

鉄道一般
車 両
施 設
電 気
運 転・輸 送
防 災
環 境
人 間 科 学
浮上式鉄道

列車衝突時の 安全性を確保する

列車衝突時の被害を最小化させるためにさまざまな研究開発を進めてきました。列車と障害物などの中で起こる衝突では、まず、車体の変形挙動の把握が必要です。このため、実物大試験や解析などに取り組んできました。その結果、車体の変形挙動や衝撃エネルギー吸収量を精度良く推定する解析手法を開発してきました。ここでは、列車衝突時の安全性を確保することをめざして取り組んできた研究について、紹介します。



八木 毅
Tsuyoshi Yagi
車両構造技術研究部
車両強度研究室
室長
【専門分野】材料強度物
性



沖野 友洋
Tomohiro Okino
前 車両構造技術研究部
車両強度研究室
主任研究員
【専門分野】車体強度、
衝突安全

はじめに

鉄道では車両、信号、軌道などのシステムが組み合わさって、脱線事故、衝突事故、踏切事故などが起きないように、いろいろな技術開発がなされてきました。しかしながら、さらに安全な鉄道をめざす場合、万が一の事故が起こってしまっても被害が少なくなるように、その対策を考慮しておく必要があります。

著者らは、車両の衝突に対する安全性向上を重要な課題の一つと考えるようになりました。列車衝突時の安全性を確保するための主な研究としては、上下・左右オフセット衝突(☞参照)、側面衝突、踏切事故、列車の編成の挙動などを想定した評価があります。

衝突事故の対策を検討する上で、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ます。その一つは、「1次衝突」の現象解明や被害軽減の取り組みです。「1次衝突」とは、他

の列車や車両または障害物と車体との間で生じる衝突です。大きな衝撃加速度や車体がつぶれたときの生存空間減少量の把握が主要な課題となります。また、膨大な衝撃エネルギーを吸収するために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す。もう一つは、「2次衝突」による乗客と乗務員被害度の定量評価や低減策の提案の取り組みです。「2次衝突」とは、「1次衝突」後に生じる乗客や乗務員の衝突で、対車内設備また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となります。ここでは、「1次衝突」に関するこれまでの研究を紹介し、今後の展望を述べます¹⁾。

車体の構造に求められること

日本では「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」により、鉄道事業者がそれぞれの条件を基に技術的判断をしています。車体の構造については、同第70条に「車両の車体は堅ろうで十分な強度を有し、運転に耐えるものでなければならない。」とあります。車体に求められている強度は、通常の運

☞ オフセット衝突

衝突面の全面が衝突するのではなく、衝突面がずれて一部分だけが衝突する状態。

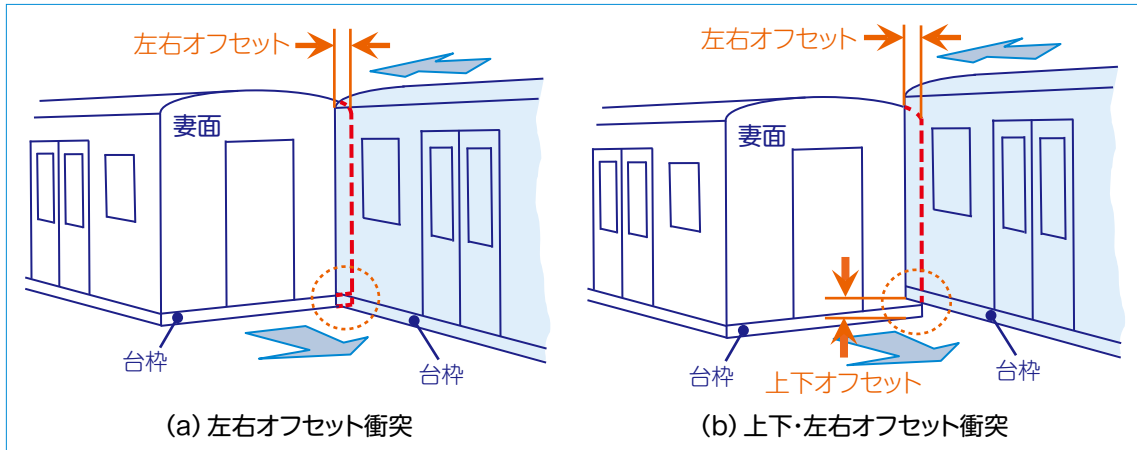


図1 車体車端部同士の衝突

転を想定したものであり、衝突事故や災害のような特殊な状況下での負荷に耐えられることまでは求められていません。車体強度設計時に最初に検討されるのは、運転時などの荷重条件、荷重の大きさなどを想定したJIS E 7106に規定されるような各種静荷重試験において、負荷による永久変形がないようにするという事です。しかしながら、省令の解釈基準の解説に書かれているように、実際の設計では、各鉄道事業者が踏切事故などを考慮した設計条件を定めることが必要となります。

一方、欧州や米国では、車体強度を設計するうえでの荷重条件、荷重の大きさなどは日本と異なっています。さらに、想定する列車速度や衝突対象物などの衝突条件も検討されており、衝突シナリオ、エネルギー吸収、減速度などを考慮した衝突安全性が規定されています。

鉄道システムとして事故が起きないようにしてきた日本の考え方は否定されるものではなく、すべてを欧州や米国に合わせなくてもよいと考えますが、万が一のため、列車衝突時の安全性を確保するための検討が求められてきています。

「1次衝突」

衝突事故を検討する上で、もっともわかりやすい方法は、実物の車両を使って、いろいろな条件で衝突させ、その試験結果を観察し、考察することです。しかしながら、実物の車両となると、非常に大規模な試験となり、安全や経費の面から、多くの試験を行うことは現実的ではありません。そこで、部分的な試験体での実験や有限要素モデル(※参照)を使った解析などで検討を進めています。解析手法が妥当であることを確認すれば、いろいろな条件での衝突を解析で検討していくことができます。

上下・左右オフセット衝突²⁾

図1に示すように、脱線して軌道から車両がずれた場合、その方向によってはすれ違いの対向列車と衝突する可能性が考えられます。対向列車と衝突する際に、主に車体角部分だけが衝突する場合があります(左右オフセット衝突)。さらに、脱線した車体が沈ん

でしまい、比較的強度が高いとされる相互の台枠(※参照)部分がずれると、一方が他方に乗り上がります(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を大きくすることが指摘され、その後、被害軽減に取り組んできました。

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非常に硬いブロックをぶつける衝撃試験を行いました。その結果、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した。これに対し、上下・左右の両方にオフセットがある場合は妻面(※参照)の外板と隅柱が破断するとともに側面の外板が変形しました。また、衝撃時の最大力は左右オフセットのみの方が、上下・左右オフセットよりも大きくなってい

※有限要素モデル

構造物などの挙動を近似的に求めるために、多くの小さな部分(要素)に分割してモデル化したもの。

※台枠

車体の床面を構成する骨組みで、車体の強度を担う重要な部材。

※妻面

車体を構成する6面のうち、車体端部の面。

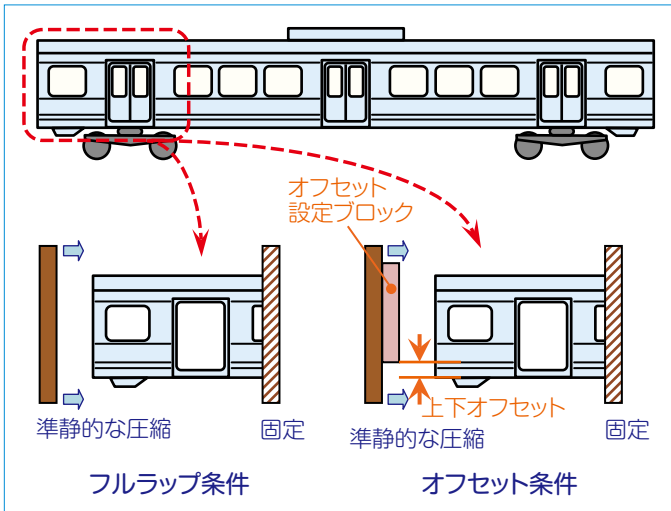


図2 実物試験体の準静的圧縮試験¹⁾

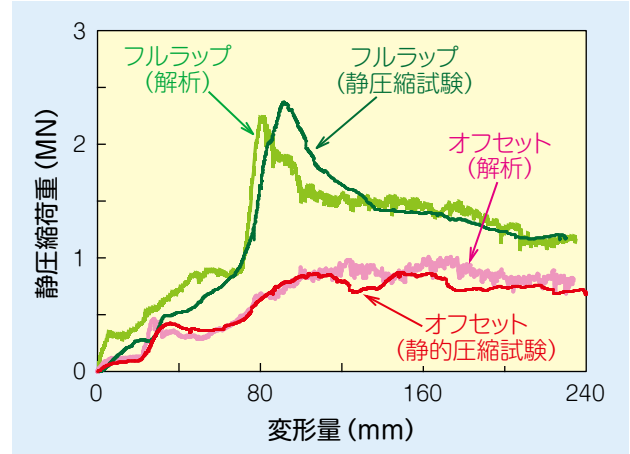


図3 変形量－静圧縮力特性¹⁾

ました。衝撃時の最大力は、変形に対する抵抗力を表し、台枠がずれることにより、変形に対する抵抗力が低下することが明らかとなりました。

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できる有限要素モデルを構築し、これを実車相当に拡張して解析による被害軽減策の検討を行いました。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構造の導入が有効であることを提案しました²⁾。

妻面衝突³⁾

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ります。この時、当該衝突部に垂直座屈(☞参照)による上下オフセットが生じるかどうかで、車体損傷特性や衝撃エネルギーの吸収量が大きく異なります。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ともに、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ました。

まず、実車体から切り出した供試体(約4m)の準静的な圧縮試験を行いました。図2左のように、妻面の全面が衝突する条件(フルラップ条件)では、台枠の端にあるはりや中央の長手方向のほりに大きな変形が生じました。これに対して、衝突部分を少しずらした同図右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面を含む車端部が大きく変形し、台枠の端にあるはりとの接合部が破断しました。

次に、車体の有限要素モデルを構築し、静的な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ました³⁾。試験と解析で得られた変形量－静圧縮力の関係を比較したものを図3に示します。変形の過程で生じる静圧縮力の最大値はフルラップ条件よりもオフセット条件で小さくなりました。

側面衝突⁴⁾

脱線した車両の側面が沿線の建築物に衝突する場合や、自動車などが車両側方から衝突してくる場合には、衝突した部位がつぶれてしまう可能性が考えられます。被害を軽減するためには、

車内の生存空間が確保されるような車体構造が重要になります。

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、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な圧縮試験およびおもりを落とす落錘試験を実施しました。落錘試験は、横向きに設置した供試体に向けて載荷板を落として衝突させるもので、その状況を図4に示します。同図左側の台枠周りでは台枠横方向のほりの座屈や、はり同士またははりと板のスポット溶接の破断が見られました。また、同図右側の天井周りでは屋根が膨らみ、部材のスポット溶接の破断が確認されました。

これらの試験結果に対し、構体の変形挙動を精度良く再現できる有限要素解析手法を構築しました⁴⁾。側面衝突時の生存空間減少量として室内幅の変化を指標とすると、生存空間の減少と被害状況を推測することができました。**踏切事故⁵⁾**

過去には、踏切内の自動車に列車が衝突する重大な事故がありました。衝突対象は乗用車だけではなく、大型トレーラー、ダンプカー、トラックなどがあり、衝突速度も100km/hを超えていたと考えられているものもあります。

☞垂直座屈

編成列車中で、車体支持ばねの上下作用範囲を超えて車体が大きく変位する現象。



図4 落錘試験の状況¹⁾

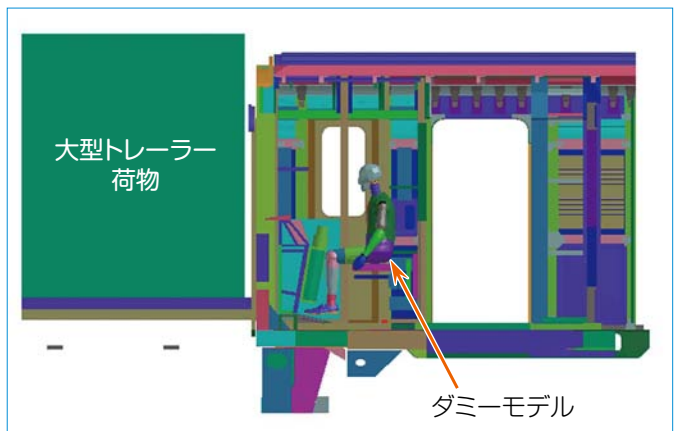


図5 先頭車の有限要素詳細モデル⁵⁾

踏切事故については、衝突シナリオの設定が重要です。その上で、乗務員室の運転台や内部の構造を再現した先頭車の有限要素詳細モデルを構築し(図5)、「1次衝突」による車体の損傷解析手法の精度向上に取り組んできました⁵⁾。さらに、「1次衝突」で得られた成果を利用して、乗務員の「2次衝突」の傷害度を合わせて解析できるような手法の構築を進めています。

編成を考慮した衝突

列車衝突時の安全性を確保するための取り組みの一つに、列車の編成を考慮した解析があります。列車は1車両での運用だけではなく、何両もつながった編成で運用されています。つまり、長い編成の衝突においては、編成としての挙動解明が必要です。これにより、前述の妻面衝突の状況がわかるようになります。また、長い編成では、先頭車以外の車両の影響が加わりますので、先頭車のみによる衝撃エネルギーの吸収は困難です。我が国では編成中の個々の車両の構造に大きな違いはないので、「1次衝突」被害の低減の方法としては、車両の各部位が強度を確保することに加えて、編成の衝突挙動を考慮した強度バランスが必要と考えられます。

したがって、車体構造の設計のため

には、編成での先頭車の「1次衝突」部に加え、編成中間部での車体変形や連結部の緩衝器の作用などを合わせて考慮する必要があります。編成としての挙動と衝撃エネルギーの吸収過程などを解析し、編成を考慮した評価手法の構築を進めています。

列車衝突時の安全性を確保するために¹⁾

列車衝突時の安全性を確保するためには、まず、衝突現象の把握が必要です。ここで述べてきたようないろいろな場合の衝突現象について、実際に起きてしまった事故を調べるとともに、部分的な試験、実物大の試験、解析などを行ってきました。

今後、被害の最小化に向けて、「1次衝突」での車体の衝撃エネルギーの吸収が大きく、車内の生存空間が確保されるような車体構造を評価できるよう、これまでに検討してきた手法を高度化していきたいと考えています。また、「1次衝突」で得られた結果を基に、生存空間と乗客や乗務員の「2次衝突」被害度が推定されます。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きます。

これらは、車体や車内設備に関する列車衝突時の安全性を確保するための構造と仕様の検討や評価に利用できると考えています。こうした取り組みを通じ、今後とも列車衝突時の安全性の確保に貢献していきたいと考えています。

本記事の研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。RRR

文献

- 1) 早勢剛, 沖野友洋: 列車衝突時の安全性確保に向けた取り組み, 鉄道総研報告, Vol.29, No.9, pp.1-4, 2015
- 2) 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, pp.11-16, 2005
- 3) 加藤幸夫, 沖野友洋, 宇治田寧, 舟津浩二: 編成車両の衝突解析手法(その1) - FEM解析による車体端部破壊特性の検証 -, 日本機械学会関東支部第12期総会講演会講演論文集, Vol.12, No.20518, pp.259-260, 2006
- 4) 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, pp.23-28, 2011
- 5) 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, pp.12-15, 2013