

最近の車両強度に関する研究開発状況

石塚 弘道*

Recent R&D Status on Rolling Stock Strength

Hiromichi ISHIDUKA

In RTRI, in the field of research on the rolling stock strength, R & D regarding lowering vibration of the rolling stocks by improving their rigidity and strength as well as that on improving rolling stock strength from the viewpoint of preventing accidents and failures before they occur are now on going. A part of the test results using full scale models or test pieces are described in this paper. They are including research themes on the impact strength of high rigid car bodies made of stainless steels, the evaluation of crack propagation and the development of non-destructive inspection method for the hollow non-induction hardened axles, the development of estimate method for actual load of axle bearings of Shinkansen vehicles and the development of detecting system for failures in axle bearings.

キーワード：ステンレス車体，剛性，制振，中ぐり車軸，車軸軸受，実働荷重，監視システム

1. はじめに

鉄道総研では、鉄道車両の強度に関して、強度・剛性向上による振動低減に関する研究開発とともに事故・損傷を未然に防止する観点からの研究開発も進めている。車体、台車枠、輪軸、軸受等の重要部品を対象とした強度・剛性向上策、強度評価法、実働荷重（応力）測定法および非破壊検査法等の開発である。研究テーマ名により例を示すと、「車体構造の側面衝撃特性に関する研究」、「台車枠溶接部の疲労強度向上策とその評価法」、「在来線車両用中ぐり車軸の超音波探傷法の開発」、「計算力学による車輪の強度評価」および「車軸軸受の軌道面傷評価に関する研究」などをすでに実施した。これらの開発においては、試験片サイズでの評価、また、シミュレーションによる評価に加えて、実機による試験・評価が不可欠である。

本稿では、「高剛性ステンレス車体の衝撃強度に関する研究」、「在来線用中ぐり車軸におけるき裂進展性評価と検査体系に関する研究」、「新幹線車軸軸受の実働荷重推定法の開発」および「車軸軸受監視システムの開発」について、これらはいずれも現在実施中であり結論が得られているものではないが、実機による、あるいは、その前段階としての試験片による評価結果の一端を紹介する。

2. 高剛性ステンレス車体の衝撃強度に関する研究

車体の強度の話題からは多少それるが、これまでの鉄道総研の検討により、ステンレス製通勤電車は屋根と床が独立に振動する傾向が強く、また複数の弾性振動の固有振動モードが乗り心地に影響を与えていることが示されている^{1) 2)}。このように車体各面が独立に振動する特性を持つことは乗心地向上のため振動低減策を実施するうえでは不都合であり、できるだけ車体全体が一体となって振動する特性に近づけることが望ましい。

ところで、車体を構成する部材として、設計上は強度部材とカウントされていないものの一定の強度を持つと考えられる「内部骨組」と呼ばれるものがある。例えば、側引戸収納部を構成する戸袋内柱や天井の蛍光灯を取り付けるための灯具受などが内部骨組の例として挙げられる。これらのいわゆる非構造部材を活用するとともに、それらを強化し、あるいは相互に結合する補助部材を設けることにより、構体そのものに手を加えることなく車体の剛性向上を図る検討を行っている。また、このような構造とすることで、ステンレス製通勤電車でありながら車体各面が独立に振動する傾向を抑え、車体全体が一体となる振動特性に近づけられると期待され、さらに車体としての強度向上にも寄与すると考えられる。

このようなコンセプトに基づき、構体としては一般に使われているステンレス製通勤電車と同様の構造をもつが、内部骨組等による剛性向上部材を装備した鉄道総研独自の試験車体（以下、「剛性試験車体」と呼ぶ）を製作

* 車両構造技術研究部

特集：車両技術



(a) 外観



(b) 車内の補剛部材取り付け状況

図1 製作した剛性試験車体

した。剛性試験車体の外観と剛性向上部材の取り付け状況を図1に示す。具体的には、屋根構体のまくらぎ方向補剛部材(天井骨組補強)・側構体の戸袋内柱・台枠のまくらぎ方向補剛部材(床根太)を結合して剛性の高いリング状構造を形成するとともに、灯具受および幕板受といった長手方向部材を活用してそれらリング状構造を相互に結合している。このように車体の断面を剛性の高い部材で強化することで、車体の側面からの荷重に対する強度向上にも有利になると考えている。なお当面は補剛部材の条件変更や交換が可能となるよう、ボルトにより補剛部材を取り付けているが、将来的には溶接により固定する予定である。

2007年秋に剛性試験車体が竣工し、鉄道総研に搬入された。現在、補剛部材の条件を変更しつつ加振試験を実施して、振動特性への影響と剛性向上効果の確認を行っている。これらの試験結果については近々報告する予定である。また、補剛部材を部分構体に設置して荷重試験を行うなどにより、内部骨組を活用した補剛部材による車体強度向上に対する有効性についても検証を行う計画である。

3. 在来線車両用中ぐり車軸におけるき裂進展性評価と検査体系に関する研究

次世代の通勤・近郊電車の量産先行車として開発されたE331系電車には、様々な開発技術が反映されており、その一つとしてDDM(直接駆動主電動機)が初めて搭載され、中ぐり径40mmの非高周波焼入れ車軸が採用された。これまで高周波焼入れ車軸および非高周波焼入れ中実車軸の車輪座のき裂進展性については評価を行ってきたが、車輪座に近接した位置にDDM継手を持つ構造(以下、DDM構造と記す)の車軸について、各はめ合部およびはめ合部のつなぎR部の強度評価を行った例はない。そこでDDM構造の非高周波焼入れ中ぐり車軸のき裂進展性と、近接する2箇所のはめ合部の探傷精度の確保および検査周期について検討を行っている。き裂進展性を評価するため、在来線用非高周波焼入り中ぐり車軸の素材の疲労強度を求めた後、模擬輪軸(通常車輪・車軸のはめ合いを模擬したものでありDDM構造ではない)を用いフレットング疲労特性を調査した。その結果、図2に示すように、素材の疲労限度として313MPa、模擬輪軸の疲労限度として173MPaを得た(1×10^7 回を打ち切り限度として)。なお、180MPaの応力で 5.6×10^6 回の疲労試験を実施した模擬輪軸の車輪座には、図3に示すように、深さ約170 μ mのフレットング疲労き裂が発生していた。

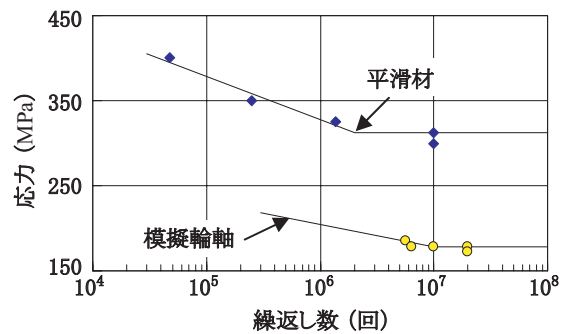


図2 疲労試験結果

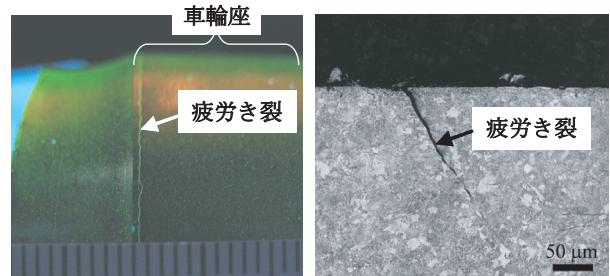


図3 ϕ 56mm模擬輪軸の車輪座に発生したフレットング疲労き裂

今後、DDM構造を考慮した ϕ 56mm模擬輪軸の疲労試験を行うとともに、車輪座およびDDM継手座等に人工きずを導入した実物大の試験輪軸を製作し疲労試験を

行う予定である。

従来の中ぐり車軸用超音波探傷装置は、中ぐり径φ60mmの車軸探傷用に開発されてきたが、DDM構造車軸の中ぐり径はφ40mmであるため、探傷ヘッドをより小型化する必要が生じた。探傷ヘッドの限られた空間に必要な機能を集約するために、探触子の小型化、探触子押付け機構の簡素化、接触媒質（探傷油）の供給通路および超音波送受信の配線の最適化などの、探傷ヘッド周辺を主とする自動探傷装置の改造を実施した（図4）。また、探触子が接触する中ぐり内径面の曲率半径が小さいため、超音波が内径面で屈折入射する際に円周方向へ拡散することが予想された。そこで、超音波を発振する振動子形状を通常の平板型と集束型の2種類とし、超音波の屈折角を40、45および50度で変化させた時の性能を比較する目的で、探触子の基礎特性評価試験片を製作した。今後、基礎特性試験片を用いて、最適な探触子の選定および自動探傷装置での探傷条件の最適化を図る予定である。

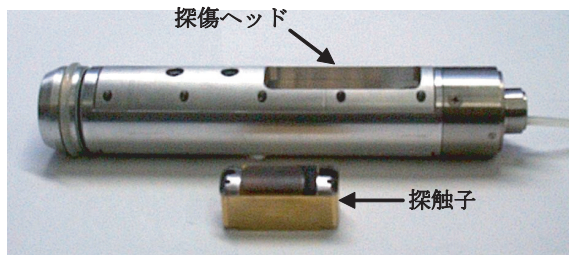


図4 φ40mm中ぐり車軸の自動探傷装置用探傷ヘッド

4. 新幹線車軸軸受の実働荷重推定法の開発

鉄道車両において車軸軸受は重要な部品であり、その設計においては十分な配慮がなされている。しかしながら、設計上の軸受に作用する荷重は過去の経験に基づいて定められた値が使用されており、近年、実際に車軸軸受に作用する荷重を測定した事例はない。そこで、車軸軸受の安全性を評価するために、走行中の車軸軸受に作用する実働荷重を測定する方法を開発し、簡易な実働荷重推定法を検討した。

新幹線車両の軸はり式軸箱支持装置の車軸軸受を対象に、ベンチ試験と走行試験を実施した。

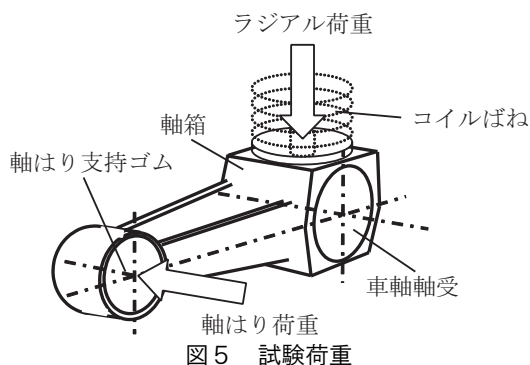


図5 試験荷重

ベンチ試験では、軸重に対応するラジアル荷重と車輪が横圧を受けることを模擬して図5に示す軸はり支持ゴム位置から軸はり荷重を与え、軸受内部に発生する転動体荷重分布（軸受ころに作用する荷重を円周方向のころ位置に対して求めたもの）を測定した。その結果、車軸軸受にはモーメントが作用することが確認できた。測定例を図6に示す。また、軸はり支持ゴムの端面に貼付したひずみゲージ出力により、軸はり荷重の推定が可能であることが分かった。

走行試験では、輪重と横圧の測定と併せて、上述の軸はり荷重の測定と輪重の推定を目的にコイルばねおよび軸ダンパのひずみゲージ出力の測定を1輪軸の左右の軸受で実施した。輪重の測定例を図7に示す。輪重の推定値は、平均的には測定された輪重値とほぼ一致した。一方、軸はり荷重の測定では、左右の軸受での荷重差と横圧差は比較的一致していたが、その精度は十分ではなかった。

今後、輪重と横圧の測定値から車軸軸受に作用する実働荷重を求める方法と上述した方法により輪重、横圧の測定に依らない実働荷重の推定方法を提案したい。さらに、実働荷重に基づく軸受寿命の算定方法についても提案したい。

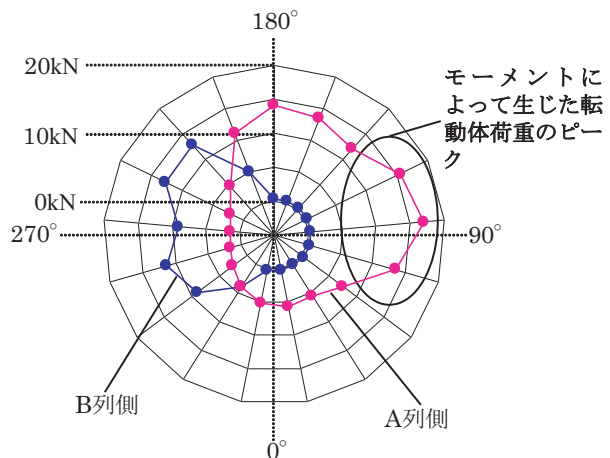


図6 転動体荷重分布

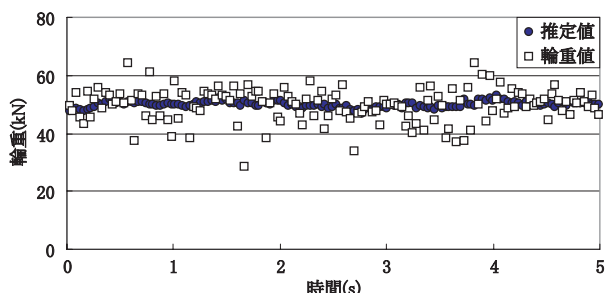


図7 走行試験で測定された輪重とその推定値

5. 車軸軸受監視システムの開発

鉄道車両の車軸軸受に欠陥が発生すると、走行に影響を与える可能性がある。地上に設置した軸受監視システム

特集：車両技術

ムにより車軸軸受の常時監視ができれば、安全性の向上が期待できる。そこで、軌道近傍の地上に設置したパラボラマイクロホンにより、軌道上を走行する車両の軸箱からの音を収録し、軸受外輪に欠陥が発生した場合に発生する欠陥周波数成分の音を検知して軸受の異常を検出する、軸受監視システムのプロトタイプの開発を行った。以下に、定置試験と走行試験の結果を紹介する。

軸受欠陥検出方法として、軸箱に加速度ピックアップを取り付けて振動加速度を測定し、軸受欠陥発生時の衝撃的な加速度の周期（周波数）をエンベロープ解析により求める方法が一般に用いられている。しかし、この方法では測定対象の個々の軸箱に直接加速度ピックアップを取り付けて車上で測定しなければならず、測定に多くの労力が必要である。測定装置を地上側に設置して、非接触で走行する車両の軸受の欠陥を検出する方法として、軸受に欠陥が発生した場合に軸箱体から発生する音の検出の可能性を検討した。軸箱体音を収録する場合、無指向性マイクロホンでは測定対象以外の周囲の音も収録するため、特定の軸箱体の音を収録する方法として指向性の高いパラボラマイクロホンを使用した。ただし、パラボラマイクロホンを軌道に対して直角に配置した場合、軸箱は短時間に測定領域を通過するため、軌道に対して図8に示すように斜めに配置したパラボラマイクロホンと車輪位置検知センサを図9のように軌道近傍に設置して、測定領域を広げる工夫を行った。

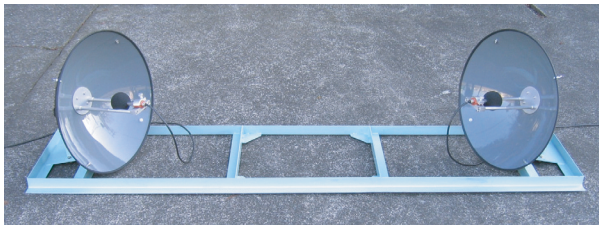


図8 パラボラマイクロホン

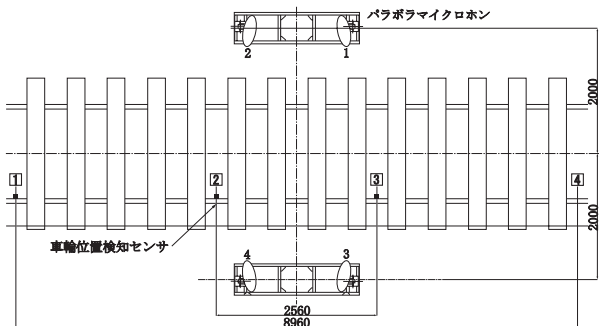


図9 車軸軸受監視システム配置図

軸受の定置回転試験では、軸受外輪欠陥の形状によっては、軸箱体音のエンベロープ解析では軸受外輪欠陥の検出が難しいこと、軸受外輪欠陥の形状が軸対称ではないため回転方向により衝撃音の大きさに差があり、軸受外輪欠陥の検出精度が変わることがわかった。また、軸受外輪欠陥部をころが通過する際に発生する衝撃音は、速度30km/h以下では明確には捉えることができないが、速度50km/h以上であれば捉えることができ、エンベロープ解析よりもケプストラム解析を行うことにより軸受外輪欠陥の周波数（周期）成分を捉えられる可能性があることがわかった。

人工欠陥軸受を組み込んだ車両を使用して、軸受監視システムの構内走行試験を行った。試験では、車輪位置検知センサにより走行している車両の軸箱位置を検出して、特定の軸箱体の音を軌道近傍に設置したパラボラマイクロホンで測定できることがわかった。しかし、走行方向により軸受外輪欠陥部分を軸受ころが通過した場合の音が発生しない、軸受外輪欠陥を検出できると考えられる下限の速度約30km/hで走行を行ったため、軸箱に近接する歯車箱、プロワなどの騒音の影響により軸箱体音がマスクされてしまう、などの影響により、軸箱体音から軸受外輪欠陥の周波数（周期）成分を検出することは難しかった。しかし、速度50km/h～100km/hで走行した場合には軸箱体から発生する音も大きくなるため、地上から軸箱体音を測定する方法でも軸受外輪欠陥を検出できる可能性があり、機会があれば走行試験を実施する考えである。

6. おわりに

残念ながら、最近でも、鉄道車両の損傷に起因する事故、列車の運休・遅延等の輸送障害が皆無となっていない。また、乗客・乗務員が死傷するような大きな事故が発生すると、それが必ずしも車両に起因するものでないにせよ、車両の強度が取りざたされる。鉄道総研の研究開発成果が、事故・損傷の防止、また、万が一発生した場合の被害軽減の一助になることを切に願っている。今後も各位のご支援をお願いする次第である。

文献

- 1) 瀧上唯夫, 富岡隆弘: 最近の軽量車両の固有振動モード特性, 鉄道総研報告, Vol. 16, No. 5, pp.23-28, 2002.
- 2) 富岡隆弘: 鉄道車両の車体曲げ振動の解析と低減技術, 車両技術, 231, pp.96-106, 2006.