

鉄道車両の台車部品に CFRP 材料を適用する可能性の研究

【2021 年度 KR-080】

明星大学 理工学部 総合理工学科 機械工学系
准教授 小山 昌志

1. 調査研究の背景

鉄道車両の中でも台車の構造体およびサスペンション部品には、一部のアルミ材料を除いて、主に鉄系材料が用いられてきた。2015 年に熊本電鉄で実用化された台車（川崎重工製 efWING）では台車枠のうち、側はりに炭素繊維強化プラスチック（CFRP）を用いることで台車の大幅な軽量化を実現するとともに、CFRP の特性を活かした構造で走行安全性の向上も図っている。この台車はその後 JR 四国も導入し、運用実績を積上げている。しかし、台車部品に限って見ると、CFRP 材の適用範囲が広がっているとは言えない。CFRP 材料は、鉄系材料に比べて、軽量化を図るために優れた材料であることが知られ、また、振動減衰性能も高い。加えて、材料の特性に方向性を持たせる材料設計が可能であるという特徴を有する。CFRP 材料の特徴を活かした台車部品の実現可能性を検討する。

2. 調査研究の概要

CFRP 材料は、金属に比べて比強度が高く、CFRP 部品を採用することで台車の軽量化に貢献できる可能性がある。また、CFRP 材は異方性の強度を有するため、金属部品を同形のままで置き換えることはできない。強度の異方性は炭素繊維の配向によって意図的に設定することができる点が CFRP 材の大きな特徴である。つまり、部材に求められる作用力あるいは荷重方向が明確であれば、CFRP 材では荷重方向に合わせた材料強度を確保できる。

一方で、CFRP 材の大きな課題は、金属に比較したコスト高であり、CFRP 採用のメリットが軽量化ひとつでは、CFRP 採用の動機を得られない場合も多い。そこで、ここで検討する CFRP 部品は、新機

能を実現する部品としての可能性を模索する。例えば、金属材料に比べて、CFRP 材では振動減衰機能を付加できる可能性が考えられる。もう 1 点の課題として、金属材料と CFRP 材の接合には技術的な課題があり、ここでは接合方法も考慮しながら対象部品を選定する。

前述の特徴と課題を念頭において、具体的な選定対象は、台車内でボルト締結されている単体部品のうち、荷重あるいは作用力の方向が明確でシンプルな部品に対する CFRP 材の適用を検討する。このような先例として、牽引装置の一種である一本リンクは、主たる荷重方向は進行方向であり、部品の前後はゴム部材を介して車体中心ピンと台車枠に締結されることから、CFRP 材適用部品としての検討が鉄道総研によって進められた¹⁾。

(1) 車体・台車間のヨーダンパの移動はり式構造

車体・台車間のヨーダンパは、減衰力作用方向が主に前後方向であり、車体・台車とは受座を介してボルト締結されるものであることから、このヨーダンパ受座に着目した。ヨーダンパ受座の中でも、図 1 に示す鉄道総研が提案した移動はり式ヨーダンパ

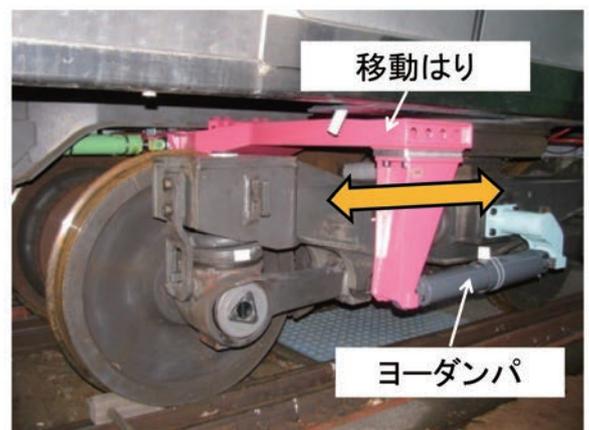
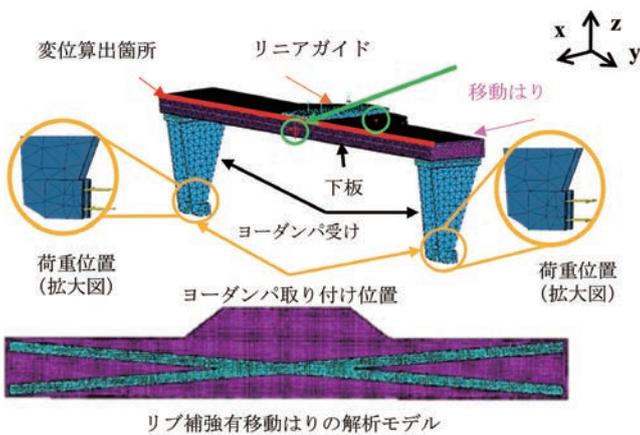


図 1 鉄道総研の移動はり構造のヨーダンパ支持²⁾

支持構造、台車ピッチ運動による振動を車体に伝えないための新たな機能を有するものの、重量増加が課題であるとされている²⁾。

明星大学では、軽量化の一案として、移動はりの試作品における材質であるSS400に対して、比重が約1/4以下である炭素繊維強化プラスチック(CFRP)への変更策を検討しており、これによって60%程度の軽量化が可能であることをFEM解析により確認した³⁾。そこで、本研究では提案している構造の妥当性の検証のため、図2に示すようなFEM解析モデルを作成し、移動はりに生じる変位と応力に着目し、構造の変形抑制が応力と変位に与える影響を明らかにすることを目的とした研究を実施した⁴⁾。その結果、リニアガイドとの接続部分に対して、移動はりのねじれ変形が発生応力と発生位置に大きな影響を与えることが確認された。CFRP製移動はり内部にリブによる補強を施すことによって図3に示すように移動はりに生じる変位及び最大応力をSS400と同程度に低減できることが確認された。また、リブによる補強を含めても十分な軽量化の可能性を確認した。一方で、この移動はり構造あるいはリブ付



(上図) 全体構成
(下図) 内部リブ補強

図2 移動はり構造のFEM解析モデル

きの構造体をCFRPで、SS400と同一形状で製作することはできない。今後は実際のCFRP成形方法も含めて適切な移動はりの構造と形状の解析・検討を進める必要がある。

(2) アンチローリング装置

従来から車体のアンチローリング装置として、トーションバーが用いられることがある。トーションバーを用いることで、上下方向の車体支持剛性とは独立に車体ローリング剛性を高めることができる。金属材料によるトーションバーに比較して、軽量・コンパクトに、高いねじり剛性を持つCFRP製トーションバーの実現性を検討することとする。

提案するアンチローリング装置の構成を図4に示す⁵⁾。トーションバーと横腕をジョイントで組み合わせることで、それぞれを独立した部品とすることができれば、当然ながら、トーションバーはねじり主体、横腕は曲げ主体、縦腕は伸縮主体として材料強度として求められる機能・性能が一方に限定される。そこで、トーションバーと横腕についてCFRPで製作することとした。

明星大学では新たな貨車用台車のサスペンションシステムを構想して縮尺1/8.27の模型台車製作を目指し、図5に示す実験装置とFEM解析モデルを作成した。ここで得られた結果のうち、CFRP棒の断面形状と繊維配向の関係を図6に示す。目標設

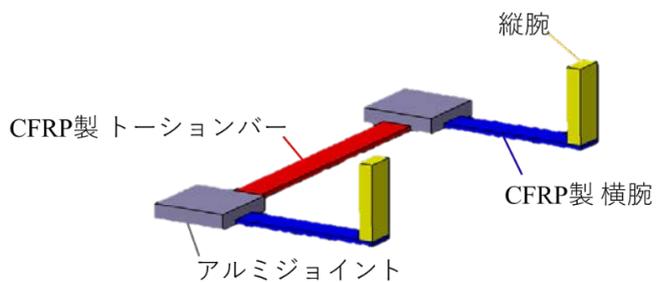


図4 提案するCFRPアンチローリング装置

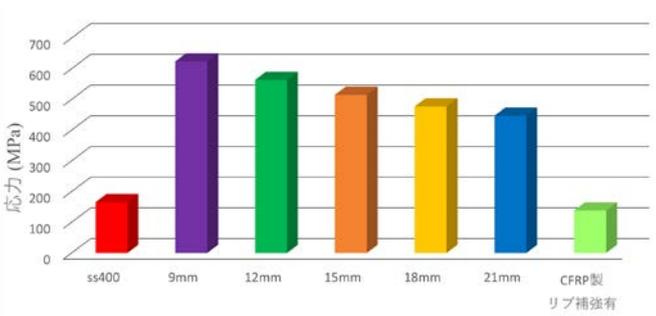


図3 リブ補強による最大応力低減効果

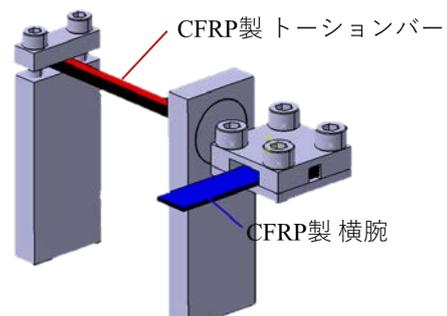


図5 アンチローリング装置のFEM解析モデル

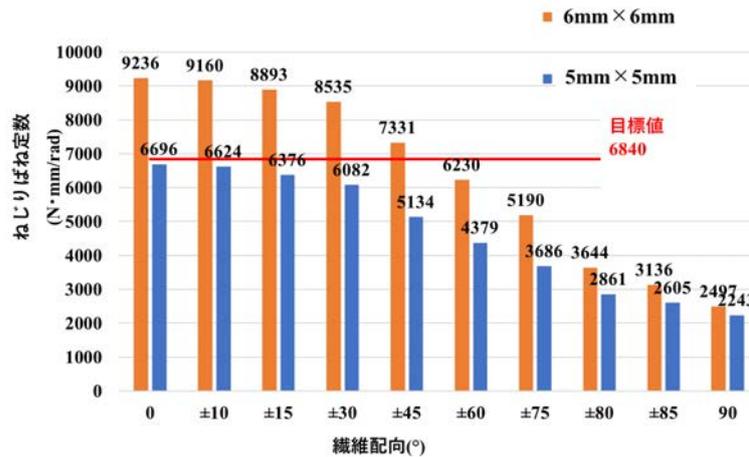


図6 CFRP棒の断面形状と繊維配向によるねじり剛性

定したねじり剛性を実現するために適切なCFRP積層構造、繊維配向を見いだすことができた。今後は、模型台車搭載可能なアンチローリング装置を設計・開発する。また、この模型台車用の装置開発の知見をもって実物大のアンチローリング装置を構想し、性能と共に、軽量化メリットなどを具体的に示したいと考えている。

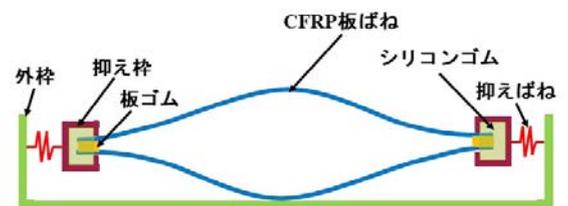


図7 提案する省スペースばね構造

(3) 貨車用まくらばね

大型の海上コンテナであるハイキューブコンテナの国内鉄道輸送には、一部の狭隘なトンネルなどの制約があり、貨車の低床化にはニーズがある⁶⁾。今も低床貨車の開発は続けられている。低床化を実現するためには、コンパクトなまくらばねが必要になるものと考えられる。例えば、現行100系形式の台車のまくらばねにはコイルバネが用いられているが、旅客車で用いられる空気ばねに比べると、コイルバネのばね高さは大きい。空気ばねの自動高さ調整機能は大きなメリットであるものの、一方で作動空気を必要とするため、高コストである。そこで、空気ばねより低コストに、空気ばね寸法程度のコンパクトまくらばねをターゲットにしたCFRPばねを検討した。

明星大学では、上下方向のばねストロークを維持しつつ、セット長の短い省スペースばね構造を図7のような構成で考えた⁷⁾。この提案構造は、曲率を持ったCFRP板ばねを向かい合わせに重ねた構造としている。縮尺1/8.27の模型ばねとして、表1に示す平板、曲板、重ねた曲板をCFRPで製作した。

表1 製作したCFRP板ばね

試験片	形状
Flat	
R40S	
R40D	

ばね定数を測定した結果を図8に示す。図8から、平板や曲板に比べて、重ねた曲板を用いたばねでは、ばね変位が大きくなると、ばね定数が大きくなる非線形特性が得られた。鉄道貨車用台車にとって、軽荷重時には柔らかく、重荷重時に硬い上下剛性となることで、前述の非線形特性は有意なものとなる。今後は、模型台車に搭載可能なCFRP省スペースば

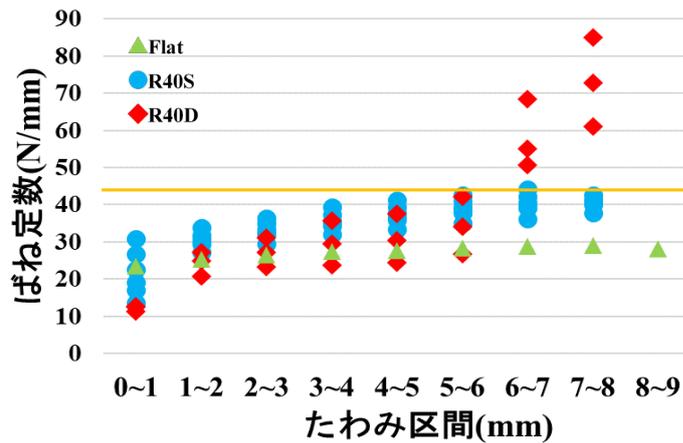


図8 CFRP 板ばねの変位とばね定数の関係

ねによるまくらばね装置を設計・開発する。この模型台車用の装置を開発する際の知見をもって、実物大の貨車用台車のまくらばね装置を構想し、ばね性能と共に、軽量化メリットなどを具体的に示したいと考えている。

3. 調査を終えて

ここでは CFRP の適用可能性のある台車部品を選ぶにあたって、台車内でボルト締結されている単体部品のうち、荷重あるいは作用力の方向が明確でシンプルな部品を検討した。その結果、車体・台車間のヨーダンパの移動はり構造、車体アンチローリング装置、貨車用台車のまくらばねに着目した。鉄道総研が提案している移動はり構造は、SS400 で試作された実績があり、同型のものを CFRP で置き換えた場合には質量を 60% 程度に小さくできる可能性を確認した。ただし、具体的な成形方法は未解決であり、今後の課題である。アンチローリング装置のトーションバーと横腕を独立した部品として扱い、模型台車への装備を念頭において、CFRP トーションバーの形状と繊維配向を検討した。低床貨車用まくらばねの実現を目指して、より寸法条件の厳しい模型台車で CFRP 製の省スペースばねを試作して、軽荷重時に柔、重荷重時に剛な非線形ばねの実現可能性を確認した。当面、明星大学では縮尺模型で実証的に開発・試験を行い、CFRP 部品の設計・成形方法の検討・性能確認を実施する。その上で、実物大については構想設計を行いたいと考えている。□

参考文献・引用文献等

- 1) Sho YAMANAKA, Yoshihiro MASUDA and Mikiya ITO : Fundamental evaluation for application of CFRP to rolling stock of railway, JISSE-14, 2015. Dec.
- 2) 相田健一郎ほか：鉄道車両の車体上下振動に対するヨーダンパの影響と新たな取り付け構造の効果検証、日本機械学会第 26 回交通・物流部門大会、2017
- 3) 七海勇輝、小山昌志、宮本岳史、相田健一郎：移動はり式ヨーダンパ支持構造の CFRP 化による軽量化案、日本設計工学会 2021 年度秋季大会研究発表講演会講演論文集
- 4) 七海勇輝、小山昌志、宮本岳史、相田健一郎：CFRP を用いた移動はり式ヨーダンパ支持構造の構造体形状の研究、JRAIL2021、PS2-13、2021.12.1 ~ 3、WEB
- 5) 平山翔大、宮本岳史、小山昌志：模型台車用 CFRP トーションバーの開発、JRAIL2021、PS2-7、2021.12.1 ~ 3、WEB
- 6) 渡辺富博、二田義規、柴崎隆一、赤倉康寛：コンテナサイズに視点をおいた国際海上コンテナ輸送に関する基礎的分析、国土交通省国土技術政策総合研究所資料 No.478、p.2 (2008)
- 7) 草間悠允、宮本岳史、小山昌志：ストローク/セット長の比が大きい省スペースばねの開発、JRAIL2021、PS2-1、2021.12.1 ~ 3、WEB