

車両構体の高強度化および軽量化に向けた 構造最適化手法の構築

鉄道力学研究部 計算力学研究室
室長 高垣 昌和

1. はじめに

近年、鉄道車両に対して安全性や乗り心地の向上、あるいは高速化等、さまざまな要望がある。これらを満たすべく車両構体の設計が行われているが、従来の設計手法では十分な検討を行うためには多くの時間やコストを要する。このような課題に対して、構体の合理的な設計手法の確立を目指して有限要素法（FEM）の数値シミュレーションに基づいた構造最適化手法の導入を検討した。最適化手法は、すでにさまざまな分野において適用されているが、部品レベルでの適用が大半である。ところが、鉄道車両は大規模な構造物であり荷重伝達が複雑であることから、構体全体を対象とした検討が不可欠と考えられる。そこで、本研究では既存の車両構体を対象として車両全体のモデル化を精緻に行い、高強度であるとともに軽量化を実現した構体設計を可能とする構造最適化手法を構築し、その可能性について検討した。

2. 構造最適化手法

2.1 形状最適化

FEM解析における形状最適化とは、FEMモデルのエッジやサーフェスの境界部節点を設計変数として最適化を行う方法である。この手法は、1973年に Zienkiewicz と Campbell¹⁾により提案された手法である。FEM解析と感度解析を統合して構造のつり合い状態と設計感度を求め、その感度を用いて設計変数である節点座標を更新して最適構造を導くものである。これにより、実用的な展開への道が開かれたとされている。

ただし、本研究で適用したノンパラメトリック形状最適化²⁾では、応力緩和のため、サーフェスの変更に合わせて有限要素メッシュを変更するプロセスが、最も困難を伴う。形状最適化プログラムの多くは、最適化ループごとに自動的に有限要素メッシュを再生成することにより、既存のメッシュを変更する処理を回避している。一方、本研究では、形状変更範囲を要素サイズ以下とする制約条件の設定により要素トポロジーの破壊を回避するようにして、効率的な形状最適化を実現した。

2.2 構造最適化アルゴリズム

既存のステンレス鋼製構体の高強度化および軽量化を目指して、構造最適化のアルゴリズムを提案する。本研究では既存構体の最適化を行うための手法としては形状最適化を適用する。ただし、鉄道車両は大規模な構造のため実挙動は複雑で、部分的なモデルでは荷重経路や応力の大きさの評価は困難である。その一方で、高い負荷を受ける領域は、限定的であり、一車両モデルによる最適化を実施することは、効率的ではない。そこで、図1に示すように、まずは精緻な一車両モデルにより応力解析を実

施して高負荷領域を評価することにより構造最適化の実施領域を限定する。次に、部分構体モデルにより構造最適化を実施する。車両構体は同一構造の部位が多くあるため、構造最適化により高強度化および軽量化された構造を当該部位だけでなく構造が同一の他の部位についても適用する。最後に、最適化された構造を適用した一車両モデルにより応力解析を行い、その効果を検証し、最適要件を満たさない場合は、再度、部分領域の評価を実施する。

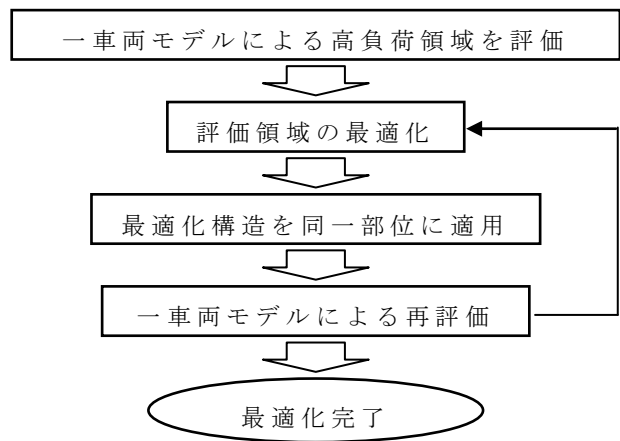


図 1 構造最適化のアルゴリズム

3. 一車両構体モデルによる強度解析

3.1 解析モデルおよび解析条件

構造最適化に向けて、構体が走行時に受ける荷重の伝達経路と発生する応力分布を評価するため、図 2 に示す在来線用ステンレス鋼製車両の一車両構体モデルを用いて FEM による動的応力解析を実施した。解析に適用した FEM モデルは、構体部材が 3 次元シェル要素、スポット溶接部が剛体結合のリンク要素である。ただし、解析対象は構体構造のみであり、床下機器やクーラー等の付帯設備は質点として付加している。

応力解析における負荷条件として、枕ばり両端部の空気ばね取り付け位置に加速度を与えた。1 位から 4 位までの加速度は、走行時において最大応力が生じた時の加速度の測定値をもとに与えた。

3.3 高負荷領域の評価

一車両構体モデルを用いて動的応力解析を実施した結果、枕ばりより中央寄りの側構体、特に窓コーナー部および屋根中央部付近において顕著な応力が発生していることがわかった。本稿では、紙面の都合上、窓コーナー部のみ述べることにする。図 3 には、一車両構体モデルによる解析により得られた構体側面の応力分布を示す。

4. 構体モデルの構造最適化手法

4.1 最適化に向けた FEM 解析

前章で示したように一車両モデルによる動的応力解析の結果から、構体側面の窓コーナー部が高負荷領域となっていることが明らかとなった。そこで、これらの領域に

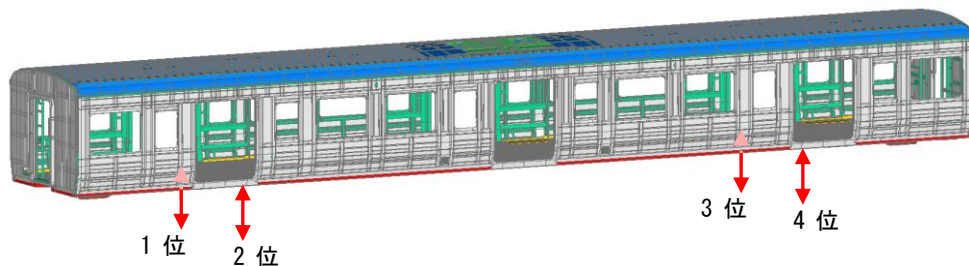


図 2 一車両構体モデルおよび境界条件

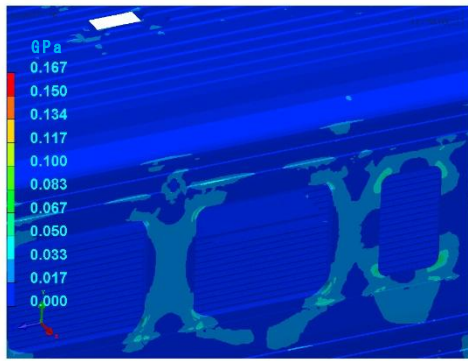


図 3 構体側面窓コーナー部の相当応力分布

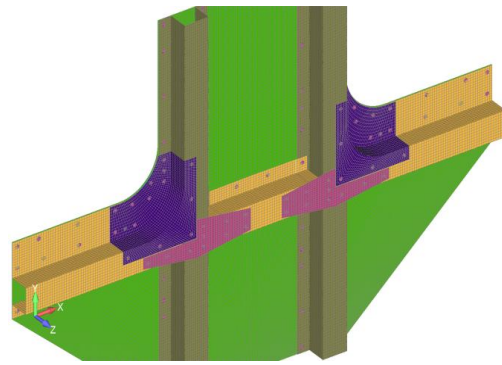


図 4 部分構体モデル

ついて FEM 解析を行うための詳細な部分構体モデルを構築して、高強度化および軽量化を最適要件として構造最適化を試みた。実施にあたっては、FE-Design 社製の構造最適化ツール TOSCA³⁾を活用した。

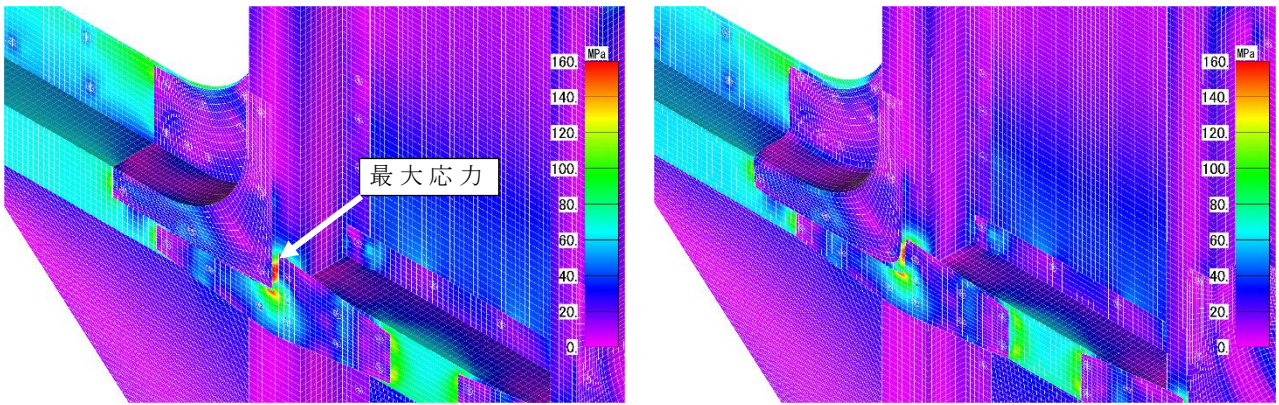
構造最適化を実施するにあたり、図 4 に示すような構体側面の FEM 解析モデルを作成した。この解析モデルは、計算精度を向上させるために一車両構体モデルと比べてより細密なメッシュモデルとした。また、このモデルに適用した要素は、シェル要素を基本とするが、スポット溶接部はソリッド要素を適用してより精緻化している。

構造最適化のプロセスでは、一車両構体モデルから高負荷領域を部分構体モデルとして切り出し、部分構体モデルを対象に応力解析を行う、いわゆるズームイン法⁴⁾を用いている。部分構体モデルの境界条件は、一車両構体モデルの境界節点の変位値を強制変位として与えることにより、一車両構体モデルの負荷状態と同等となるようにした。これにより高負荷領域のみメッシュモデルを細密化して評価することができる。

4.3 構体の最適構造

これまでに示した応力解析モデルと最適化条件を適用して、ノンパラメトリック形状最適手法により、構体側面窓コーナー部の高強度化および軽量化を実現する最適化を実施した。最適化計算は、まず質量を減少させるために、設計領域の要素を均等に縮小させる。次に、修正された形状の応力解析を行い、計算結果を基に応力の高い部位について応力が緩和する方向に対して形状を拡大させる。これを最適化条件が満たされるまで、繰り返し行う。条件設定としては、制約条件として軽量化率の割合を 0%、12%、20%とし、目的関数を応力最大値として、これが最小となるように最適化を行った（設計領域内の最大応力値を低減させる）。

図 5 には、軽量化率 12%とした場合の最適化前後の応力コンターを示す。図中のモデル形状をみると骨組の形状が変化しており、また、応力値も緩和されていることがわかる。最適化後の部分構体は、初期形状に対して質量が 12%低減したにもかかわらず、最大応力は、12%減少している。図 6 には、最適化による骨組構造の形状変化を示す。骨組部材は、直線的に折り曲げたものよりも曲線的な形状にすることで強度が向上することがわかる。つまり、形状変更によって強度を向上させることによって軽量化が可能となる。屋根部等、その他の高応力領域についても同様に構造最適化を実施し、車両構体の同一構造部に適用すれば、車両全体として強度が向上すると考えら



(a) 最適化前 (b) 最適化後
 図5 最適化による応力分布および形状変化（軽量化率 12%）

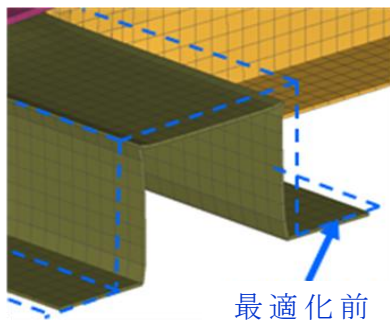


図6 最適化後の骨組形状
 （軽量化率 12%）

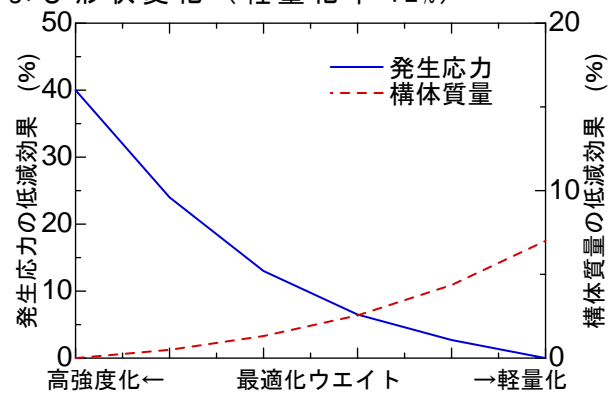


図7 構造最適化による効果

れる。そこで、最適化された部分構体構造を一車両モデルに対して適用し、その効果を評価した。その結果、図7に示すように、構造最適化の制約条件となる最適化の割合を変化させたところ、質量を保持した場合には最大の発生応力が40%低減され、最大応力を保持した場合には7%の軽量化を実現できる可能性が示された。

5. まとめ

鉄道車両構体の高強度化および軽量化を目指して、構造最適化のひとつであるノンパラメトリック形状最適化手法の検討を行った。鉄道車両に適用するため、一車両全体のFEM解析においてズームング法を用いて解析の効率化をはかり、部分領域の構体モデルの構造最適化のアルゴリズムを構築した。評価事例として、ステンレス鋼製車両を対象として構造最適化を行い、最適化した部分領域の骨組構造を一車両全体に適用することにより、車両構体として高強度化および軽量化が可能であることを示した。

参考文献

- 1) Zienkiewicz, O.C., Campbell, J.S., “Shape optimization and sequential linear programming in optimum structural design”, Optimum Structural Design, pp.109-126, 1973.
- 2) 矢川元基, 宮崎則幸, “計算力学ハンドブック”, 朝倉書店, p619, 2007.
- 3) “TOSCA ユーザーズマニュアル”, FE-Design, 2012.
- 4) 横山正明, “高精度計算力学”, 朝倉書店, p119, 1998.