

CFRTP を用いた異方性中空梁の最軽量構造に関する研究 Structural design of an anisotropic hollow beam using CFRTP

学籍番号 37-116321 高山 耕輔
指導教員 高橋 淳 教授

(平成 24 年 1 月 30 日提出)

Keywords: CFRTP, 異方性, 最適構造設計, 自動車, 有限要素法

1. 序論

近年,ますます地球環境問題が深刻化し,中でも特に石油依存性の高い運輸部門のエネルギー消費が問題視されている.運輸部門におけるエネルギー消費のほとんどは自動車によるものであり,その中でも特に走行段階での消費である[1].今後ますます増える自動車輸送に対して,現在様々な省エネルギー技術が検討されており,その一つに車体の軽量化による燃費の向上がある.

そこで,車体に使われる基礎素材の比較検討を行った結果,高い比強度,比剛性に加えて量産性,リサイクル性に優れた CFRTP が車体の軽量化を行う上で最良の材料であることがわかった. CFRTP を用いた自動車の軽量化に関しては,山本[2]や後藤[3]の先行研究が挙げられる.どちらも自動車のボディ全体の構造を中心に解析を行っているが,パネルやフレームといった部材単位での軽量化については,異方性を利用すると有効であるという結論にとどまっており,異方性を利用した部材の詳細設計には踏み込んでいない.なお,部材形状による異方性の軽量化効果の違いについては,パネルは増厚による剛性上昇効果が大きいいため,等方性材のみで等剛性かつ軽量化の達成が容易である.一方フレームの場合,等方性材の増厚だけでは不十分であり,一方向材により軸方向を強化することで弾性率自体を上昇させる必要があり,異方性導入の意義が非常に高い.

そこで,本研究ではフレーム形状としてハットチャンネルを選択し,異方性を導入することによりスチールハットチャンネルと同等の剛性を持つ CFRTP ハットチャンネルの設計と成形を行うこととした.最終的に達成すべき目標は,スチールと等剛性・等衝撃吸収性を持つ重量比 50% の CFRTP ハイブリッドハットチャンネルを設計しその性能を実証することである.

2. 曲げ剛性の比較による基礎的検討

2.1. 中空正方形断面形状

本章では,前章で述べたフレーム部材への異方性導入の意義について検討する. Fig.1 は中空正方形フレームの断面図であるが,この断面において曲げ剛性 EI (E: 引張弾性率, I: 断面二次モーメント) がスチールと同等となるのに必要な

CFRTP フレームの厚さを求める. CFRTP は等方性材料としてランダム材,一方向性材料として UD 材を用い,それらのハイブリッド割合による軽量化率の違いを計算した.重量の計算は,等剛性となるのに必要な各厚さから断面積を計算して行った.

結果が Fig.2 である.ランダム材のみでスチールと等剛性を実現しようとする,逆に重くなってしまうことが分かる.一方,UD 材を取り入れると大幅に軽量化が進むが,その効果は UD 材の割合が高くなると小さくなる.加えて全て UD 材を用いたハットチャンネルというのは衝撃吸収性や成形性から考えて現実的ではないため,要望に応じた最適なハイブリッド割合を検討する必要がある.なお今回目標としたスチールの厚さ 1 mm と等剛性,かつ重量比 50%を達成するには UD 材 5 割~6 割が適当であることが分かる.

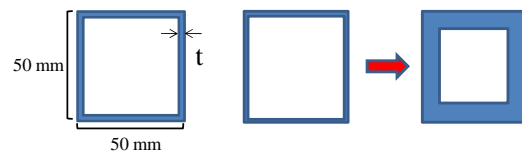


Fig.1 断面図と増厚の概念図

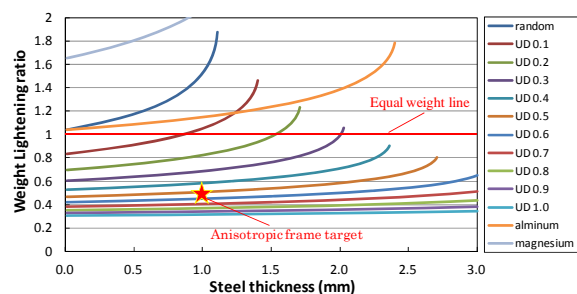


Fig.2 スチールの厚さと軽量化率の関係

3. 中空正方形フレームの静解析

ハットチャンネルの解析に入る前に,剛性を効率的に上昇させる知見を得るために,中空正方形フレームという単純な形状で剛性最適となる構造を検討する.検討項目は以下である.

- 各面の UD 材の最適繊維方向
- 上下面と側面の最適板厚配分

3.1. 解析モデル

本章の解析に用いたプリポストは Altair Engineering 社の HyperMesh, ソルバーは RADIOSS Bulk である. 解析モデルは Fig.3 であり, 中央部両端部分(黄色矢印)に 1500 N ずつ, 合計 3000 N を荷重をかけた時の変位を算出した. 算出はフレームの中央面と中立面の交点部分(赤丸)で行った. なお, スチールの変位は 0.282 mm となったため, この変位を目標値とする.

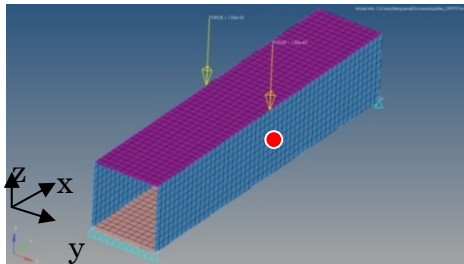


Fig.3 中空正方形フレーム解析モデル

3.2. 材料物性

材料物性値は Table.1 の値を用いた.

Table.1 各材料の物性値

	E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	G ₁₂ (GPa)	ν
Steel	210	210	計算値	0.3
ランダム	35	35	計算値	0.3
UD	120	3	1	0.3

3.3. 解析結果

3.3.1. UD 材の繊維方向変化

UD 材の繊維方向による剛性への寄与度を調べるために, 上下面と側面のそれぞれに UD 材を用い, 繊維方向を変化させることで最適繊維方向を調べた. 用いた板厚は全面 1 mm で固定である. なお, 積層材の設定は[+θ/-θ/-θ/+θ]の板で構成されるアングルプライ積層板[4]とした.

- ・上下面の繊維方向変化 (側面: ランダム材)
結果は Fig.4 である. 繊維方向 0° ~ 20° で変位が非常に小さくなるが, 20° 以降は急激に大きくなる. なお最小値は 10° の時である.

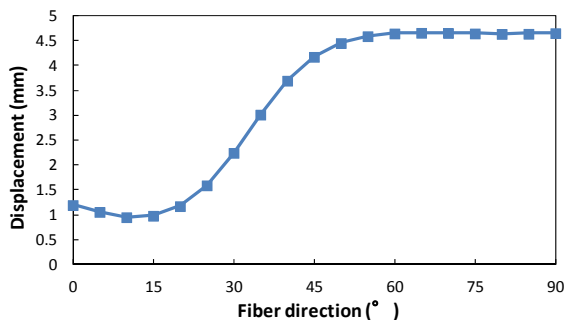


Fig.4 上下面の繊維方向変化

- ・側面の繊維方向変化

結果は Fig.5 となった. 0° と 90° で極端に変位が大きくなるが, 15° ~ 75° の範囲で安定して小さな値をとった. 変位の最小値をとったのは上下面がランダム材の場合は側面 20°, 上下面が最適 10° の時は側面 55° となり, こちらの方が変位が小さい. よってそれぞれの最適繊維方向は, 上下面: 10°, 側面: 55° であることが分かった.

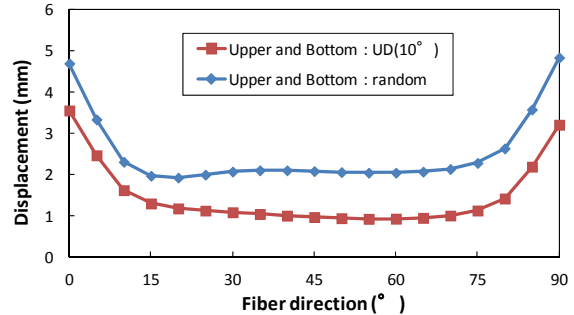


Fig.5 側面の繊維方向変化

3.3.2. 上下面と側面の最適板厚配分

上下面 10°, 側面 55°, 断面積を一定とし上下面と側面の板厚を変化させ, スチールの変位以下となる最小重量(=最小断面積)を調べる.

その結果が Fig.6 であり, スチール比重量 49.8% の上下面 3.7mm~4.3mm の範囲でスチールを下回っており, その中でも 4.0mm で最小値をとる. これらの結果をまとめると Table.2 となる.

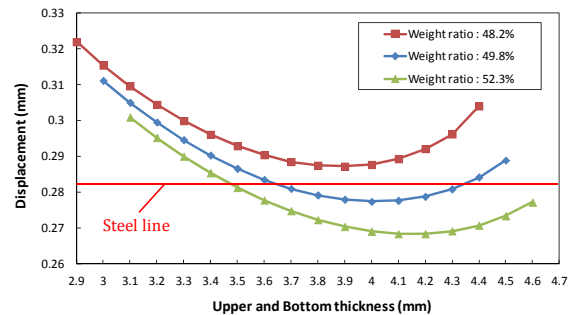


Fig.6 断面積一定における最適板厚配分

Table.2 中空正方形フレームの剛性最適構造

	上下面	側面
UD 繊維方向	10°	55°
厚さ (mm)	4.0	1.95
スチール比重量(%)	49.8	

4. ハットチャンネルの動解析

2, 3 章で検討したことをハットチャンネルの動解析を通して再検討しつつ, 最終的な剛性最適構造を決定する. 具体的には以下を検討する.

- 上面と底面の板厚の最適配分
- 上下面と側面の最適な UD 材繊維方向
- 上下面の最適な UD 材の割合

4.1. 解析モデル

プリポストは HyperMesh, ソルバーは RADIOSS Block110 であり, Fig.7 のように 1/4 モデルを作成した. コンポーネントは図中の通り分けた. なお, 試験条件などは実際の三点曲げ試験に基づいている. 圧子にかかる反力を合計し荷重を計算し荷重 - 変位曲線を描き, 変位 0.25 mm~0.75 mm の範囲で傾きを算出し, これを剛性とした. また, 解析モデルの妥当性検証のために剛性の実験値との比較を行ったが, 1%以下の誤差に収まった. なお, スチールの剛性値は 2.78×10^3 N/mm となったため, これを目標値とした.

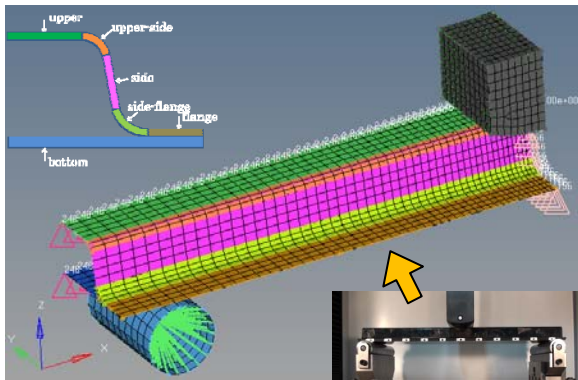


Fig.7 ハットチャンネル解析モデル

4.2. 材料物性

スチール, ランダム材, UD 材を用いたが, 各物性値はこれまでの値と同じである. 破壊強度や破壊ひずみなどの値も設定しているが, ここでは割愛する.

4.3. 解析結果

4.3.1. 上下面の最適板厚配分

スチール比重量約 50% の CFRTP 初期形状の断面積を一定とし, upper と bottom (Fig.7 参照) の板厚を変化させることで最適な板厚を検討した.

結果は Fig.8 である. $t_{upper}=6.0$ mm, $t_{bottom}=2.4$ mm の時に剛性の最大値をとった. これは断面二次モーメントから曲げ剛性を計算した曲線ともよく一致している.

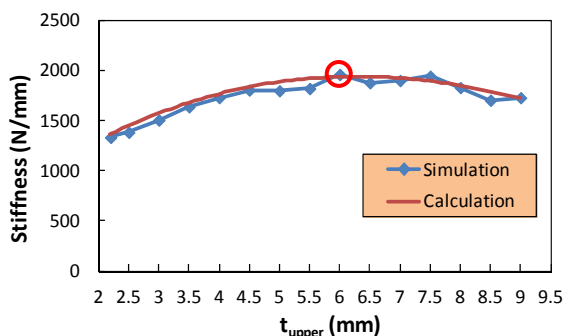


Fig.8 upper と bottom の最適板厚検討

4.3.2. 最適繊維方向の検討

upper & bottom, side に対してそれぞれ UD 材を用いた場合に最適な繊維方向を検討した.

結果は Fig.9 である. 双方とも中空正方形フレームの場合と似た傾向を示し, upper & bottom は 10° で最大値, side は 35° で最大値をとった. しかし, upper & bottom はランダム材とのハイブリッドとした時に 0° がほぼ最大値を示したため, 成形性の面からも 0° を最適値とし, また side に関しては全てランダム材とした場合とほぼ同等であるため, ランダム材が最適であるとする.

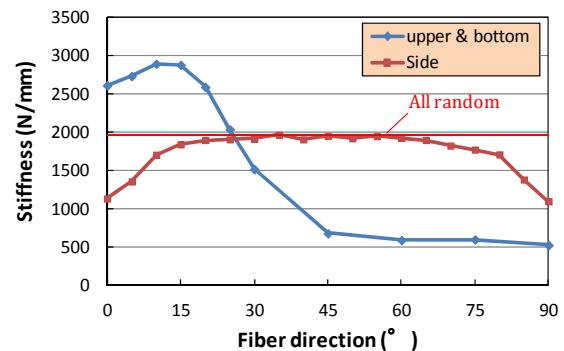


Fig.9 upper & bottom と side の最適繊維方向

4.3.3. 最適 UD 割合の検討

前節の結果から, upper & bottom を UD 材 0° , その他を全てランダム材とし, upper と bottom それぞれの最適な UD 割合を検討した. その結果が Fig.10 である. 成形性や衝撃吸収性も多少考慮して, upper 4 割, bottom 5 割を最適割合とした. これは剛性目標値であるスチールを上回っている. 本章の結果をまとめると Table.3 となる.

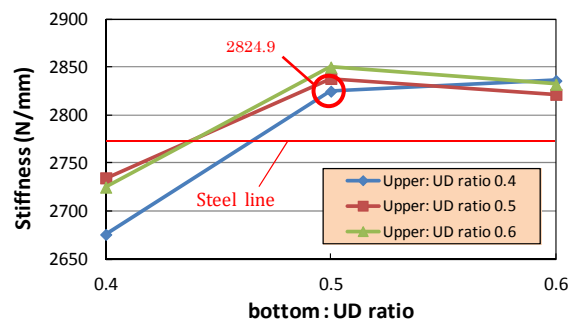


Fig.10 upper & bottom の最適 UD 割合

Table.3 最適ハイブリッドハットチャンネル

	UD ratio	合計厚み (mm)	UD 材 (mm)	ランダム材 (mm)
upper	0.4	6.0	2.4	3.6
bottom	0.5	2.4	1.2	1.2
スチール比重量(%)	49.8			

5. 最適構造の成形と三点曲げ試験評価

5.1. 成形

Fig.11 に示したフローで最適構造の成形を行った。多少解析で設計した板厚と違いはあるが、ほぼ求めていた形状を成形することができた。

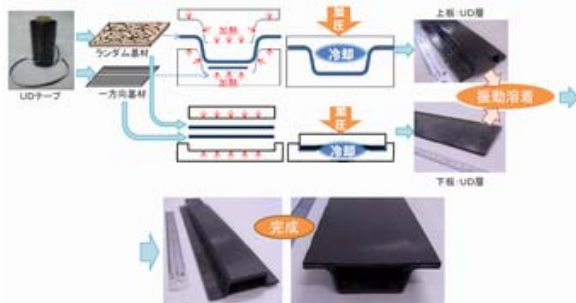


Fig.11 ハイブリッド成形フロー図

5.2. 三点曲げ試験評価

5.2.1. 最適構造と目標値との比較

成形したハットチャンネルで実際に三点曲げ試験を行い、その性能を評価した。その荷重-変位曲線が Fig.12 である。なお目標としたスチールの解析結果も合わせて載せた。成形した最適構造の剛性は 3.20×10^3 N/mm と想定よりも高い値となった。また、強度・衝撃吸収性もスチールを大きく上回る結果となった。

なお、成形品の重量はスチール比 54.7% であった。今回目標の 50% を少し超えたのは、成形の段階で上下面だけではなく側面を余分に増厚してしまったことが原因である。しかし、今回の最適構造の形状に合わせた金型を用意すれば側面を増厚することなく成形できると考えられる。

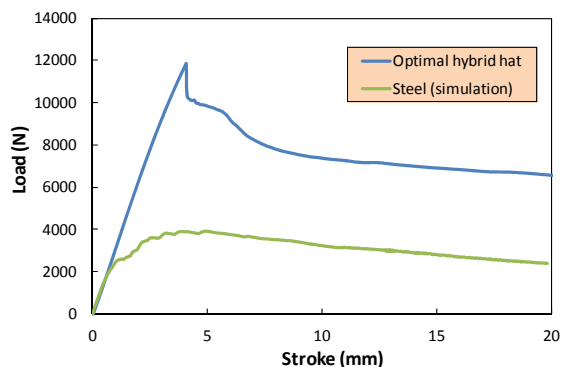


Fig.12 最適ハットとスチールの荷重-変位曲線

5.2.2. 他材料との比較

スチールの解析結果だけではなく、440 MPa 級・780 MPa 級スチールの実験値とも比較した。その結果が Fig.13 である。着目すべきは、剛性・強度・衝撃吸収とも 780 MPa 級を上回っていることである。

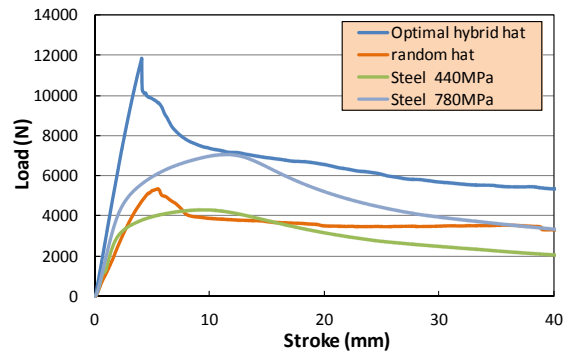


Fig.13 各材料の実験値との比較

6. 結論

本研究では、フレーム形状部材の異方性設計を通して、CFRTP による構造部材の大幅な軽量化を達成することができた。以下にその知見を記す。

- 中空正方形フレームの静解析では、最適板厚配分と最適 UD 材繊維方向を組み合わせることでスチール比重量 49.8% を達成した。
- ハットチャンネルの動解析では、上下面の板厚配分、UD 材繊維方向、UD 材のハイブリッド割合を検討することでスチールと等剛性を実現し、強度・衝撃吸収性も上回った。スチール比重量は 49.8% を達成した。
- 最適構造設計したハットチャンネルを実際に成形し、三点曲げ試験を行った。440MPa に加えて 780 MPa 級に対しても剛性・強度・衝撃吸収性全てにおいて上回り、ハイブリッドハットチャンネルの構造部材としての大きな可能性を示すことができた。また今回の解析を他の部材形状に応用することで、最適構造を適宜設計が可能であると言える。

謝辞

本研究は経済産業省-NEDO プロジェクト「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」(平成 20~24 年度)の一環として行われたものであり、開発中の試料ならびに評価装置の提供等、関係各位のご協力に謝意を表します。

参考文献

- [1] J. Kasai, Experiences and Thoughts About Life Cycle Assessment in the Automotive Industry in Japan, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol.5, No.5, p.313-316, 2000.
- [2] 山本道隆, 安全と環境対策のための CFRP 乗用車ボディの研究, 東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻修士論文, 2006
- [3] 後藤壮滋, CFRP による最適自動車構造の検討, 東京大学工学部システム創成学科卒業論文, 2011
- [4] Ronald F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics (2nd Edition)*, 2007