

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

踏切事故に対する 車両の安全性を評価する

踏切における自動車との衝突事故は未然に防止することが困難であり、万が一事故が発生した場合でも被害を最小限に抑える対策が必要になります。しかしながら、現状では車両の衝突安全性の評価において、標準とする衝突条件および評価手法がないことが課題として挙げられます。そこで、衝突条件を検討するために、過去に発生した踏切重大事故の衝突速度と衝突対象物について統計的調査を実施しました。また、踏切事故時の車体変形状況と乗務員挙動を同時に評価し、乗務員の安全性を指標とした車両の衝突安全性評価手法を構築しましたので、紹介します。



沖野 友洋
Tomohiro Okino
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

我が国における鉄道車両の衝突事故対策については、事故を未然に防ぐことを基本とした考え方で進められてきました。このような考え方はアクティブセーフティーと呼ばれ、信号・保安設備などの発展によって、諸外国と比較しても衝突事故が少なくなっています。

しかしながら、踏切での衝突事故については、警報機、遮断機の整備に加え、障害物検知装置の導入なども進められていますが、自動車の直前横断など未然に防止することが困難な場合もあります。そのため、踏切事故対策としては、万が一事故が発生した場合でも被害を最小限に抑える対策が必要となります。これはアクティブセーフティーに対して、パッシブセーフティーと呼ばれています。パッシブセーフティーには、衝突による車両の変形を少なくすることや衝撃力を緩和することなどの車両の対策、衝突時に脱線を防ぐなどの車両および軌道の対策があります。

踏切事故対策

過去に発生した踏切における大型

貨物自動車との衝突事故を教訓として、踏切衝突事故時の安全性を向上するために、鉄道車両にパッシブセーフティーの考え方が採用されています。具体的な対策として、乗務員室および車両の破損を最小限とするために、先頭車前面の外板や骨組みの厚さを厚くし、骨組みの断面形状変更や追加によって強度を向上させる取り組み（前面強化）や、乗務員の閉じ込め防止のために乗務員室空間の拡大などがあります。旧国鉄では、昭和39年に小型自動車および6トン積みダンプカーとの衝突試験を実車を用いて実施し、車両の変形状況や挙動などを評価することによって、前面強化の有効性を確認しています。

また、近年では、クラッシュブルゾーンと呼ばれる相対的に強度の低い箇所とサバイバルゾーンと呼ばれる相対的に強度の高い箇所（客室や乗務員室）を設定し、クラッシュブルゾーンが積極的に変形することで、衝突事故時に乗客の生存空間確保と衝撃を緩和する車体構造が開発されています。

衝突安全性評価における問題点

我が国において、鉄道車両の車体構造の設計基準は通常運用時に作用する力を想定したものとなっており、必ずしも衝突事故を想定していません。前後方向の荷重に関しては、編成列車において、連結器に加わると想定される力の大きさがJIS規格¹⁾で規定されています。そのため、踏切衝突事故時の車両の安全性を検査する場合、衝突時の列車速度や衝突対象物などの衝突条件（以後、衝突シナリオと呼ぶ）をどのように設定すれば良いか、また、衝突後の車両の状況がどの程度であれば安全と言えるのかは明確になっておらず、車両の衝突安全性に関する設計が難しくなっているのが現状です。

近年の踏切重大事故の統計調査

衝突シナリオを検査するためには、過去に発生した衝突事故を調査し、統計的に分析することが重要であると考えられます。そこで、昭和62年度から平成22年度までの期間を対象に調査した結果、踏切における重大事故（死傷者10名以上もしくは脱線両数10両以上の事故）は34件発生していました。いずれも自動車に列車が衝突する事故で、大型トレーラーとダンプカーに対するものがそれぞれ23%で最多でした（図1）。

次に、事故時の乗務員の口述による自動車発見時の列車速度と踏切までの距離、非常ブレーキ作動時の列車の減速度性能および空走時間から、それぞれの事故における自動車との衝突速度を推定しました。推定衝突速度の分布を図1に示します。推定衝突速度は15km/h～106km/hまで幅広く分布しており、平均値は54km/hでした。

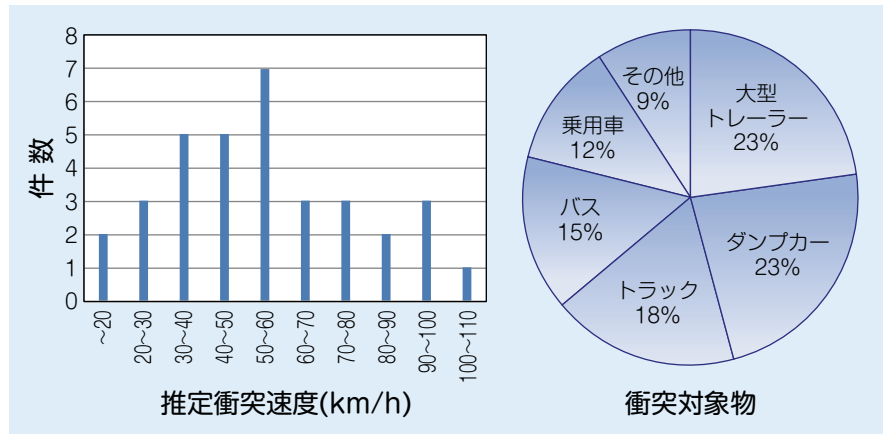


図1 踏切重大事故の統計的調査

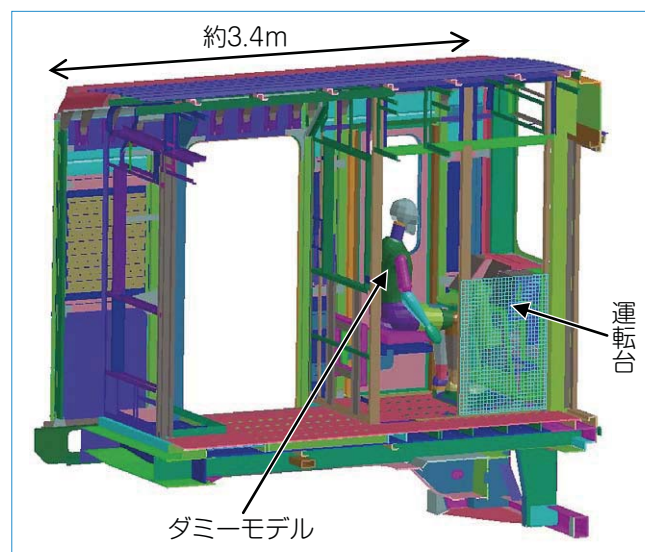


図2 乗務員の挙動を評価できる先頭車FEMモデル

衝突安全性評価手法の構築

自動車業界においては、乗員を模擬したダミー人形を乗せた自動車を壁などに衝突させ、ダミー人形に発生する衝撃加速度、たわみ、荷重などから頭部や胸部など各部位の傷害値を計算し、各部位ごとの基準値に従い車両の衝突安全性を評価しています²⁾。乗車姿勢がほぼ一定であり、かつ自動車の場合と似ている列車乗務員については、自動車と同等の評価ができると考えられます。また、踏切事故の場合、乗務員が衝突箇所にもっと近く、車体変形の影響を最も受けることになるので、ここではまず、乗務員の安全性を扱うこととします。そこで、FEM(有限要素法)

解析というコンピューターシミュレーション手法を用いて、乗務員の挙動を評価基準とした踏切事故時の車両の衝突安全性評価手法を構築しました。

踏切事故を想定した衝突条件において、乗務員の安全性を評価する場合、障害物との衝突による先頭車両の変形挙動と乗務員との衝突による運転台などの内装材の変形挙動を精度良く再現する必要があります。そのため、図2に示すように、乗務員室の運転台や内部骨組などを含む先頭車体のFEM解析モデル（以後、先頭車モデル）を作成しました。先頭車モデルで使用される各種金属材料の特性は、小型試験片を用いた様々な引張速度による衝撃引

表1 本手法における評価基準

評価指標	対象箇所	内容	評価基準
HIC36	頭部	頭部合成加速度とその持続時間（最大 36ms）から算出	1000 以下
3 MS (G)	胸部	胸部合成加速度の累積時間 3ms の最大値	60G 以下
大腿部荷重 (kN)	大腿部	大腿部の軸方向荷重	10kN 以下
車体変形状況	乗務員	衝突後に乗務員が速やかに脱出可能	挟まれなし

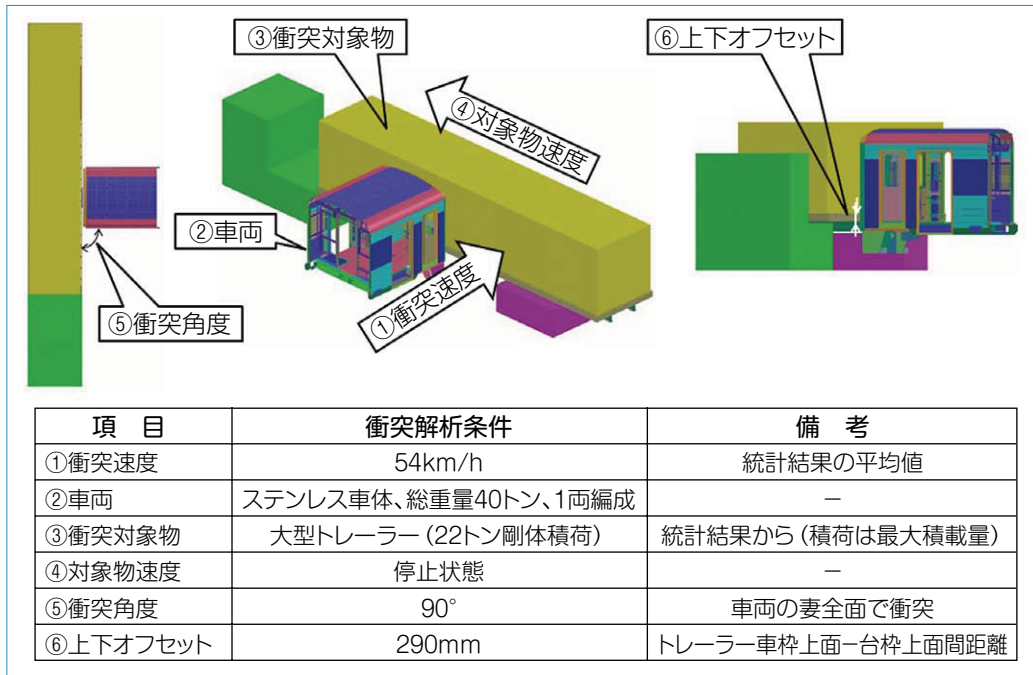


図3 基本ケースの衝突解析条件

張破断試験および部材レベルでの衝撃圧縮試験結果から導き出したひずみ速度依存性（☞参照）を考慮した機械的性質を採用しています。

次に、作成した先頭車モデルに自動車の前面衝突用のダミー人形として使用されているHybrid-III（AM50）を模擬したFEM剛体ダミーモデル（以後、ダミーモデル）を搭乗させました。

☞ ひずみ速度依存性

車体を構成する各種鉄鋼材料の応力-ひずみ特性はひずみ速度（引張・圧縮試験における引張・圧縮速度に相当）の影響を受け、ひずみ速度上昇にともない変形応力が上昇します。そのため、車両の衝突現象では、材料のひずみ速度依存性を考慮することが重要です。

のモデルを用いて、踏切事故を模擬したFEM解析を実施することにより、衝突事故時の車体変形状況と乗務員の挙動が同時に評価できます。

乗務員の安全性評価は自動車分野で用いられている評価指標のうち、死亡・重傷・後遺障害につながる可能性の高いHIC36（頭部）、3MS（胸部）および大腿部荷重（下肢）の3つの指標を使用し、それぞれの評価基準は、前面衝突試験時の基準と同等に決めました。また、車体の変形状況の評価として衝突事故後に乗務員が速やかに脱出できるように、乗務員を挟まないこととしました。以上、乗務員の安全性を評価できる車両の衝突安全性評価手法における評価基準について表1にまとめて示します。

車両の衝突安全性を評価する

本手法による車両の衝突安全性評価例を以下に示します。

衝突シナリオの設定

衝突シナリオについては、各事業者によって検討すべき条件が異なると考えられます。ここでは、例として前述の踏切重大事故の統計調査結果を基に、標準的な踏切事故条件（以後、基本ケース）として、静止した大型トレーラー（22トンの積み荷を積載）の側面に速度54km/hで衝突するなど設定しました（図3参照）。

本手法による評価例

基本ケースの衝突解析条件での車体変形挙動および乗務員挙動の解析結果を図4に、ダミーモデルの頭部加速度、

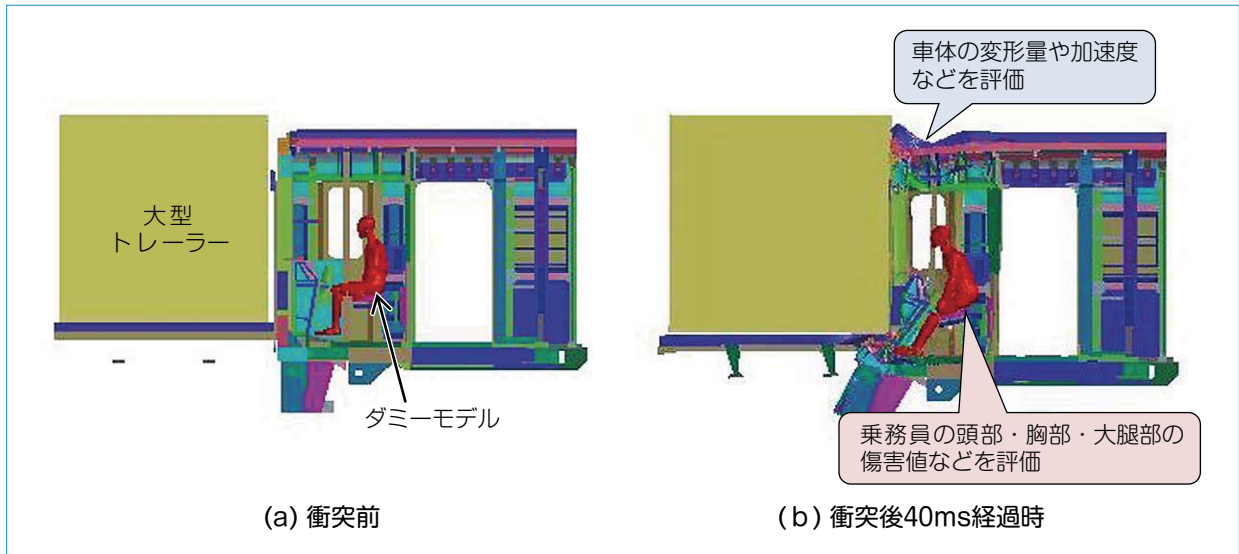


図4 基本ケースでの解析結果(車体変形挙動および乗務員挙動)

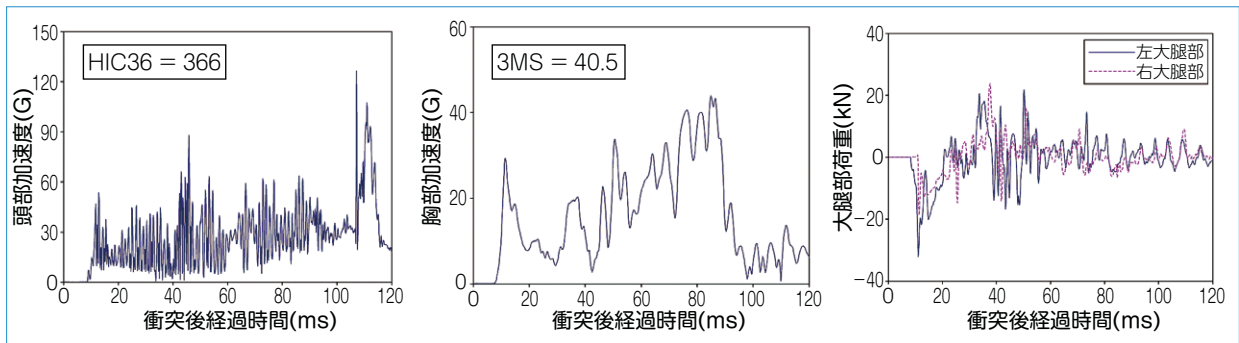


図5 基本ケースでの解析結果(ダミーモデル各部位の出力)

胸部加速度および左右大腿部荷重と時間の関係をHIC36値、3MS値と併せて図5に示します。大型トレーラーとの衝突により、先頭車前面が圧縮変形し、運転台が後方に倒れ始め、衝突後約10ms経過時に運転台がダミーモデルの膝に衝撃することにより、左大腿部に計算時間内での最大荷重32kNの圧縮荷重が発生しました。これは基準値を超える値です。その後も運転台の倒れ込みが継続し、衝突後約85ms経過時にダミーモデルの胸部が運転台に、約107ms経過時に頭部が衝突しましたが、頭部、胸部評価値については基準値内となりました。最終的には運転台の倒れ込みにより、脚部が挟まれた状態となりました。

以上の結果から、本評価例においては、大腿部への著大荷重の低減対策と脚部の挟まれ防止対策を検討すべきであることが分かります。

おわりに

本稿では、踏切事故時の車両の衝突安全性を定量的に評価するために、乗務員の安全性を指標とした新たな評価手法について、本手法による評価例とともに紹介しました。本稿では、過去の踏切重大事故事例をもとに、簡易な事故状況を想定し、比較的モデル化や評価が容易な乗務員の衝突安全性についてその一例を紹介しましたが、各事業者によって必要となる衝突シナリオは異なると考えられます。構築した評

価手法は様々な条件に対応でき、車体設計法や衝突シナリオ策定にむけての今後の検討に活用できるものと考えられます。また、今回は乗務員を対象としましたが、得られた知見をさらに乗客の安全性評価についても対象を広げていきます。[RRR]

文献

- 1) JIS E 7106 : 2006, 鉄道車両—旅客車用構体—設計通則
- 2) 自動車技術会編：インパクトバイオメカニクス, 2006