

2103 新幹線電車用台車枠の信頼性向上について

Improvement in Reliability of the Truck Frames of Shinkansen Vehicles

○上林賢治郎 (JR東海)

Kenjiro Kanbayashi, Central Japan Railway Company. 1545-33, Ohyama, Komaki, Japan

This paper describes with the improvement in reliability of the truck frame for Shinkansen trains. Vibration characteristic of high order of truck frame is clarified by the vibration modal analysis in order to improve the reliability on the strength of truck frame, and it is necessary to select structure and dimension of the truck frame which does not resonate for main vibration source. And, it is important that it makes of the welded bonding condition by the cutting of the truck frame in order to improve the quality of the welded joint, periodically and confirmation test and constructs the system that feeds back and can improve the result in the manufacturer.

Though "Nozomi" business operation was started from the time schedule revision in March, 1992 by the Series 300 Shinkansen cars, there is no matter either, and the generation of the crack of the truck frame which originates from the design over the intervals about 11 is regarded as acquiring the very high reliability.

Key Words: Truck frame, Weld, High Speed Train

1. はじめに

平成 15 年 10 月のダイヤ改正により、すべての新幹線が新形式車両になり、全線 270km/h 化が達成された。今から遡る事約 10 年、関西新国際空港の開港に伴う航空輸送との競争を念頭におき、東京～新大阪間の速度向上を図るための技術開発を開始した。その結果開発されたのが 300 系新幹線電車で、平成 4 年 3 月 14 日から東京～新大阪間に「のぞみ」として最高速度 270km/h の営業運転を開始し、約 30 分の到達時分の短縮を実現した。当時としては我が国初の高速車両であり、速度向上を達成するため、徹底した軽量化を図り、100 系に対して約 25% の軽量化を達成した。台車については新幹線電車としては初めてのボルスタレス台車を開発したが、開発の最大の課題は高速における走行安定性と台車の強度の確保であった。本稿では、後者の台車の強度特に台車枠の強度を確保するための方策及び台車枠の品質の向上を図るための取組みについて述べる。

2. 開発の経緯

300 系新幹線電車の開発では、車両の高速化に伴う沿線の地盤振動を抑制するため、既存車両に対して従来にない大幅な軽量化（車両の軸重は約 11.3 トン以下）を実現することが設計の大きな柱となった。車体はアルミ軽合金を採用、VVVF 誘導電動機駆動、交流回生システム等を採用すると共に台車についてはボルスタレス台車を採用した。

Fig. 1 は 300 系開発以前の主力であった 100 系台車の質量を各装置別に整理し、全台車質量に占める各装置の質量の割合を示したものである。この中で台車枠は台車の全質量の約 15% を占めており、約 40% を占める輪軸質量と共に台車を軽量化するう

で重要なポイントとなる部品である。しかし、台車枠の過度の

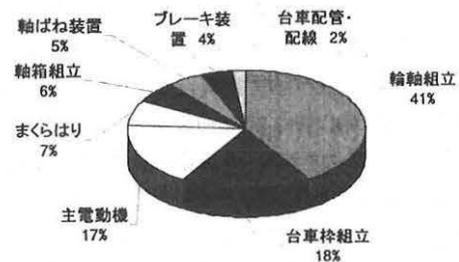


Fig.1 The mass proportion according to the equipment of the bogie (Series 100)

軽量化は安全を損なうことにもなり、絶対避けなければならない。この軽量化と安全性の確保という相反する特質を満足させるためには、実体荷重の正確な把握と、事前の徹底した強度検証と有限要素法等の最新の解析法を駆使した理論解析による正確な強度解析が必要であった。

そこで、300 系を開発する際には、それまでの主力であった 0 系、100 系電車の台車枠の実態を分析することから始めた。その結果、改善すべき項目として 3 点が明らかになった。

①溶接の品質向上: 溶接の表面欠陥、溶け込み不足、溶接ビード部の仕上げ形状の不適切、裏当金形状の不適切、内部補強板の溶接不良等の溶接欠陥を皆無にする。このような製造時の細かな配慮により強度的な信頼性が格段に向上する。そして主要溶接部については溶込み率の明確な指示が必要であり、そのためには溶接施工方法の見直しが必要であるが、最も基本的なこととして、溶接作業の重要性及び溶接作業者の技術力及び技能力の維持に関する製作者側の再認識が必要であった。また、品

有無、溶け込み状態等も同時に検証している。

製作された台車枠については、溶接の品質管理の観点から開先検査、主要溶接部については非破壊検査(磁粉探傷、超音波探傷)を実施し検査結果を記録すると共にガイドラインを満足しない場合は補修を実施し、合わせて検査結果補修履歴等も記録に残すようにしている。また、定期的にできばえ審査を実施することにより品質の維持にも努めている。

3. 高周波振動に対する信頼性

300系電車の先行車の基本性能試験において主電動機のトルク脈動に起因する約120Hzの高周波振動が発生し、台車の各部強度に及ぼす影響が注目された。当時、疲れ限度に及ぼす繰返し速度の影響について文献を調査した結果、約120Hzであれば強度的上ほとんど影響を及ぼさないということであった。このことを検証するため、その後150万km走行した時点で台車枠の経年調査を実施した。製作会社1台車枠について任意に抽出し、各部寸法検査を実施した後、主要溶接部の断面マクロ観察を実施するため切断試験を実施した。その結果、外部及び内部の両面ともにき裂は発見されず、溶接欠陥等もないことが確認された。また、この時の切断片を使用して製作したテストピースと新たに溶接施工条件、溶接条件を同一の手順によって製作した同一箇所の部材を使用して製作したテストピースを使用して、応力レベルが現車と同一になるようにした状態で90～150Hzまでの加振試験を実施した。その結果、試験を実施した変動応力レベルでは、高周波振動の影響がないことを確認した。この時実施したマクロ切断試験結果は、同時に超音波探傷試験の検証試験でもあり探傷精度の向上にも活用された。

台車枠の経年調査については現在でも継続して実施しており、昨年度は360万km走行した台車枠について切断試験を実施し、溶接部について何ら問題のないことを確認している。

4. 700系台車枠の設計

700系の台車枠の設計にあたっては、300系で得られた数々の成果をフィードバックすることにより、溶接の信頼性、強度のさらなる信頼性の向上を図っている。

・各ブラケットの溶接は、従来裏隅肉溶接が不可能であったが700系では各ブラケット構成を全面的に見直すことにより裏隅肉溶接が可能な構造とし、強度上の信頼性を向上している。

・700系では、横ばりの前後間隔を750mmに拡大したため、横ばりに構成するブラケットのレール方向への構成が寸法的に厳しくなっている。特に、主電動機受については上面板の勾配が急になるため、溶接部の応力低減の観点から主電動機上面の取付部の高さを300系より40mm高くし、上面板の勾配を可能な限りなだらかになるようにしている。

・各溶接部の強度評価については、両面溶接の部位は基本的には従来のJIS評価基準「JIS E 4207 鉄道車両用台車枠の設計通則」により行い、片面開先溶接の部位については最近の鉄道総合技術研究所提案の破壊力学の考えに従っている。これは、溶け込み不良の状態により許容応力を定めるもので、応力拡大係数範囲はその下限値を $4.2\text{MPa}\sqrt{m}$ (応力拡大係数幅下限界値、安全率としてほぼ1.25倍を考慮)としている。なお、母材部に

ついては従来のJIS基準を採用している。

・前後の横ばりを連結しているツナギばりは、横ばりとの溶接を容易にするため及び台車枠としての剛性をアップするため、300系で採用していた丸パイプをやめ4面合わせ溶接構造としている。

・この他に、溶接部の仕上げ曲率半径については必要に応じて図面に明記するとともに、上板及び下板等の隅肉溶接の裏側についても丁寧なグラインダ仕上げをするようにしており、これらの処置により飛躍的に信頼性が向上する。

台車枠の強度に対する信頼性を向上させるために、FEMによる応力解析の精度向上、疲労試験及び破壊試験による最弱点部の見極めとその強化策の検討、溶接部の品質向上の観点から溶接の作業性を考慮した台車枠構造の検討と超音波探傷方法の確立及び精度向上を図ってきた。一方、あらゆる加振源に対して台車枠の振動モードが共振しないように設計することは、強度上の信頼性を向上させるだけでなく、固体伝播に伴う車内騒音の低減の観点からも重要である。そのためには、台車枠の高次の振動特性の実態を把握することが重要である。

5. 台車枠の高次の振動特性

台車枠の高周波振動が台車枠の強度や、車体への振動伝達に及ぼす影響を明確にさせるため、10Hz以上300Hzまでの高周波の振動に注目し、台車が実際にどのような動きをしているのか、振動モードを可視化することを検討してきた。そのためには、300系用台車を初めとして意図的に条件を変更した台車も試作し、台車枠各部の構成の違いが台車枠の振動モードにどのように影響するのかを明確にしてきた。

手法としては、台車枠単体のFEM解析を実施した後、モーダル解析を実施し、台車枠FEMモデルと同一条件での加振実験により得られたモーダル解析結果を比較することにより、モデルの修正を行うことにより精度をあげることから始めた。

一方、解析によって得られた高次の振動モードが、台車～車体結合特性試験(試験台試験による負荷回転試験)においてどの程度予測しうるのか、あるいは現車における実際の走行においてどのように再現され、どの振動モードが振動伝達特性の観点から重要なのかを研究してきた。そして、台車枠の強度上に及ぼす影響の大きいモードはどのような振動モードなのかを明確にしたうえで、台車枠の基本構成をまとめあげる必要がある。

各種台車枠に対して実施したFEM解析結果、各種方法により実施したモーダル解析の結果の一部をTable 1に示す。

Table 1 Natural frequency of the truck frame

| | | 700系 | 試作台車 | 300系 |
|-----------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
| FEM解析結果 | | 132.7 | 117.8 | 116.8 |
| モーダル解析結果 単位： Hz | 完成台車加振 (空車荷重負荷) | 135.7 | 約121 | 約112 |
| | 荷重枠搭載状態 での加振 (空車荷重負荷) | 134.8 | — | — |
| | 台車回転状態 (空車荷重負荷) | 135.7 | — | — |

Table 1は、一例として、VVVF制御による主電動機のトルク

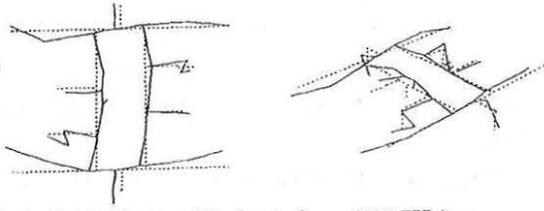


Fig.3 Mode shape of the bogie frame(135.7Hz)

脈動に起因して発生する120Hzに近い成分として25次の振動モードについて比較したものである。また、Fig.3は700系台車枠の完成台車状態において主電動機部を上下加振した場合のモード解析結果である。台車枠には空車荷重を負荷しており、本モードは横ばりと側バリの曲げの連成モードであり、固有値は135.7Hzである。300系台車枠では約112Hzであり、120Hzに近かったため更に高める方策を試作台車で検討した。

700系では台車枠の固有振動数は120Hz成分に対して1割程度離れており、ビートレス制御の改善も合わせて実施している。

一連の試験を通して、モーダル解析を実施する場合は、台車枠単体ではなく台車組立状態の方がよく、無負荷状態では台車内の軸ばねツノ受部のピンが輪軸側に接触する状態となり、実際の走行とは異なった条件となるため、空車相当の荷重を負荷した状態で測定する必要があること等が判明した。また、試験を実施する際、より正確な固有値を算出するためには実際に搭載する空気ばねを使用して荷重を負荷すべきである。

試験的に試験台試験による負荷回転試験を実施し、台車枠応力と台車枠の固有振動数の相関についても調査したが、台上試験での試験手法上の制約から再現できないモードもあるため、注意を要することも判明した。しかし、台車枠の固有振動数を概略把握するのであれば、台車組立単体で空車荷重を負荷させた状態でモーダル解析を実施すればほぼ予測できる見通しを得た。

モーダル解析やFEM解析により台車枠の高次の振動モードを明らかにすることにより、特に横ばりに構成する各種ブラケット類の設計方法が明確になる。例えば、台車枠に取り付ける部品の中で質量の大きなものとして増圧シリンダーがあるが、台車枠構成が端バリのないH型構造となっているため横ばりに取り付ける場合は前後の横ばりが逆相で振動するモードがあり強度設計上配慮する必要がある。そのため、700系では増圧シリンダー等は横ばり同士を前後で結んでいるツナギバリ上で構成し、横ばりの振動モードの影響を受け難い構成とした。また、台車配管・配線を固定する管受類の溶接は横ばりに集中するため、主電動機、キャリア受等の溶接ビードと干渉しないような構成にすると共にブラケットの上板であっても高応力部での溶接は避けること、冬季のパラストの飛散を前提として損傷し難い構成とするよう配慮している。

6. まとめ及び今後の課題

台車枠の強度に関する信頼性を向上させる方法を要約すると以下の通りとなる。

1). 静荷重試験、疲労試験だけではなく、最大荷重負荷試験、破壊試験を必要により実施し、最弱点部の見極めを行う。

2). 溶接の品質向上の観点から溶接の作業性を考慮した台車枠構造の検討と超音波探傷の確立及び精度向上が必要。

3). 静荷重試験では台車枠が高次に振れるモードにより発生する応力については再現されない。台車枠の高次の振動特性(300Hzまで)を把握すると共に主な加振源に対して共振しないような枠構造、諸元の選定を行う。

4). FEMによる応力解析の精度を向上させるため、絶えず計算、検証の過程を繰り返し実施する。

5). 溶接部の品質向上は、溶接作業者の技術力及び技能によるところが大きい。溶接作業者の育成、超音波探傷結果の作業者へのフィードバック体制、技術力維持のための絶えざる努力が必要である。

6). 主要溶接部については溶け込み率の明確な指示が必要であり、また、隅肉溶接については明確な形状の指示が必要である。

7). 台車枠溶接部の品質を維持するため、台車枠の経年調査特に溶接部の切断試験を定期的に行い、その結果を製造者側にフィードバックする体制を構築する必要がある。

8). JIS E 4207に示された応力限界図は、表側の溶接部の強度を保証し、裏側のルート部等については評価していない。700系以降の台車枠では裏側も含めた台車枠の強度を保証する観点から、すべてのブラケット類について裏隅肉を実施しているが、溶接の作業スペースを確保するためのブラケット構成が必要となり、溶接線の増加と共に台車枠の質量増につながっている。今後、信頼性を落とすことなく軽量化を達成するための方策について検討していく必要がある。

9). 応力集中のある溶接止端部付近を切削仕上げした溶接部の許容応力は仕上げ無しの場合よりかなり大きく設定されているが、単純に応力限界図に収まれば良いとの発想で採用すべきではない。溶接部近傍の平滑な母材部の応力(公称応力)を用いて、同様の溶接継手において寿命評価を行う方式を適宜取り入れるべきであり、そのためのデータを蓄積していく必要がある。

10). ボルスタレス台車以降で採用されることが多くなっている栓溶接については、ルート部の状態により強度が左右されるが、構造上応力の測定が困難な部位でもあり、その強度評価の検証のために継続的な溶接部の状態調査が必要である。

7. おわりに

平成4年3月のダイヤ改正から300系車両により「のぞみ」営業運転を開始した。台車枠についてはその間約11年にわたりき裂の発生はなく何ら問題もなく推移しており、非常に高い信頼性を獲得したものと考えている。今後も更なる品質向上を目指した研究を継続し新幹線電車の安全安定輸送の確保に取り組んでいく。

最後に開発を進めるにあたって長年にわたり多大なるご支援をいただいた鉄道総合技術研究所、車両メーカーの関係各位の皆様に、あらためて深く感謝致します。

【参考文献】

- (1) 上林:「700系新幹線電車(量産先行車)の概要(10)、(11)」、『鉄道車両と技術』、1998-11、1999-1
- (2) 長瀬:「溶接台車枠の強度と保守」、研友社、1999。