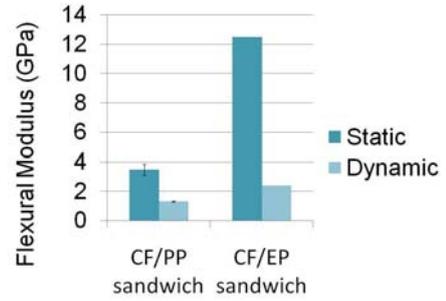


Fig 11 Flexural Modulus

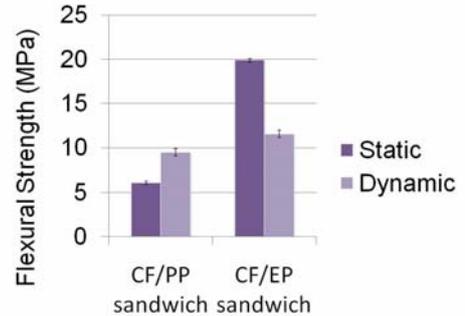


Fig 12 Flexural Strength

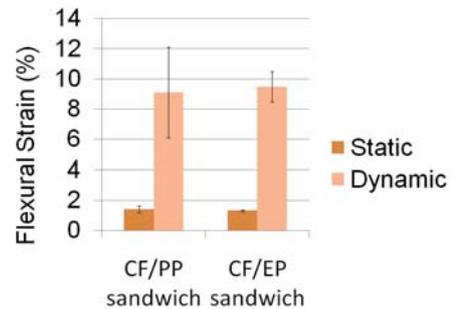


Fig 13 Flexural Strain

5.4. 考察

いずれの材料についても、冷延鋼板と比較して、低いヤング率、大きな曲げ歪み、小さい比重という結果を得ることができた。また、動的曲げ試験の結果から荷重保持の傾向を観測することができた。両者は、衝撃を受けた際の表面層の変形の仕方に違いが見られ、10J のエネルギーを与えた際には、CF/EP フォームコアサンドイッチ材の表面層では繊維の破断が観測され、それによって支持荷重についても 20%低下することが確認された。一方で CF/PP フォームコアサンドイッチ材については、荷重を保持し続ける傾向が見られたため、CF/PP フォームコアサンドイッチ材の動的試験結果から得られた値を用いることとした。

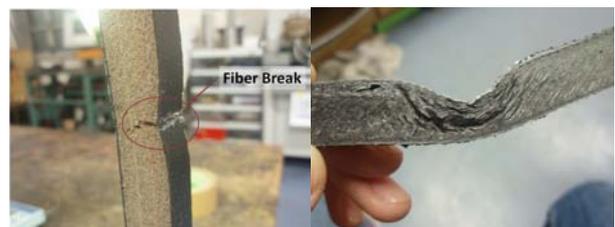


Fig 14 Difference between Specimen

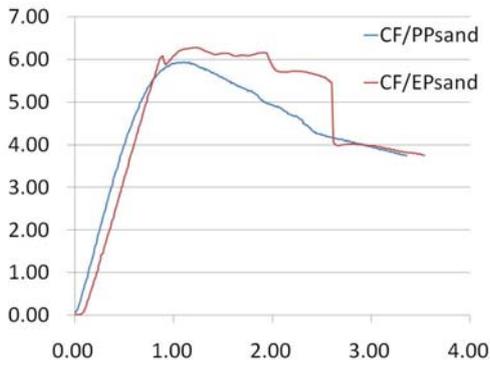


Fig 15 Stress - Strain Curve

6. 車両ボンネットへの適用

6.1. ボンネットの機能要素

試験によって得られた値をもとにボンネットの材料を変え、FEM 解析を行い、その機能性評価を行う。

本研究では、ボンネットの機能性を「健全性・安全性・軽量性」の3つに大別し、CFRTP 製ボンネットが既存 Steel ボンネットの満たしているような機能性の確保をすることができるかどうかを検証した。それぞれの評価項目は、Table 4 の通りである。

Table 4 Specifications for CFRTP bonnet

健全性	4G における最低剛性の確保
	耐デント性の確保
安全性	HIC 及び最大合成加速度の最小化
	衝突時クリアランスの確保
軽量性	既存 Steel ボンネットよりも軽量化

6.2. 健全性・軽量性評価

健全性評価にあたっては、まず重力加速度をモデル全体にかけ、その変位と同等になるような CFRTP 製ボンネットの板厚を求め、それを持って最低剛性の確保とした。単純平板構造において好ましい結果が得られたので、それを採用した。

耐デント性の比較については、各辺 2cm の立方体の剛体をモデリングし、小石とみなしボンネットに衝突させたときの相当塑性ひずみ分布において評価した。Steel モデルにおいては塑性変形が観測される領域においても CFRTP モデルについては、ひずみを生じることはなく、良好な結果が得られた。曲げ歪みの大きさがこの原因であると考えられる。

軽量性については、ボンネット重量約 6.4g となり、steel モデルの 17.4kg から-10kg、50%の軽量化を果たすことができた。

6.3. 安全性評価

さらに、安全性評価を行う。これは2章で行った FEM 解析と同条件で頭部衝突シミュレーションを行った。

この結果より、HIC・最大合成加速度については約 1/2 に軽減することができた。一方で、先行研究において課題とされていた衝突点変位の上昇についてもほとんど既存の Steel モデルのものと同程度に抑えることができた。

一方で、端部における衝突については、やはり HIC を減少させることができず、さらに端部における衝突では、ボンネットの剛性の不足から運動エネルギーを吸収しきれないまま、フレームに接触したため、CFRTP 製ボンネ

ットにおける HIC が既存 Steel モデルよりも大きくなるという先行研究のもう一つの課題については解消できなかった。この点については、フェンダの再設計などの点でも考慮の余地があると考えられる。

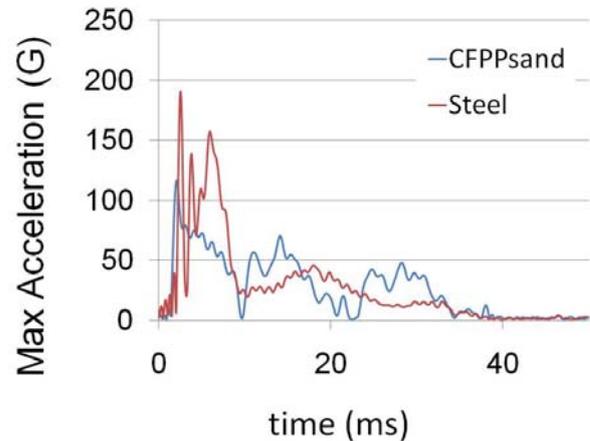


Fig 16 Acceleration curve of CFRTP model and Steel model

Table 5 Comparison of factors

	HIC	Peak Acceleration(G)	Deflection(mm)
CFRTP model	295	112	-55.01
Steel model	589	192	-49.17

7. 結論

本研究では、先行研究において明らかになった歩行者衝突に対して高い安全性を有する CFRTP の適用フロンティアの拡大を目的とし、CFRTP 製ボンネットの構造最適化を行った。歩行者頭部衝突 FE シミュレーションによりボンネットの構成要素ごとの感度解析を行う事で構造最適化を進めた。その結果、剛性一定の条件下では、ヤング率をなるべく低く、板厚を厚く保つ構造が望ましいことを材料物性・構造に対する新たな開発指針をシミュレーションを通じて明らかにした。

また、材料の作成を実際に行うことで熱可塑性フォームコアサンドイッチの材料物性を得、それを FEM に反映させることで、機能性に優れ、従来の課題であった衝突時の過大な変位を抑える CFRTP 製ボンネットの提案を行うことができた。

今後は CFRTP の機能性と適用物に要求される特性を明らかにすることで、本材料のさらなる適用範囲の拡大が期待される。

参考文献

1. Svoboda, Jiri, Pedestrian Protection - Influence of Bonnet design, Josef Bozek research center, 1998
2. 志田龍亮, 軽量・安全を実現する CFRTP 乗用車ボンネット設計, 東京大学工学系研究科環境海洋工学専攻修士論文, 2008
3. (財)日本自動車研究所(JARI), Pedestrian Head impact condition, 2004.
4. National Crash Analysis Center Homepage <http://www.ncac.gwu.edu/>