

車両関係の最近の研究開発

車両構造技術研究部

部長 石塚弘道

1. はじめに

(財) 鉄道総合技術研究所 (以下、鉄道総研) の車両関係の研究開発においては、JR 各社の営業車両あるいは試験車両を使用した各種の試験を実施し、必要とするデータを取得することも多い。一方、このような現車走行試験の前段階として、あるいは現車走行試験が種々の制約から実施できない場合は、鉄道総研が所有する、実機による試験が可能な大型試験装置を利用した各種試験が行われる。

本講演では、大型試験装置を利用した最近の研究開発事例の中から、「横風を受けた車両の動的挙動に関する基礎的研究」、「地震時走行安定性」および「在来線車両用車軸のき裂進展性評価」について概要を紹介する。

2. 横風を受けた車両の動的挙動に関する基礎的研究¹⁾

近年、車両の転覆限界風速を精度良く求めることが重要となってきた。横風による鉄道車両の転覆に関する解析手法は、「静的解析」と「動的解析」とに大きく分類される。静的解析とは、車両に働く外力が一定である (時間と共に変動しない) と仮定して、外力によるモーメントのつり合いを解析的に解くものであり、1972年に提案された「国枝式」²⁾ がその代表的な例である。一方、動的解析とは、時間と共に変動する外力を考慮し、運動方程式を数値的に解くことにより、車両の挙動を時系列的に解析するものである。国枝式は現在でも車両や軌道などの設計時に用いられることが多いが、国枝式をベースに、空気力や車両のばね系の影響などをより詳細に考慮した「詳細計算式」³⁾ が提案され、横風に対する車両の安全性を評価する場合には、主としてこの詳細計算式を用いることが多い。そこで、車両の動的挙動を考慮した場合の転覆限界風速の評価、すなわち静的解析と動的解析との差の定量評価が求められている。以上を背景として、現在用いられている詳細計算式をベースとした動的解析モデルを構築し、横風の変動周波数が車両の動的挙動に及ぼす影響を詳細に調べると共に、実車を用いた検証試験を行った。

実車による検証試験は、鉄道総研の新車両試験台にて横風による空気力に相当する横方向の力 (以下、横力) を鉄道総研が所有する試作車両に動的に負荷し、車両の挙動等を測定することにより行った (以下、動的横力負荷試験)。新車両試験台建屋の外に横力負荷用の柱を建て、柱に取り付けた電動アクチュエータと車体とをワイヤーロープでつなぎ、車体の前後2カ所を横方向に牽引した。負荷した横力の変動パターンは、①定常成分 7.5kN

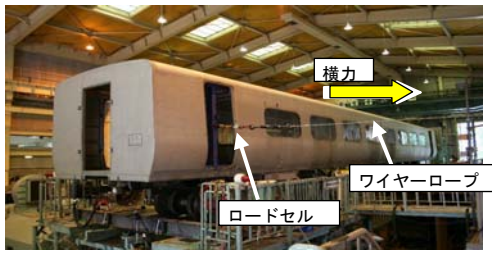


図1 動的横力負荷試験の様子

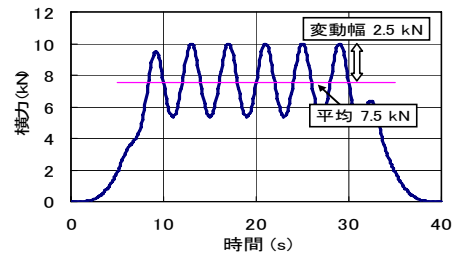


図2 横力の波形例

に変動成分 2.5kN を重畳させたパターンと、②定常成分 5.0kN に変動成分 5.0kN を重畳させたパターンの 2 種類とし、それぞれの変動周波数を 0.05Hz から 2.5Hz まで変化させて試験を行い、これらが車両の挙動に及ぼす影響を調べた。動的横力負荷試験の様子を図 1 に、横力の波形例を図 2 にそれぞれ示す。横力は、負荷高さをレールレベルから 2230mm とし、ワイヤーロープと車体との間に直列につながれたロードセルで測定した。輪重は、第 1 台車第 1 軸に装着された輪重・横圧測定軸により測定した。車体変位については、ポテンシオメータ式変位計で左右・上下変位を測定し、これらの測定結果から計算により車体傾斜角を算出した。動的横力負荷試験の結果の例を、シミュレーションによる計算結果と併せて図 3 に示す。同図は輪重減少率の時系列データである。定常成分 7.5kN に変動成分 2.5kN を重畳させた横力を負荷した試験の結果であり、図において(a)から(c)の順に、横力の変動周波数が 0.5Hz, 1.0Hz, 2.0Hz の例を示す。これらの図から、輪重減少率について、実測値と計算値は概ね一致していることがわかる。従って、本解析モデルおよびシミュレーションプログラムは、横力を受けた車両の輪重変動を推定する手法として概ね妥当であることが確認された。

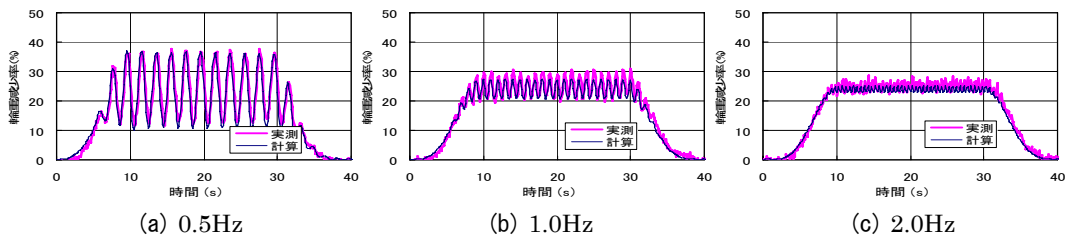


図3 実測値と計算値との比較 (輪重減少率)

3. 地震時走行安全性⁴⁾

兵庫県南部地震後、構造物の耐震補強が進められたが、2004 年 10 月の新潟県中越地震での新幹線電車の脱線を受け、地震時の脱線防止策と大規模地震により万が一脱線した場合の列車逸脱防止策が検討された。国土交通省の新幹線脱線対策協議会はその中間とりまとめで、構造物耐震対策、脱線防止策（地震検知・警報装置の増設および更新）、逸脱防止策を提言し、具体策としてさらに脱線防止ガード、逸脱防止地上ガードおよび車両ガード、レール締結装置等の損傷防止策、ブレーキ停止距離の短縮、早期地震検知装置システムの充実が検討されるとともに、一部はすでに施工が進められている。

鉄道総研では、車両運動シミュレータ VDS(Vehicle Dynamics Simulator) や車両と構造

物の動的相互作用シミュレータ **DIASTARS II** を用いて、これらの脱線および逸脱防止策の評価を行う一方、車両の高性能化や構造物・軌道の改良による走行安全性向上策の研究開発も行っている。

VDS での解析結果によれば、地震時に脱線しにくい車両とするには、車体の低重心化、まくらばねや左右動ダンパの高減衰化、ストップ遊間の拡大等が地震時走行安全性向上に有効である。ただし、これらの手法を実際に適用するには、通常走行時の車両性能との両立を考慮しなければならない。そこで、その解決策として鉄道総研では、地震時に車体・台車間が大きく変位してピストン速度が通常使用範囲を超えた場合に減衰力が増加する地震時脱線防止対策用左右動ダンパを提案し、**JR 東日本**と共同で研究開発を進めている。

図 4 に示すとおり、この左右動ダンパを用いると 0.6~3.0Hz の広い加振周波数範囲において地震時の走行安全限界振幅が向上すると期待される。

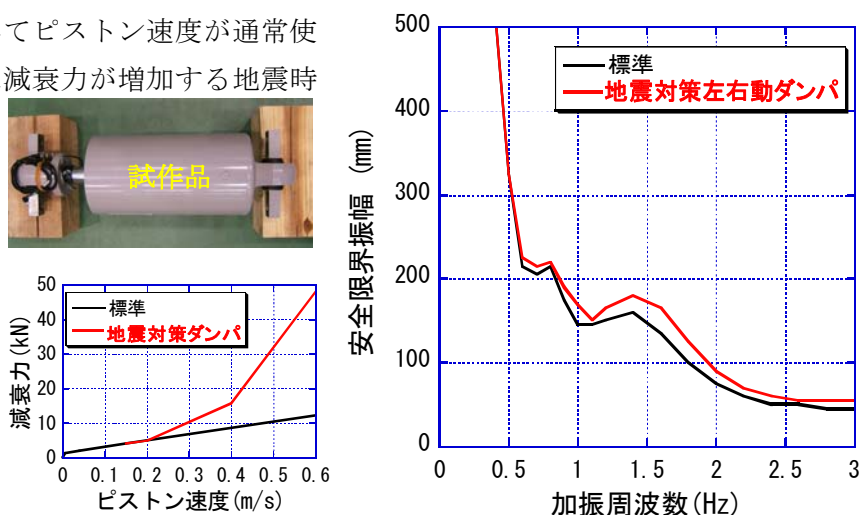


図 4 地震時脱線防止対策用左右動ダンパとその効果（解析結果）

このダンパについては、現状使用されている左右動ダンパに替えて取り付けられるものを 2008 年度に試作し、実台車に装架して通常走行時の性能に問題がないことを現車走行試験で確認した。今年度は、試作ダンパの回路変更（バイフロー化）によりさらに特性を改良し、大型振動試験装置で実台車の加振試験を行って、地震時走行安全性向上効果を確認した。

4. 在来線車両用車軸のき裂進展性評価⁵⁾

在来線車両の多くには、表面に特別な熱処理が行われていない非高周波焼入車軸が使用されている。車輪座内ボス端部に発生することのあるフレット疲労き裂の挙動を評価するために、当該部に加工した種々の深さの放電加工による人工きずからのき裂進展性について、実物大車軸による疲労試験を実施した。

疲労試験に供した車軸の素材は JIS E4502-1 の SFA60A とし、熱処理は焼ならし・焼戻しとした。形状は、輪軸疲労試験装置の制約から、図 5 に示す 0 系新幹線電車車軸と同等とした。このような車軸を 4 本（以下、No.1~No.4 試験軸）製作し、輪軸疲労試験装置により疲労試験を行った。

No.1 試験軸（車輪座における公称曲げ応力=60MPa）は繰返し数 $N=4.00 \times 10^7$ 回、No.2

試験軸(同 60MPa)は $N=5.40 \times 10^7$ 回、また、No.3 試験軸(同 80MPa)は $N=1.63 \times 10^7$ 回にて破断することなく疲労試験を終了した。一方、No.4 試験軸(同 80MPa)は、 $N=1.99 \times 10^7$ 回にて、歯車側車輪座の内ボス端部において破断した。破断面の様式図を図 6 に示す。同図に示すように、強制開口部(輪軸疲労試験装置のリミットスイッチが動作した時点で、未だき裂が到達していなかった領域)が最大深さを持つ人工きず A に近接していることから、当該車輪座に加工した人工きずを起点としたき裂よりも、むしろ、矢印付近で発生したフレット疲労き裂が主き裂となって破断したと考えられる。

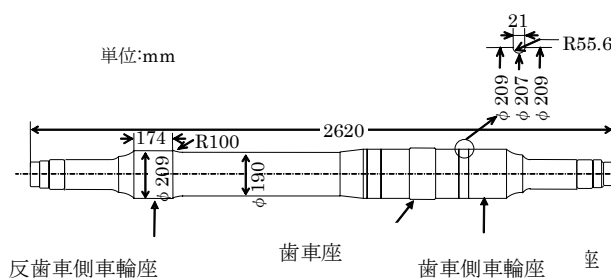


図 5 試験車軸の形状

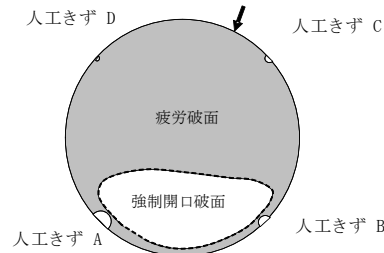


図 6 No.4 試験軸の破断面

疲労試験後の、各試験軸におけるき裂進展量の調査結果および破壊力学の手法を用いたき裂進展解析結果より、車輪座における公称曲げ応力が 80MPa の場合、歯車側車輪座内ボス端部で折損する可能性が高く、反歯車側車輪座内ボス端部では折損する可能性の低いことが明らかとなった。両車輪座におけるこの差違は、図 7 に示すような内ボス端部の形状に起因している。今後、車輪座内ボス端形状の最適化を図るため、実物大車軸による疲労試験を継続して実施する予定である。

5. おわりに

研究開発を進めるに当たって、適切に企画・設定された試験によるデータ取得・確認は欠かせない。今後も、各位のご指導ご鞭撻をお願いする次第である。

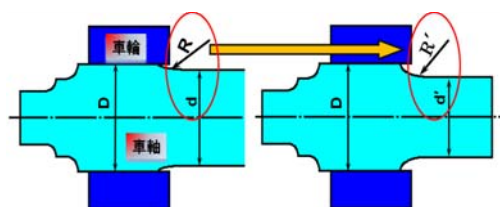


図 7 車輪座内ボス端形状の最適化

参考文献

- 1) 日比野有, 金元啓幸, 下村隆行: 横風の変動周波数が車両の動的挙動に及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.23, No.11, pp.7-12, 2009
- 2) 国枝正春: 鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論解析, 鉄道技術研究報告, No.793, 1972.2
- 3) 日比野有, 石田弘明: 車両の転覆限界風速に関する静的解析法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.4, pp.39-44, 2003
- 4) 宮本岳史, 石田弘明: 台車改良による地震時走行安全性の向上に関する解析, 鉄道総研報告, Vol.21, No.12, pp.35-40, 2007
- 5) 石塚弘道, 久保田祐信, 栄中, 近藤良之, 佐藤康夫, 牧野一成: 在来線車両用焼ならし車軸の車輪座における疲労き裂進展性評価, 材料, Vol.55, No.6, pp.550-557, 2006