

列車衝突時の安全性確保に向けた取り組み

早勢 剛* 沖野 友洋**

Research for Ensuring Safety in the Event of Train Collision

Takeshi HAYASE Tomohiro OKINO

Railway Technical Research Institute has conducted a variety of research and development for ensuring safety in the event of train collision. There are two types of collision (primary collision and secondary collision) in these studies. The primary collision is between an obstacle and a carbody. The secondary collision is between interior facilities and passengers (and drivers). About the primary collision, we have developed an analytical method for the evaluation of the deformation behavior and the energy absorption amount of the carbody, following several fatal accidents. About the secondary collision, we evaluated the driver's injury quantitatively and proposed the desirable principles of the carbody-structure design for improving crashworthiness. Furthermore, we have developed a method of evaluating passenger's injury accurately using a FE model. This paper introduces these topics briefly.

キーワード：列車衝突，車体強度，人間工学，数値解析，衝突安全性

1. はじめに

平成27年度、鉄道総研が実施する300件余りの研究開発テーマでは「安全性の向上」に係るものが最も多い。車両分野においても、走行安全性向上、強風対策、強度部材の信頼性評価などに取り組んでいる。これらに加え、衝突に対する安全性向上も鉄道の重要な課題である。

鉄道総研では、二つの衝突に分けて、乗客と乗務員の安全確保に取り組んでいる。その一つは他の列車や車両あるいは障害物と車体との間で生じる「1次衝突」で、著大な衝撃加速度や車体の損傷に伴う生存空間減少量の把握が主要な課題となる。また、膨大な衝突エネルギーを吸収する上では各部の変形が重要な役割を果たすことから、車体変形挙動の解明も重要である。いま一つは、「1次衝突」後に生じる乗客や乗務員の「2次衝突」で、対車内設備あるいは乗客相互の衝突による被害度の定量評価や軽減が主な課題である。

車両分野では、過去20年間に亘り主に「1次衝突」の現象解明や被害軽減に取り組んできた。また最近では、「2次衝突」による乗客、乗務員被害度の定量評価や低減策の提案に取り組んでいる。以下では、これらの内容を紹介する。

2. 「1次衝突」に対する取り組みと成果

他の列車や車両あるいは軌道内に侵入した障害物と車体との間で最初に生じる1次衝突については、その形態毎に車体損傷特性の解明や被害軽減策の検討に係る課題に取り組んできた。

* 車両構造技術研究部 部長

** 車両構造技術研究部 車両強度研究室

2.1 上下・左右オフセット衝突の被害軽減¹⁾

図1に示すように、脱線して軌道から逸脱した車両がすれ違い時に対向列車と衝突する際に、双方の車体角部分に衝撃が集中する場合がある（極端な左右オフセット衝突）。さらに、脱線側の車体が沈んで比較的強度の高い双方の台枠部分が食い違ると、一方が他方に乗り上がる（上下オフセット衝突）。日比谷線列車脱線事故（2000年）を契機として、こうした上下・左右オフセットが衝突時の車体損傷拡大に繋がることが指摘され、被害軽減に取り組んだ。

上下・左右オフセットが車体損傷に及ぼす影響を検証するため、車端隅部の部分構体について剛体ブロックによる衝撃試験を行った。上下オフセットの有・無による供試体損傷状況の比較を図2に示す。左右オフセットのみでは外板や隅柱に大きな変形がなく、構体内側で台枠上辺が変形する程度である。これに対し、上下・左右にオフセットがある場合は妻外板と隅柱がせん断破断すると共に側外板が変形したが、台枠は殆ど変形しなかった。また、衝撃時の最大荷重は左右オフセットのみが

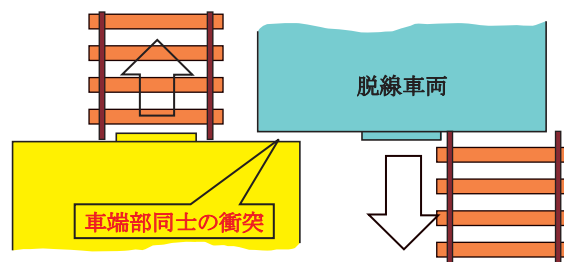
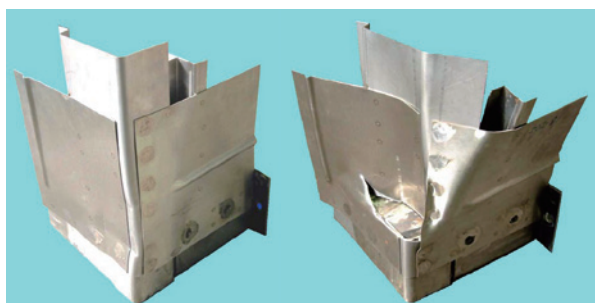


図1 中間車車端部同士の衝突



左右オフセットのみ 上下・左右オフセットあり
図2 衝撃試験による部分構体損傷状況

280kN、上下・左右オフセットが120kNで、台枠が食い違うことによる変形抵抗力の低下が明らかとなった。

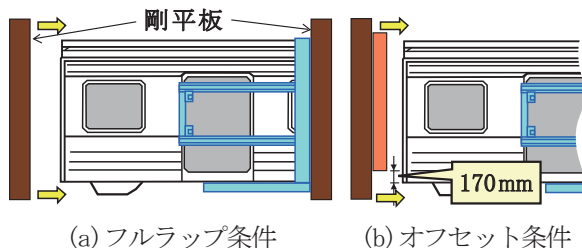
さらに、衝撃試験における供試体の変形挙動を精度良く再現可能な有限要素モデルを構築し、これを実車相当に拡張して応答解析による被害軽減策の検討を行った。その結果、車体隅部の変形のみで衝撃エネルギーを吸収することは難しいことが判明し、上下・左右オフセット衝突に対しては、車体相互の食い込みを防ぐ回避構造の導入が有効であることを提案した。

2.2 妻面衝突に対する車体損傷特性の解明

列車の前頭部の1次衝突に伴い、編成内でも隣接車両同士が衝突する場合がある。この時、当該衝突部に垂直座屈による上下オフセットが生じるか否かで、車体損傷特性や衝撃エネルギーの吸収量が大きく異なる。編成内でこのようなオフセット衝突が発生した鹿児島線列車追突事故（2002年）を契機として、編成内で生じる妻面の衝突に対する車端部の損傷特性を把握すると共に、衝撃エネルギー吸収量を精度良く推定する手法を開発した。

まず、実車体から切り出した供試体（約4m）の準静的圧縮試験を行った。図3（a）のフルラップ条件では、台枠の端ばりや中ばりに大きな変形が生じた。これに対して、妻側の剛平板にブロックを取り付けた同図（b）のオフセット条件では、台枠に損傷が生じない代わりに妻構体が大きく変形し、端ばりとの接合部が破断した。

次に、車体の有限要素モデルを構築し、静的圧縮試験相当の塑性変形解析で同様の変形挙動を再現した。試験と解析で得られた変形量-静圧縮荷重応答履歴の比較を図4に示す。変形進捗過程で生じる静圧縮荷重の最大値



(a) フルラップ条件 (b) オフセット条件
図3 実物試験体の準静的圧縮試験

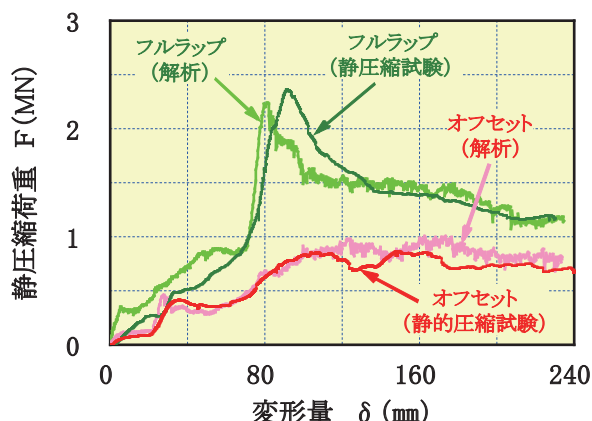


図4 荷重-変形量特性

はフルラップ2.4MN、オフセット0.9MNで、後者のエネルギー吸収量($\delta \leq 230$ mm)は前者の4割程度に止まる。

2.3 側面衝突に対する車体損傷特性の解明²⁾

軌道から逸脱した車両側面が沿線の建築物に衝突する場合や、落石、自動車などが車両側方から衝突してくる場合の被害軽減では、車内の生存空間確保が重要になる。福知山線列車脱線事故（2005年）を契機とするこうした指摘に対応して、側面衝突に対する車体損傷解析手法を構築し、生存空間減少量を指標とする被害状況の推定を可能にした。

まず、車体の側面強度を評価するため、実物大の試験構体による準静的圧縮試験ならびに落錘試験を実施した。横向きに設置した供試体に向けて4.8tの載荷板を落下、衝突（約10m/s）させた落錘試験の状況を図5に示す。同図左側の台枠周りでは横ばり端部の座屈や、側ばりと横ばりあるいは横ばりと床板のスポット溶接破断、同図右側の天井周りでは屋根構体の膨らみ、タルキと長桁のスポット溶接破断がそれぞれ確認された。

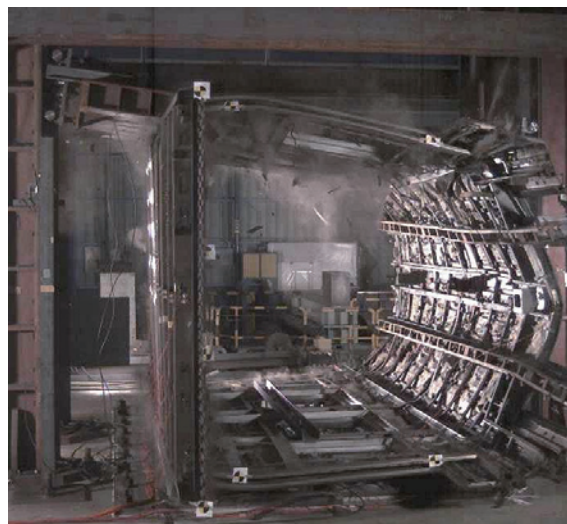


図5 落錘試験の状況（衝撃後80ms時の変形状況）

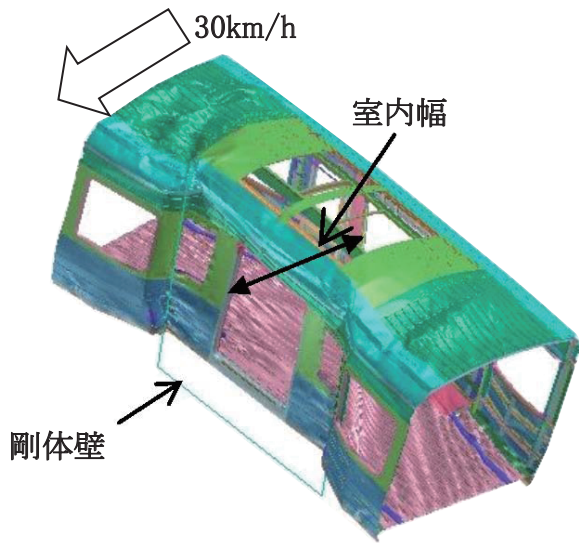


図6 側面衝突解析例

次に、準静的圧縮試験と落錘試験における構体の変形挙動をいずれも精度良く再現可能な有限要素解析手法を構築し、側面衝突時の生存空間減少量を指標とする被害状況の推定を行った。幅3mの剛体壁に車体が30km/hで側面衝突する場合（図5の落錘試験条件と概ね符合）の解析例を図6に示す。同図に「室内幅」と示した戸袋内柱間距離の変化を指標とすると、この条件では生存空間の減少が10%程度に止まり、2次衝突被害がより深刻と判断される。

3. 「2次衝突」に対する取り組みと成果

3.1 踏切事故の応答解析と乗務員の被害軽減³⁾

踏切事故については、これまで1次衝突による車体の損傷解析手法構築と、その精度向上に取り組んできた。さらに最近では、乗務員室の運転台や内部の骨組を再現した先頭車の有限要素詳細モデルに、乗務員を模擬した人体の剛体ダミーモデルを搭載し、車体の損傷と同時に乗務員の傷害度を合わせて解析、評価する手法の構築を進めている。これにより、1、2次衝突を合わせた取り扱いが可能になる。

過去に発生した踏切重大事故をこの手法で解析した所、妻構体の変形量、ホロ柱や隅柱の転倒状況が実態とほぼ一致した。また、人体モデルの頭部、胸部、大腿部それぞれの傷害値解析結果は、当該事故で重傷を負われた乗務員の方の傷害状況と概ね符合した。

さらに、過去の重大踏切事故に関する事例分析結果に基づいて設定した典型的な踏切事故条件について、上記手法による解析を行い（図7）、乗務員の2次衝突被害軽減に向けて以下の検討項目を抽出すると共に、各々について車両の構造設計に対する効果的な指針を提案した。

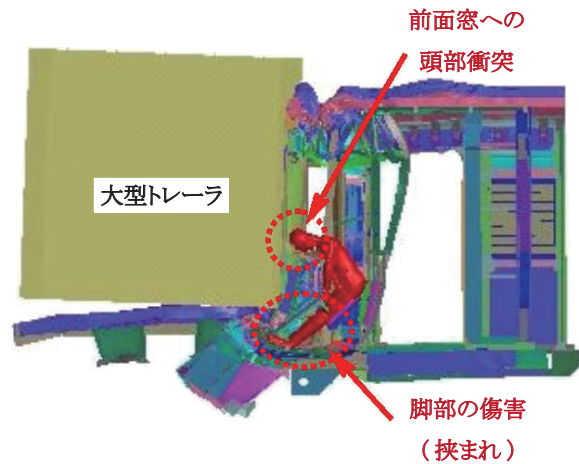


図7 典型的な踏切事故条件の応答解析例
(大型貨物自動車に54 km/hで衝突)

- ・頭部、胸部、膝の衝撃軽減
指針：車内設備の衝突予測位置へ緩衝部材を導入
- ・脚部の傷害防止
指針：運転台の倒れ込み抑止
- ・頭部の前面窓への衝突防止
指針：運転台と前面窓の離隔確保

3.2 人体ならびに車内設備モデルの深度化

今後、2次衝突については、車体衝撃加速度や生存空間減少量を指標とした乗客被害の軽減目標を提案していきたいと考えている。そのためには、様々な衝突状況に対する被害度推定精度を向上した上で、上記指標と被害度の相関を精査する必要がある。

2次衝突被害度の解析精度を向上するため、これまで剛体要素を組み合わせて模擬してきた人体や車内設備について、有限要素解析モデルの導入を進めている。図8は、着座乗客が前列のクロスシート背面に衝突する場合の検証例である。人体や座席に有限要素モデルを導入することにより、衝突試験で得られたダミー人形の挙動や傷害度データを精度良く再現できることを確認した。



ダミー人形による衝撃試験 有限要素解析モデル

図8 クロスシートに対する2次衝突被害度検証例

特集：車両技術

4. 今後の取り組み

衝突問題に関する新たな取り組みとして、編成単位の挙動解明について述べる。長大編成の1次衝突において、先頭車のみによる衝撃エネルギーの吸収は困難である。また、我が国で主流の動力分散方式では、編成中各車に客室があり、機器が分散配置されていて各々の諸元には大差が無い。従って、1次衝突被害の低減を目的とした先頭車の大幅な車体強度向上や、衝撃吸収性能の付加は難しい。こうした状況における車体構造設計指針などの合理的検討に資するため、編成前頭の1次衝突部に加え編成中の車体変形や連結部の緩衝器作用などを合わせた、エネルギーの吸収、消散過程を解析、評価可能な手法の構築を進めている。ここでは、その試算例を紹介する。

ボギー車モデルを連結した多自由度系の時系列応答を解析する上記の手法では、車体の衝突を想定する部位にその損傷特性を、それら以外の各車体間には連結装置の緩衝器特性をそれぞれ適用する。剛体壁へ静的に押し付ける場合の有限要素解析で求めたステンレス車体端部の変形-荷重特性およびエネルギー吸収特性を図9に示す。車端部が約280mm変形する間の最大荷重は1.8MN、エネルギー吸収量は400kJで、合わせて示したゴム緩衝器の40倍を超える。

図10は、停止した近郊電車10両編成に同じ10両編成が20km/hで追突するケースの解析例である。衝突の瞬

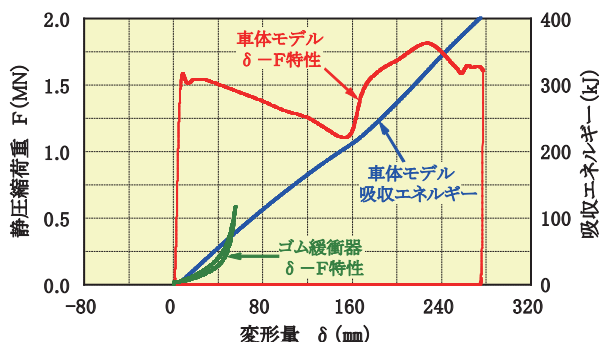


図9 衝突箇所に適用する車体端部の変形特性

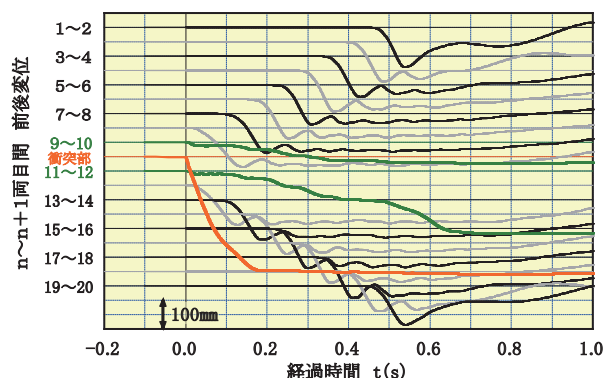


図10 車体間前後変位の応答波形例 (近郊電車10両編成に、同一の編成が20km/hで衝突)

間を $t=0$ とし、被衝突側(1~10両目間)、衝突側(11~20両目間)編成中の各連結部と、衝突部(10~11両目間)の車体間相対前後変位の時系列波形を並べて示した。衝突部(オレンジ)とその前後1箇所(緑)では車体の変形すると仮定し、図9の車体モデル特性を適用した。まず、車体損傷に伴い衝突部が400mm接近するのにつき、その前後がそれぞれ70mmと220mm近づく。その過程では、編成両端に向かい各連結部のゴム緩衝器が順に圧縮され、衝突から1秒足らずで編成全体に衝撃の影響が伝播する。

今後、こうした解析の深度化を図り、垂直座屈や上下オフセットを同時に扱える手法の構築を目指している。

5. 衝突安全性確保に向けた鉄道総研の研究開発

列車衝突時の安全性確保に向けた研究開発のイメージを図11に示す。まず、様々な衝突形態に応じてこれまで培ってきた手法を深度化し、1次衝突による車体の衝撃加速度や生存空間減少量ならびに、乗客や乗務員の2次衝突被害度を推定する。そして、両者の関係を精査し、衝撃加速度や生存空間減少量を指標とする2次衝突被害度の低減目標を提案していく。

この成果は、車体や車内設備に関する衝突安全構造、仕様の検討の場に提供される。また、そこで新たに提案される構造、仕様の安全性評価にも上記手法が活用可能である。こうした取り組みを通じ、今後とも列車衝突時の安全性確保に貢献していきたいと考えている。

ここで紹介した内容の一部は、国土交通省の補助金を受けて実施した研究開発の成果である。

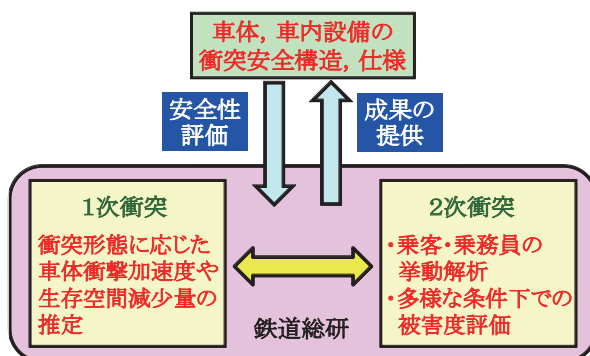


図11 衝突安全性確保に向けた研究開発のイメージ

参考文献

- 1) 舟津浩二・宇治田寧・沖野友洋：側面衝突時における車体変形評価，鉄道総研報告，Vol.19,No.4，2005
- 2) 沖野友洋・宇治田寧：側面からの荷重に対する車体強度特性評価，鉄道総研報告，Vol.25,No.8，2011
- 3) 沖野友洋：踏切事故に対する車両の安全性を評価する，RRR，Vol.70,No.4，2013