

2604 列車乗務員の傷害度を指標とした踏切事故時の車両の衝突安全性評価

正 [機] ○沖野 友洋 (鉄道総研)

山本 勝太 (鉄道総研)

正 [機] 高野 純一 (鉄道総研)

正 [機] 宇治田 寧 (鉄道総研)

Crashworthiness Evaluation for Train Carbody in the Event of Level Crossing Accident by Driver's Injury Indexes

Tomohiro OKINO, Masataka YAMAMOTO, Junichi TAKANO and Yasusi UJITA,

Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo

In order to evaluate the train driver's kinematic behavior in the event of a level crossing accident, we performed numerical analyses by using a FE model of a lead car in which a dummy model of a driver was placed. This method can evaluate the deformation of carbody and the kinematic motion of driver simultaneously, and further evaluate the driver's injury quantitatively, in the event of collision accidents. We carried out the reproduction analysis of a typical level crossing accident which occurred in the past, and compared the result with actual accident damage in order to check the analysis accuracy of this method. Furthermore, we examined desirable principles of the carbody-structure design for improving crashworthiness by performing FE analyses under various conditions using this method after supposing a typical collision-analysis condition based on the statistical analysis of past serious level-crossing accidents for 24 years.

Keywords : railway, crashworthiness, finite element method, human engineering

1. はじめに

鉄道の安全対策として、万一の衝突事故時に乗客・乗員の被害を軽減する車体構造は重要であり、従来から衝突安全性向上に関する車体強度の検討がなされてきた(1)~(4)。しかしながら、我が国において、鉄道車両の車体構造の設計基準は衝突事故を想定しておらず、衝突条件が明示されていない。また、車両の衝突安全性の指標としては、車体衝撃加速度や生存空間確保のための車体変形量が使用される場合が多いが、その限度値を設定することが困難であった。そこで、本研究では、衝突シナリオを検討するためのデータベースとするために、近年の踏切重大事故を調査し、特に重要な項目であると考えられる衝突速度と衝突対象物について統計的調査を実施した。次に、乗務員室の運転台や内部骨組を含む先頭車 FEM 解析モデルを作成し、乗務員を模擬した人体ダミーモデルを搭乗させることにより、衝突事故時の車体変形状況と乗務員の挙動を同時に評価し、乗務員の傷害度を定量的に評価できる車両の衝突安全性評価手法を構築した。本手法を用いて、過去に発生した重大事故の再現解析を実施し、実際の事故車両の変形状況および乗務員の負傷状況と比較することにより、本手法の解析精度を確認した。さらに、過去の踏切重大事故の統計結果から、基本的な衝突解析条件を設定し、本手法を用いて様々な衝突解析条件での FEM 解析を実施することにより、乗務員の衝突安全性に関する検証を行い、衝突安全性向上のための車体構造設計の方向性について検討した。

2. 近年の踏切重大事故状況

国土交通省鉄道局における鉄道事故の分類を基に、死傷者 10 名以上もしくは脱線両数 10 両以上の事故を「重大事故」とし、昭和 62 年度から平成 22 年度までに発生した踏切における重大事故発生件数を調査した結果、34 件であった。これらの事故は、いずれも踏切内の自動車に列車が衝突する事故であり、大型トレーラとダンプカ

ーに対するものがそれぞれ 23% で最多であった (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、衝突速度を推定した。推定衝突速度の統計結果を図 1 に示す。推定衝突速度の平均値は 54km/h (15m/s) で、最大値は 106km/h (29.4m/s) であった。

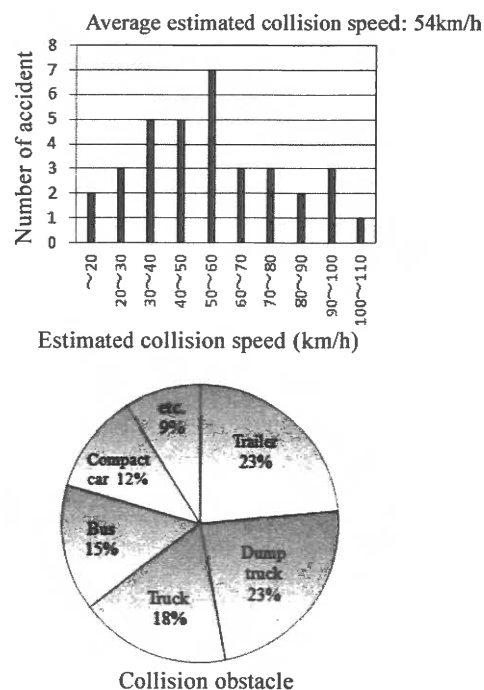


Fig.1 Statistical analysis of past serious level-crossing accidents

3. 踏切事故時の車両の衝突安全性評価手法の開発

3.1 乗務員の傷害度を評価できる車両の衝突安全性評価手法の構築

踏切事故を想定した衝突条件において、乗務員の傷害度を評価する場合、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等の内装材の変形挙動を精度良く再現する必要がある。そのため、先頭車体は乗務員室の運転台や内部骨組を含む FEM 解析モデルとした(図2)。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、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を同時に評価可能な数値解析手法を構築した。なお、解析には汎用の陽解法有限要素解析プログラム PAMCRASH を使用した。

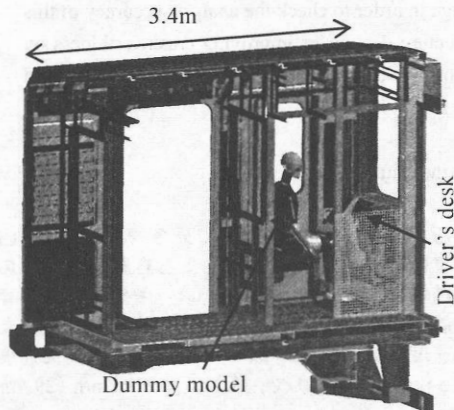
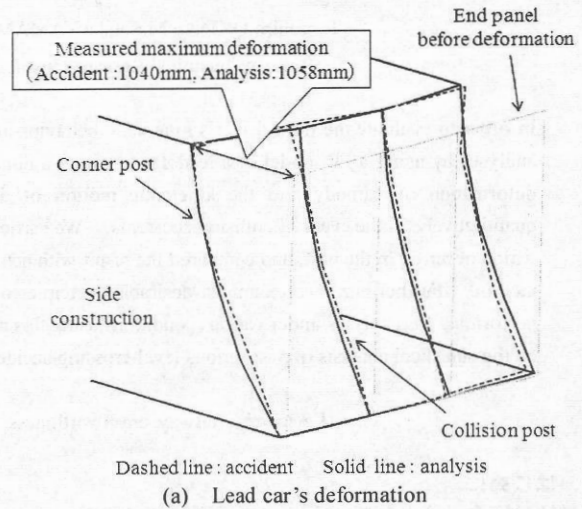


Fig2. FE model of lead car to evaluate driver's injury

乗務員の傷害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頭部傷害値(HIC36)、胸部傷害値(3MS)および下肢傷害値(大腿部荷重)の3つの指標を使用した。自動車アセスメント(JNCAP)ではこれらの指標に対して、前面衝突試験の傷害基準(HIC36:1000以下、3MS:60G以下、大腿部荷重:10kN以下)を定めており、本手法においても同等とした。また、車体の変形状況の評価は衝突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た。以上、乗務員の傷害度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にまとめて示す。

3.2 乗務員の傷害度を評価できる車両の衝突安全性評価手法の精度検証

第2章で調査した過去の重大事故の1つをモデルケースとして、本手法による事故の再現解析を実施し、実際の事故車両の隅柱およびホロ柱のレール方向圧縮変形量を計測した結果および乗務員の負傷状況をそれぞれに対応する解析結果と比較して図3に示す。図3より、本手法により、先頭車両の変形状況および乗務員の負傷状況ともに高い精度で踏切事故を再現できることを確認した。



(a) Lead car's deformation

Analysis

- HIC36 : within injury index value
- 3MS : within injury index value
- Femur force(left) : 2.6 times of injury index value
- Femur force(right) : 1.3 times of injury index value

Driver's injury

- open fracture of left femur
- fracture of both knees
- fracture of left leg shell

(b) Driver's injury situation

Fig3. Comparison between accident and analysis

4. 本手法を用いた車両の衝突安全性評価

本手法を用いて、典型的な踏切事故条件(以後、基本ケース)での車両の衝突安全性を評価するために、第2章における過去の踏切重大事故の統計調査結果から、基本ケースを静止した大型トレーラ(22000kgの積み荷を積載)の側面に速度54km/h(15m/s)で衝突することとした。鉄道車両は、基本的な条件として1両編成とし、ステンレス鋼製車体で総重量40トンとした。

Table1 Evaluation criteria

Evaluation index	Target region	Content	Injury index
HIC36	Head	Calculated from head acceleration and duration (maximum 36ms)	1000
3MS (G)	Chest	Chest acceleration (3ms cumulative exceedance)	60
Femur force (kN)	Femur	Femur axial force	10
Deformation of driver's desk	Driver	Ease of escaping after collision	Driver's body is not caught in

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、胸部加速度および左右大腿部荷重と時間の関係をHIC値、3MS値と併せて図5に示す。なお、大腿部荷重は圧縮荷重を負、引張荷重を正とした。ダミーモデルの傷害値は頭部、胸部については基準値以下となったが、左右大腿部荷重は基準値を超えた。大型トレーラとの衝突により、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た。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衝撃することにより、44G(432m/s²)程度の最大加速度が胸部に発生し、約127ms経過時に頭部が衝突することにより、127G(1246m/s²)程度の最大加速度が頭部に発生した。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った。

基本ケースに対して、表2のようにパラメータを変更して様々な衝突条件で解析を実施し、結果を比較検証した。各衝突解析条件の詳細について以下に示す。

(a) 低床車ケース (Low-floor trailer case)

大型トレーラには多くの種類が存在するが、特に荷台高さの違いによる上下オフセット量(台枠と荷台の高低差)の変化によって、衝突挙動の変化が大きくなると考えられる。そこで、大型トレーラを低床車(基本ケースより235mm低い)に変更した。

(b) 前面強化ケース (Strengthening carbody case)

先頭車両の強度・剛性の違いによる影響を確認すること、および基本ケースで問題となった運転台の倒れ込みを抑制する手段の一つとして、先頭車構体の隅柱およびホロ柱の強化が考えられる。そこで、隅柱、ホロ柱の板厚を2倍とした。

(c) 運転台低剛性ケース (Low-stiffness desk case)

基本ケースにおいて、運転台と膝の衝撃による大腿部への著大荷重が問題となった。先頭車モデルの運転台前面には機器類が搭載されており、これと膝が衝突している。そこで、機器類を排除することで、膝が衝突する箇所の剛性を下げた。

Table 2 Analysis condition

	Difference to basic case
Low-floor trailer case	Trailer is changed into low-floor vehicle
Strengthening carbody case	The thickness of corner posts and collision posts is doubled
Low-stiffness desk case	The front equipment of driver's desk is removed

低床車ケースでは、図6に示すように、運転台の倒れ込みが少ないうえに、衝突による減速度によりダミーモデルが斜め前方に押し出され、頭部が窓に衝突する挙動となった。前面強化ケースでは、運転台の倒れ込みが改善し、頭部・下肢傷害値はほとんど変わらず、胸部傷害値が改善した。しかしながら、頭部が運転台に衝突する直前の頭部速度は前面強化ケースの方が大きくなっていることから、頭部衝突位置の強度・剛性が基本ケースにおけるそれよりも低かった可能性が考えられる。すなわち、頭部・胸部傷害値は頭部衝突位置の違いによる影響が大きいと考えられ、このことは、頭部が衝突する可能性のある全ての箇所について、傷害値を低下させる対策

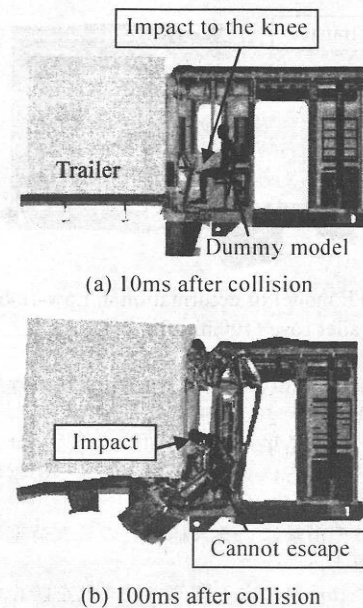


Fig.4 FEM results of vehicle-deformation and dummy-behavior (basic case)

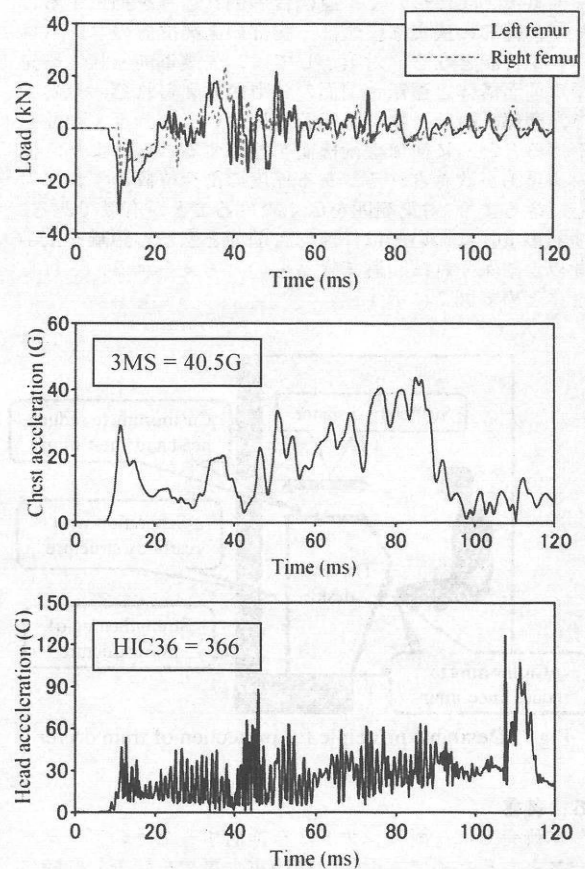


Fig.5 Dummy-output results (basic case)

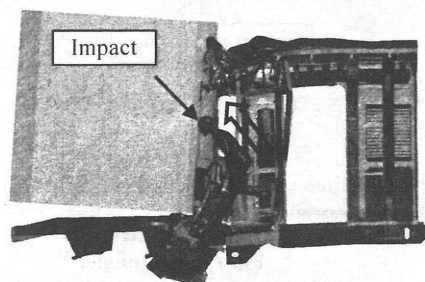


Fig.6 FE model of deformation in Low-floor trailer case (100ms after collision)

の必要性を示唆するものである。運転台低剛性ケースでは、下肢傷害値が大きく改善された。

各ケースでの解析結果から、踏切事故時における乗務員の安全性を確保するにあたり、以下の4つの事項を検討すべきであることが分かった。

- ・運転台と膝の衝撃による大腿部への著大荷重の低減対策（検討事項①）
- ・運転台の倒れ込みによる脚部の挟まれを防止する対策（検討事項②）
- ・頭部が前面窓に衝突することを防止する対策（検討事項③）
- ・頭部・胸部の衝突位置をある程度の範囲内に制御する方策（検討事項④）

検討事項②④について、運転台の倒れ込みを抑止することで、脚部の挟まれ、頭部・胸部の衝突位置のコントロールが可能となる。対策としては、先頭車前面強化や先頭車前面構体と運転台前面の分離が考えられる。その上で、頭部・胸部・膝の衝突箇所について、強度・剛性を下げるとともに衝撃緩衝機能を追加することにより、検討事項①が改善される。ある程度の衝突位置のずれに対応できるよう、対策範囲を広く設けることが有効である。検討事項③については、運転台前面と窓との距離を上半身以上確保すれば回避できるものと考えられる。これらをまとめて図7に示す。

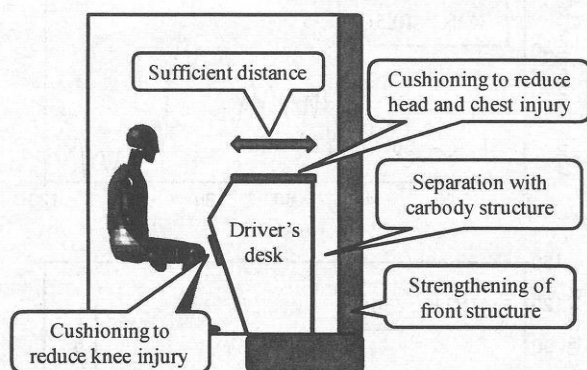


Fig.7 Desirable principle for protection of train driver

5. 結言

本研究では、衝突シナリオを検討するためのデータベースとするために、近年の踏切重大事故を調査し、特に重要な項目であると考えられる衝突速度と衝突対象物について統計処理を実施した。その結果、推定衝突速度の平均値は 54km/h (15m/s) で、衝突対象物は大型トレー

ラとダンプカーがそれぞれ 23% で最多であった。

乗務員室の運転台や内部骨組を含む先頭車 FEM 解析モデルを作成し、乗務員を模擬した人体ダミーモデルを搭乗させることにより、衝突事故時の車体変形状況と乗務員の挙動を同時に評価し、乗務員の傷害値を定量的に評価できる車両の衝突安全性評価手法を構築した。乗務員の傷害評価は自動車分野で広く用いられている頭部、胸部および下肢傷害値と衝突後に乗務員が速やかに脱出できるように、車体の変形によって乗務員が挟まれないこととした。本手法を用いて、過去に発生した重大事故の再現解析を実施した結果、実際の事故車両の変形状況および乗務員の負傷状況とともに高い精度で再現できることを確認した。

過去の踏切重大事故の統計結果から、基本的な衝突解析条件を設定し、本手法を用いて様々な衝突解析条件での FEM 解析を実施した。その結果、乗務員の衝突安全性を確保するにあたり、4つの検討すべき事項（膝からの衝撃低減、脚部の挟まれ防止、頭部の前面窓への衝突防止、頭部・胸部の衝突位置の制御）が挙げられ、衝突安全性向上のための車体構造設計の方向性として、運転台の倒れ込みの抑止、頭部・胸部・膝の衝突位置の衝撃緩衝対策、運転台前面と前面窓との距離の確保が効果的であることを示した。

本研究では、過去の踏切重大事故において、平均的かつ簡易な事故状況をもとに乗務員の衝突安全性について検討したが、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る。構築した評価手法は様々な条件に対応でき、今後の車体設計や衝突シナリオ策定にむけての検討に活用できるものと考えている。また、今回は乗務員を対象としたが、得られた知見をもとに乗客についても対象を広げ、乗客の傷害度を評価できる車両の衝突安全性評価手法の構築につなげていく。

参考文献

- 1) 加藤、他3名：編成車両の衝突解析手法、関東支部第12期総会講演会講演論文集、pp.259-262, 2006
- 2) 沖野、宇治田：鉄道車両の側面圧縮強度特性評価、日本機械学会 第17回交通・物流部門大会講演論文集、pp.223-226, 2008
- 3) 沖野、宇治田：内部骨組を活用した鉄道車両の車体強度向上効果の検証、日本機械学会 D&D2009 講演論文集(CD-ROM)、講演番号 566, 2009
- 4) 沖野、宇治田：鉄道車両の側面衝撃圧縮強度特性評価、日本機械学会 第19回交通・物流部門大会講演論文集、pp.221-224, 2010