

構造最適化による車両構体の軽量化設計手法

高垣 昌和* 沖野 友洋** 小柳 勝敬**

Lightweight Design Method for Car Body by Structural Optimization

Masakazu TAKAGAKI Tomohiro OKINO Katsuhiko KOYANAGI

A structural optimization method is one of the design technologies for weight reduction. To obtain a lightweight structure using a structural optimization method for a vehicle structure with a framed structure such as a conventional line train, it is necessary not only to use the optimization algorithm but also to set various constraints so that a manufacturable shape can be derived. We develop a structural optimization method aiming at reducing the weight of the framed structure and derived a lightweight carbody structure that can be actually manufactured. Furthermore, we verify that the structure is feasible by constructing a full-scale one for tests. This paper introduces the developed structural optimization method.

キーワード：構造最適化，車両構体，軽量化，有限要素法，骨組構造

1. はじめに

最近の鉄道車両は、走行性能、利便性、安全性など様々な点において高性能化が進んでいる。その一方で、新しい機器の導入や衝突安全設計が取り入れられることにより車両重量が増加する可能性がある。このような背景から、車両構体の軽量化が必要となっており、構体の軽量化の設計手法として構造最適化手法の適用が有用と考えられる。設計において、構造最適化手法は広く活用されるようになってきている。特に自動車、航空分野では設計ツールとして活用され、製品の設計に多用されるまでに至っている。一方、鉄道車両の設計においては、僅かな活用事例はあるものの、まだ一般的とはいえない。

先行研究においては従来の柱や帯板による骨組構造の車両構体に対して、構造最適化手法を適用して車両構体の高強度化および軽量化の検討^{1) 2)}を行い、その有効性について確認した。

本研究では、軽量化する骨組構造の部材を抽出し、鉄道の車両構体として必要な強度、剛性を確保したうえで製造しやすい軽量化構造を導出するための設計手法の確立を目指す。そこで、有限要素法 (FEM) による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、具体的な解析アルゴリズムを構築するとともに、

本手法により構体構造の最適化と試験構体の荷重試験を実施して、軽量化の有効性を確認する。

2. 構造最適化手法

2.1 構造最適化手法について

ある原型となる構造をもとに与えられた設計要件を満たす構造を求める手法として形状最適化やトポロジー最適化といった手法がある³⁾。外形形状を設計変数とする形状最適化や、内部構造も設計変数とするトポロジー最適化は、FEM 解析、感度解析、最適化手法を組み合わせることで構造最適化を実施する手法である。これらは、多数の設計変数を設定できるため、最適化の自由度は高いが収束性の点を考慮し、最適性基準法³⁾などの適当な最適化計算アルゴリズムの適用が必要となる。本研究では、トポロジー最適化により荷重伝達経路を同定し、これをもとに形状最適化の初期形状を決定する。この手法の利点は、強度、剛性、局所座屈や幾何制約など多くの制約条件の考慮が可能なことである。製造可能な形状を得るためにはこれらの制約条件が重要となる。形状最適化の欠点として、FEM 解析の初期メッシュへの依存性が高く、要素のゆがみが生じる場合にはメッシュ更新が必要となるという課題があるが、本手法では予めトポロジー最適化により荷重伝達経路を考慮することによって形状の変化量を抑制し、要素のゆがみによるメッシュモデルの更新を不要とした。

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

** 車両構造技術研究部 車両強度研究室

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。本研究ではより効果的に軽量化を行うため、上述のようにトポロジー最適化と形状最適化を組み合わせた構造最適化手法を構築する。

鉄道車両の構体は大規模な構造体であるうえ、実挙動が複雑であるため、部分的なモデルだけでは荷重伝達経路や応力評価が困難である。その一方で、高い負荷を受ける領域は限定的であり、一車両構体モデルにより最適化を実施することは効率的ではない。また、骨組構造の構体は、多数の同一形状の部材で構成されている。以上を踏まえ、それぞれの部材の構造最適化に必要な負荷条件を算出するため、図1に示すように一車両の初期形状モデルをもとに、FEMによる応力解析を実施する。荷重条件としては、JIS E7106:2006に定める構体荷重試験の垂直荷重、車端圧縮荷重、ねじり荷重、三点支持荷重や実際の現車試験より得られた実測値の適用が考えられる。次に、一車両構体モデルの応力解析結果をもとに構造最適化を実施するための部分構体モデルを作成し、これに対して、一車両構体モデルの応力解析から得られた

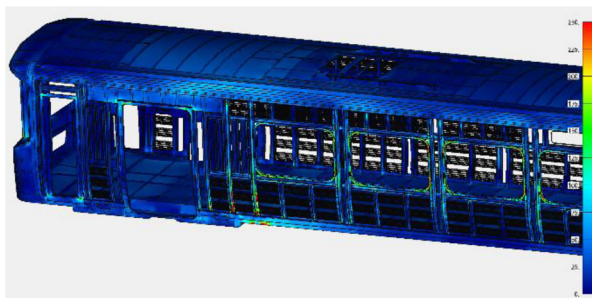


図1 一車両モデルによる応力解析

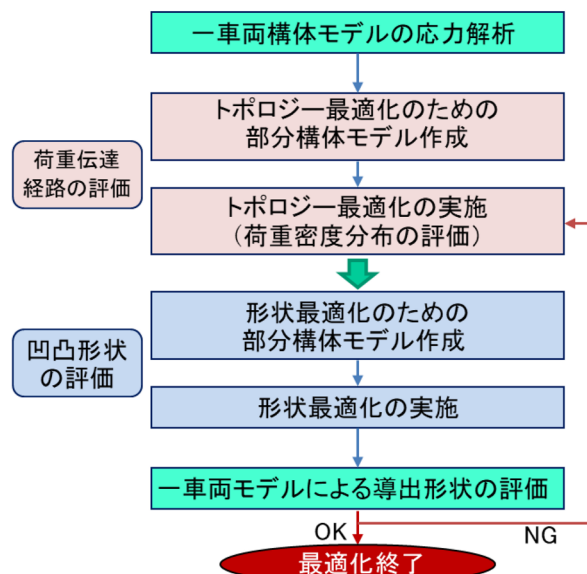


図2 構造最適化のアルゴリズム

荷重条件を与えて構造最適化を行う。最適化の流れとしては、まず、荷重伝達経路を評価するため、部材モデルのトポロジー最適化を実施して荷重伝達密度を求める。この結果をもとに荷重伝達密度が小さい部位を開口部とした部材モデルを作成する。つづいて、この解析モデルをもとに形状最適化を実施し、強度、剛性を保持しつつ軽量化を実現可能な構造部材を導出する。軽量化された部材を評価部位だけでなく、同一構造の部位に対しても適用して車両構体を構築する。軽量化された部材を適用した一車両構体モデルを新たに作成して初期形状と同一条件にて応力解析を行い、その効果を検証し、設計要件を満たさない場合は、再度、部分領域の構造最適化を実施する。これらの解析の流れを図2に示す。

2.3 製造を考慮した最適化条件

構造最適化手法は、荷重条件に応じて質量、応力、剛性などから計算される目的関数を最小にする形状が導出される。制約条件を置くことなく最適化を実行した場合、従来の設計概念を超えるような形状が得られる場合もあるが、ほとんどの場合、製造ができない構造であったり、機能的に設計要件を満たさなかったりして、実用化に至らない。そのため、構造最適化において、応力保持、剛性保持といった基本的な制約条件と併せて、製造制約条件を設定することが重要となる。ここでは、骨組構造の車両構体を対象として、構造最適化により軽量化を実施する際の最適化条件について検討した。

・設計領域の制約

設計領域とは、最適化の対象とする領域を指すが、構造上、最適化により開口部や歪な形状が形成されることを許容できない場合は、設計領域から除外する必要がある。図3に示す出入口部の踏段ばりの橙色や紫色の部位は踏み台の部分であり、応力が小さくても除去することが許されないため、制約条件として、これらを設計領域から外すように設定する。

・同一断面形状

長い柱材などは、折り曲げ加工により製造されるため、長手方向の断面形状が同一になるようにしなければならない。図4のモデルでは、最適化においてXY平面内でのみ形状変更を可能とする。例えば、節点1～3のZ座標値は異なるが、X、Y座標値は共通の値で変化させることにより形状を変更して最適形状を導出する。この制約を適用することにより断面形状のみが形状変更される。

・結合部の平面性保持

外板など平面性が求められる部材と結合される台枠側

ばりや側柱のフランジ部などは外板と同じ平面内であることが求められる。このため、図5のように各面での法線方向に対する変形を制限する必要がある。保持したい面の法線ベクトルを設定することにより、そのベクトルを座標方向とする局所座標系を定義し、形状変更の方向を制約することができる。

・結合部間の形状の整合性保持

柱材や帯材の結合に継ぎ手が用いられる場合など、形状変更が両側で整合しないと部材が結合できなくなるため、このような部位の最適化においては、図6に示すように両方部材の変形が追従するように変形量を与えるようにする。

・型抜き制約

補強材などをプレス加工で製作する場合、型が抜けるような形状にする必要がある。図7に示すような開口部が狭まった形状では型が抜けなくなるため、型を抜く方向に対して、垂直方向の幅が小さくならない方向にのみ形状変更を可能とするようにする。

以上のような制約条件を設定できるように構造最適化手法の機能拡張を行い、製造可能な軽量化構造の評価を実施した。

3. 一車両全体を対象とした構体軽量化

3.1 一車両モデルの応力解析による最適化部位の抽出

骨組構造の車両構体における軽量化を目的に構造最適化を行うため、原型となる構体構造から最適化を実施する部位を抽出する。図2に示す構造最適化アルゴリ

ズムの最初のステップである、一車両構体モデルによる応力解析を実施する。ここでは、FEM解析によりJIS E 7106に準じた構体荷重試験の各試験条件に相当する外力を荷重条件として応力を算出し、各部材ごとに、応力の大きい部位を抽出する(図8)。各試験条件での当該部材に掛かる負荷を構造最適化における荷重ケースとして設定する。本来、負荷の小さい領域ほど軽量化の対象になると考えられるが、鉄道車両の骨組構造の場合、同一形状の部材を多数使用することから、強度や剛性を保持する条件では、負荷の大きい領域を軽量化する形状を求めることにより、他の部位にも適用可能と考えられる。

3.2 構造最適化による軽量化

一車両モデルによる応力解析をもとに抽出した部材に対して、構造最適化を実施して軽量化構造を導出した。最適化の条件としては、目的関数として設計領域の質量、制約条件として剛性保持、最大応力が耐力以下とし、さらに各部材ごとに2.3節で示した製造制約条件を適宜与えている。荷重ケースは、構体荷重試験相当の応力解析

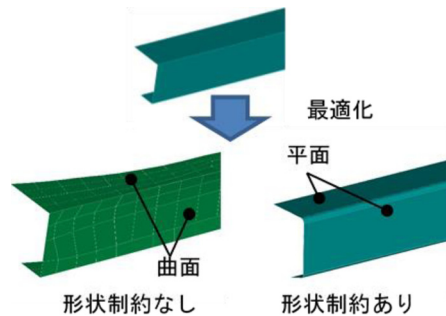


図5 平面性の保持

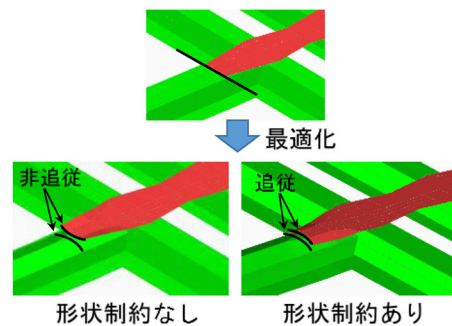


図6 形状変更の整合性保持

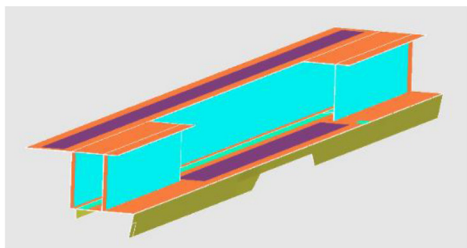


図3 設計領域の制約

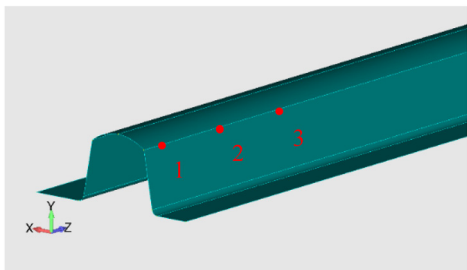


図4 断面形状の保持

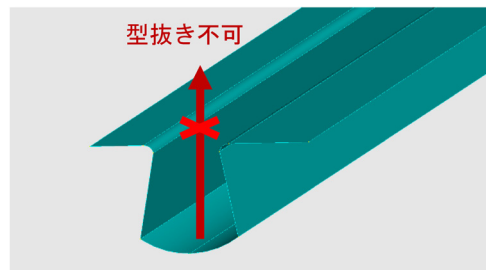


図7 型抜き制約条件

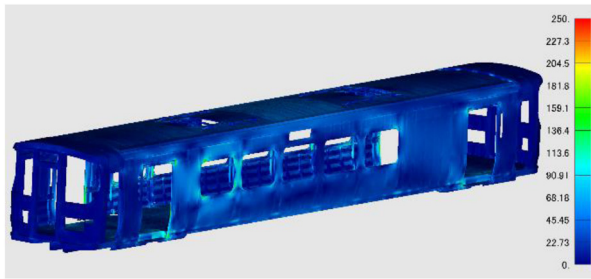


図8 一車両モデルによる応力解析結果
(垂直荷重：ミーゼス相当応力 MPa)

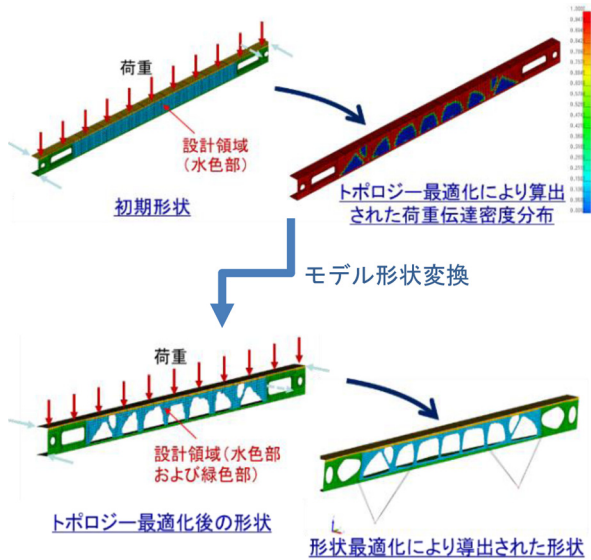


図9 構造最適化の流れ

得られた各部材への負荷状態を再現し、試験と同様に垂直荷重、車端圧縮、ねじり、三点支持の4条件とする。

構造最適化の流れとしては、図9に示すように、はじめにトポロジー最適化により荷重伝達密度分布を求め、解析モデルの低密度の部分を除いたモデルに変換する。次に形状最適化によりさらに軽量化を行い、形状を導出する。

各部材ごとに形状の制約条件を設定して構造最適化を

実施し、軽量化された形状を得た。主な部材について図10に示す。側柱やたるきなどは、従来にない独特の断面形状となっているが、形状の制約条件により製造および実使用が可能な構造となっている。台枠の側ばりは、既存の車両では開口部などはなく、補強材が当てられていることが一般的であるが、構造最適化の結果としては、長手方向の中央寄りの側面に多数の開口部を有する形状となった。また、図9に示されている横ばりや図11に示されているエンジン吊りばり、枕ばりは、既存の形状では、軽量化のために複数の小さな丸穴を開けることがあるが、評価の結果は、非常に大きな開口部を有する形状となった。台枠は、もともと重量があることから、軽量化の余地が大きいものと考えられる。軽量化の検証のため、図11に示すように軽量化された部材による骨組構造の一車両モデルを作成した。各部材の軽量化の効果については、表1に示す通り、最適化前後で12～30%程度の重量減を達成できている。特にたるきの重量の低減率が大きくなっている。また、これらの軽量化構造を適用することにより構体全体の重量は、約7%減となっている。ただし、ここで求めた重量は、解析モデルから算出しているため、実物の構体重量とは異なると考えられる。これは、骨組み部材が曲げ加工の加工上の制約で角部が曲面になったり、部材の結合のための溶接部があったりするため、若干の差が生じることが想定されるからである。これらの点については、後述の実物大構体試験体により検証する。

3.3 一車両構体の軽量化構造の検証

軽量化された部材およびそれらの部材を適用した車両構体を検証するため、軽量化構造の一車両構体のFEMモデルを作成して、応力解析により各部の発生応力を確認し、強度評価を行った。荷重条件および拘束条件は、構造最適化の対象部材を抽出するために実施した応力解析と同条件である。例として垂直荷重の負荷条件での応力分布を図12に示す。図8に示す最適化前の応力分布と比べて全体的に応力が大きくなっているものの、各

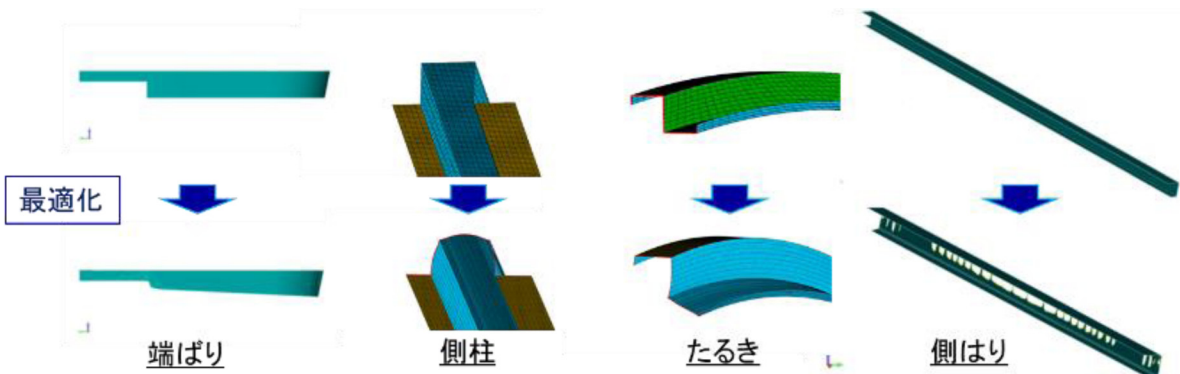


図10 構造最適化による軽量化構造

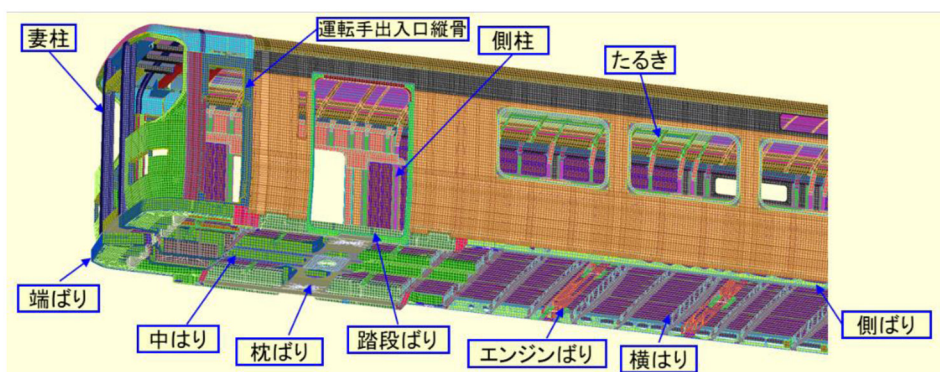
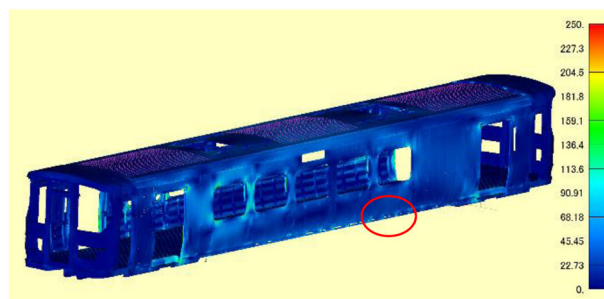


図 11 軽量化構造を適用した車両構体モデル

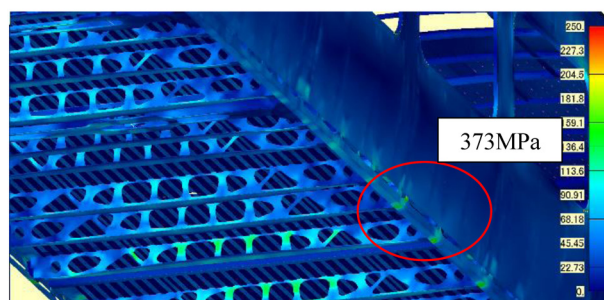
表 1 構造最適化による軽量化

部位	構造最適化による重量低減率 %
横はり	16.6
側ばり	16.2
中はり(前頭部)	22.0
枕ばり	16.9
端ばり	15.5
エンジン吊りばり A	19.1
エンジン吊りばり B	20.3
踏段ばり	12.6
前面貫通柱(妻柱)	23.9
運転手出入口縦骨	11.7
側柱	22.6
たるき(t3)	29.4
たるき(t1.5)	25.3

部材の耐力を超えることはなかった。既存の車両構体において応力が大きくなる部位と軽量化構体において最大応力が生じている部位はよく一致している。軽量化前の構体は、垂直荷重条件において出入口近傍側柱において最大応力が生じたが、軽量化後の構体ではこの部位の応力が最大とはならないものの、他の部位に比べて非常に大きくなっている。以上のように、部材レベルでは形状が大きく変わっているが、構体構造としては、大きな変化はないとみなせるため、構体の評価は、従来と同様に JIS に準じて実施すればよいと考える。よって、車体強度上は問題ないと考えられる。しかしながら、三点支持条件において側柱に生じた応力の最大値は、耐力に近い値であった。今回の構造最適化の制約条件として耐力を超えない条件としたため、このような限界に近い形状になっているものと考えられる。



(a) 構体全体



(b) 最大発生応力部

図 12 垂直荷重時の応力解析結果
(ミーゼス相当応力 MPa)

4. 実物大試験構体による軽量化構体の検証

4.1 構体荷重試験の実施

本手法の妥当性や得られた形状の強度および製造性を検証するため、本手法により導出した軽量化構造を適用した車両構体について、実物大の試験車両構体が製作され、これを用いて通常の車両構体と同様の構体荷重試験を実施した(図 13)。応力や変位などの測定された試験結果をもとに軽量化技術の実用化に向けた検証を行った。

4.2 軽量化構体の検証

JIS に準じた構体荷重試験の各条件における 170 箇所の応力測定において、満車荷重での実測値が耐力を超え



(a) 構体全体



(b) 台枠部

図 13 軽量化構造を適用した試験車両構体

る測定点はなかった。ただし、動的負荷を考慮するため、垂直荷重条件の満車荷重の1.1倍として実測値を換算した応力により強度評価を行ったところ、耐力を超える箇所が8箇所あった。これは、構造最適化の制約条件として満車相当の荷重条件での応力が耐力以下になることを設定したためと考えられる。つぎに、車体の曲げ剛性、ねじり剛性が軽量化構体のもととなった気動車にくらべて低下したが、台枠側ばり下部の変位について試験結果と解析結果を比較したところ、図14のようにほぼ一致

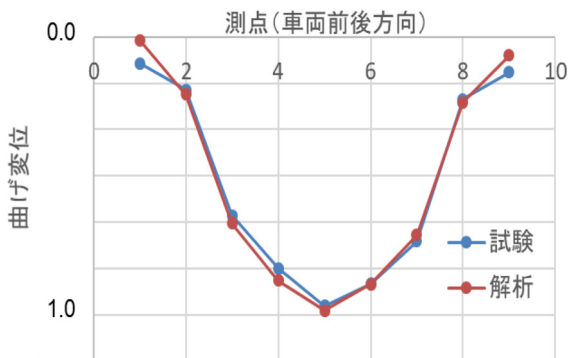


図 14 車体曲げ変位の比較

していた。構体質量については、設計重量に対して製作された構体質量の実測値は400kg程度軽くなっていた。この要因としては、柱材などの曲げ加工において材料の伸びによる板厚の薄肉化が生じているためと考えられているが、これが重量減の主要因であれば、薄肉化による強度や剛性の低下が起りえる。したがって、このような加工上の影響を考慮するためには、構造最適化の条件設定に安全率を加味する必要がある。

5. まとめ

車両構体の軽量化の設計技術として構造最適化手法の適用を考え、この手法の実用化に向けて、骨組構造の在来線車両を対象として手法の検討および製作可能な軽量化構造を導出するため制約条件の設定法を提案した。その結果として、

- (1) 既存の骨組構造の車両構体を対象として構造最適化手法による軽量化を実施するため、製造制約などの条件設定が可能となるよう手法の機能拡張を実施した。
- (2) JISに定められている構体荷重試験の負荷条件および各部材の加工や製造を考慮した制約条件を設定して構造最適化を実施し、主要部材の軽量化構造を導出した。軽量化した部材を適用した車両構体では、7%の重量減となった。
- (3) 得られた軽量化部材を用いて構成された骨組構造を有する鉄道車両の実物大試験構体を用いた構体荷重試験の結果をもとに車両構体の強度評価を行ったところ、概ね基準を満たすことを確認した。
- (4) 上記の構体荷重試験を模擬した応力解析の結果と構体荷重試験の実測値を比較し、ほぼ同程度の応力値と変位量であることを確認した。

以上のことから、本手法の妥当性を確認した。

文 献

- 1) 高垣昌和, 沖野友洋, 八木毅ら: 構造最適化手法による車両構体の強度向上に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.28, No.7, pp.39-44, 2014
- 2) 高垣昌和, 加藤祐貴, 八木毅: 構造最適化技術を活用した車両構体の提案, 鉄道総研報告, Vol.31, No.4, pp.17-22, 2017
- 3) 西眞眞二, 泉井一浩, 菊池昇: トポロジー最適化, 丸善, pp.1-17, 2013