

論文の内容の要旨

氏名：五味 哲也

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：軸圧壊を受ける CFRP コルゲート構造の応答曲面数値モデルを用いた設計法に関する研究

■背景

地球規模の環境問題に端を発した CO₂削減の取り組みが継続的に行われている。CO₂排出の約 14%を占める運輸部門において、自動車の走行時に排出される CO₂低減要求から、電動化や走行抵抗低減が行われている。今後適用が拡大する電動化による重量の増加と走行抵抗低減に対応するために車体の軽量化が検討されている。車体の骨格構造（以下車体構造）の軽量化は衝突エネルギー吸収性能が低下するため、安全性能の確保が課題になる。その課題を解決するために、軽量化と衝突エネルギーの吸収量を向上させる研究が行われている。主な取組として車体構造を軽量素材に置き換える材料置換が検討されており、その一つとして Carbon Fiber Reinforced Plastic (以下 CFRP) を用いた構造部品の適用が注目されている。

CFRP 部品の開発では航空宇宙分野で広く使われているビルディングブロックアプローチ法を用いる。ビルディングブロックアプローチ法は試験片、要素構造、部分構造、実大構造と構造レベルを段階に追っていく方法である。この方法は、製造製法を含めた強度を確認するもので、素材のクーボン試験から始まり主要な要素構造（コンポーネント）の性能を確認し、最終的に全体構造の試験結果を積み上げて仕様を決定する方法である。このスケールアップしていく方法は過剰な設計や実大試験で目標値を満足しないリスクを回避するための効率的な手法である。しかし、下位の各段階では実大構造の安全性を明確にすることができない為、網羅的に多くの試験を積み重ねていく事が要求され、開発コストや開発期間の増大を招くことになる。ひとたび構造変更が行われると、変化点のある要素構造の試験をやり直し、新たなビルディングブロックを積み上げる必要がある。自動車への適用において、要素構造が数百程度に及ぶことが示されており、ひとたび設計変更が生じると CFRP 構造部品の特性把握のために多数の追加実験が行われる。このような事から CFRP 構造の開発期間は長く、製品化の障害となっている。この事から CFRP の CAE やサロゲートモデルは試験件数を削減し開発期間を短縮する有効な手段として期待されている。

■研究の目的

CFRP の強度評価の際に、樹脂割れや界面損傷など最終破壊に至るまでの関係を論じる必要があり、それをどの様にして簡便に設計基準に取り込むかが重要な課題となっている。自動車の開発現場では部品の形状変更が日々行われており、それによる影響を早く正確に把握し仕様決定する事が求められる。よって本研究は、構造の形状を決定する寸法パラメータを設計変数として、発生荷重及び吸収エネルギーを推定する応答曲面を利用した設計方法を提案する。これにより試験数の削減と開発期間の短縮を実現し開発現場の要請に応える。

■研究対象

車体構造の新たな課題として、電動化された車体の側面衝突におけるバッテリーを保護する性能の向上がある。電気自動車の場合、バッテリー搭載量を増やすためにフロア下に最大寸法を取ってバッテリーボックスを配置する。フロア下に搭載されたバッテリーを保護するためには、内燃機関による車両と比較して衝突試験時のフロア変形量を少なく抑えることが望ましい。変形量の一般的な抑制方法は、車体のスチール部品の厚みを増して衝突時の発生荷重を高め、エネルギー吸収量を増やす事である。しかし、これらの一般的な方法では車体重量が増加するので、軽量化が課題である。そこで本研究の対象は、エネルギー吸収に優れた軽量の CFRP 製のコルゲート型衝突エネルギー吸収部品とした。試験条件は時速 20mph で 10in の剛体ポールバリアに車両側面を衝突させる FMVSS No. 214 Rigid Pole Side Impact Test である。

■論文の構成

第 1 章では、衝突エネルギーを吸収する車体構造の研究事例から、金属の変形によるエネルギー吸収方法と複合材料の破壊によるエネルギー吸収の方法論を述べる。

第 2 章では、試験速度 50mm/min の準静的試験の解析から応答曲面を導出し、内挿する設計変数の仕様において追加実験は必要なく迅速な仕様決定が行える事を述べる。応答曲面のパラメータは、コルゲート形

状の直線部の長さ(Pitch)と積層数(Number of stacks)とした。性能評価はパラメータを変化させた場合の比エネルギー吸収(specific energy absorption 以降 SEA と表す)と単位長さ当たりの平均荷重(Crushing force per unit length 以降 CFL と表す)及び平均荷重(Mean crushing force 以降 MCF と表す)の3項目で行った。SEA と CFL 及び MCF は、応答曲面で精度良く求められる事を述べる。

第3章では、Rigid pole side impact test(FMVSS No. 214)相当の試験速度9.53m/sの落錘試験で得られた結果から、動的性能においても内挿する設計変数の範囲は追加試験が不要で、迅速な仕様決定が行える事を述べる。CFL と MCF は、準静的試験と同様に動的試験においても1次平面の応答曲面で精度良く求められた。しかし、SAEは統計的な有意は見られなかった。試験速度3.28m/sから0m/sに達する落錘試験結果から準静的試験と動的試験で得られた2枚の応答曲面で囲まれた空間が設計空間である事を述べる。

第4章では、先行研究と同様に、動的試験で得られた破壊端部のマクロ断面観察結果から動的平均荷重を予測する理論式を提案する。合わせて、先行研究で提案された理論式に本研究で利用した材料の機械的特性値を代入し、第2章で得られた準静的試験の結果と比較し予測精度を示す。

第5章では、本研究で提案した応答曲面と理論式の成果を述べる。

第6章では、本研究で提案した応答曲面の利用例を用いて設計手順を述べる。

第7章では、本論文の総括として、各章のまとめおよび結言を述べる。

■研究の成果

三菱ケミカル株式会社製カーボンファイバー クロス プリプレグ TR3523(エポキシ樹脂)で製造されたCFRP コルゲート構造による準静的及び動的軸圧縮試験の結果を用いて、コルゲート構造の形状パラメータであるPitch と積層数を設計変数とした2枚の応答曲面を導出した。これにより本試験で内挿する応答曲面の範囲では、形状パラメータが変化した場合でも発生荷重の予測が可能で、設計変更による追加試験が不要となり仕様決定が迅速化した。

又、先行研究で示された、静的軸圧縮を受けるCFRP構想体が発生する荷重を算出する数理モデルの成果を基にして、動的軸圧縮を受けるCFRPコルゲート構造の発生荷重を予測する計算式を示した。これにより、新たな材料が提案された場合でも、限られたクーボン試験結果だけで発生荷重が予測できるので、新材料の採否決定が迅速化した。又、ここで導出された数理モデルから、形状パラメータであるPitch と積層数は発生荷重と1次式の関係である事が示された。この事から1次式で表す応答曲面の妥当性が示された。

以下に本研究の成果を示す

- CFRP コルゲート型部品の動的な軸圧縮荷重を予測する一次式の応答曲面を導出した。応答曲面はコルゲート断面形状の幅を決めるPitch と板厚を決める積層数を設計変数とした。この応答局面モデルで衝突入力に対する発生荷重が机上検討できるようになった。
- 軸圧縮荷重の静動比は、準静的荷重に対して動的荷重は最大で50.1%低下した。先行研究では準静的と動的の破壊モードの違いは観察されていたが、本研究で新たに荷重低下比率を定量化した。また、衝突速度が1.93m/sを下回ると発生荷重が上昇することが分かった。このことから、衝突過程で発生荷重が減少しないことが示されたので、動的な応答曲面で予測された発生荷重でエネルギー吸収量を検討できる事を示した。これにより衝突荷重を受け持つ部品の詳細な検討ができるようになった。
- CFRP コルゲート型部品の準静的な軸圧縮荷重を予測する一次式の応答曲面を導出した。応答曲面は動的な応答曲面と同様に、コルゲート断面形状の幅を決めるPitch と板厚を決める積層数を設計変数とした。この応答曲面モデルでCFRPコルゲート型部品の形状が決まれば発生荷重が予測できるようになり、支持する部品の耐荷重が求められようになった。この結果、開発初期段階で主要なフロア骨格の仕様を決定できるようになり、本手法の有効性を示した。
- コルゲート断面形状の全ての断面積で発生荷重を予測する単回帰モデルと、直線部面積とコーナ部面積に分けて予測する重回帰モデルの予測精度を比較した。全ての面積モデルの予測精度はMAPE 3.95%、相関係数0.986に対して直線部とコーナ部を分けたモデルはMAPE 2.76%、相関係数0.998に向上し、形状要素を分離して検討する有効性を示した。これにより発生荷重の理論式を直線部とコーナ部をそれぞれ分けて定式化する事の有効性が示された。
- 動的なFragmentationモードで発生する圧縮荷重の理論式から、断面中央部の層間剥離と層間せん断及び面外せん断とコーナ部の表面せん断で構成されることを示した。軽量化の検討では、高強度な繊維と樹脂の選定が論じられるが、軸方向の圧縮破壊を考慮する構造においては繊維と樹脂の界面強度の影響など樹脂の靱性等が重要である事が示唆された。このように、破壊メカニズムが明らかになったことで、マイクロレベルの研究やCAE技術研究により詳細な検討ができるようになった。