

落石衝撃時の車両の安全性向上に関する研究

A Study on the improvement in Safety of Rolling Stocks in the Case of Collision with Fallen Rocks



安田 陽一*



三須 弥生*



日沖 由里香**



土井 賢一***



加藤 幸夫****



堀岡 健司*

It is not perfect to stop a train at the time of the accident such as falling rocks on a railway track. A rolling stock may derail if the fallen rocks are caught under the vehicle. In this study, we analyze the behavior of ready-made snow-plough in case of the collision of the fallen rocks and consider countermeasures to improve the performance of the snow-plough to remove the fallen rocks. We also estimate situations in which heavy damage to the customer's and driver's body can be reduced in the collision accident. Moreover, we develop a fuel tank having a function to prevent leaking oil if the fallen rocks hit the tank. This developed fuel tank is adopted to a new diesel train, HB-E210.

●キーワード：落石、スノウプラウ、人体被害、燃料タンク、床下損傷防止

1. はじめに

土砂崩壊や落石など発生予測が困難な事象に対し、重点監視箇所の定期検査や検知装置設置による列車抑止などの対策がとられている。しかし、当社敷地外からの流入など、ありとあらゆるケースについて対策を講じることは難しい。このため、落石などの軌道上の障害物を車両の床下に巻き込み、脱線に至る事象が実際に発生している。そこで、衝撃の際の既存のスノウプラウと落石の挙動を解析し、対策の検討を行った。また、万が一、衝撃した場合でも乗車中のお客さまや乗務員に深刻な人体被害が出ない条件を推定した。さらに、2012年10月2日に発生した磐越西線山都～萩野間での落石の巻き込み事象では、床下に搭載している燃料タンクが損傷し、漏油に至った。このことから、燃料漏れによる沿線の汚損を最小限に抑えるための損傷防止型の燃料タンクを開発し、仙石線用HB-E210形より導入し、さらに既存の気動車の燃料タンク取替時にも導入していくこととなった。

本稿では、落石衝撃時の車両の安全性に関して、数年にわたり取り組んできた研究内容について紹介する。

2. 落石衝撃時のスノウプラウの挙動解析と対策

2.1 概要

近年に発生した落石との衝撃事例(表1)では、軌道上の落石に衝撃したことにより、スノウプラウ先端部が後ろに折れ曲がるような損傷や床下への落石の巻き込みなどが発生している。

そのため、落石の巻き込みによる脱線、車両構体への致命的な損傷を防止するために、スノウプラウの機能向上を検討した(図1)。

表1 近年発生した落石との衝撃事例

発生日	線名・区間	車両	落石の大きさ
★平成23年 7月14日	磐越西線 徳沢駅構内	キハ110+他2両	600×450×450mm
平成23年 11月24日	山田線 松草～平津戸	キハ111+他1両	800×800×700mm (推定)
平成24年 7月8日	釜石線 晴山～岩根橋	キハ100 1両	(詳細不明)

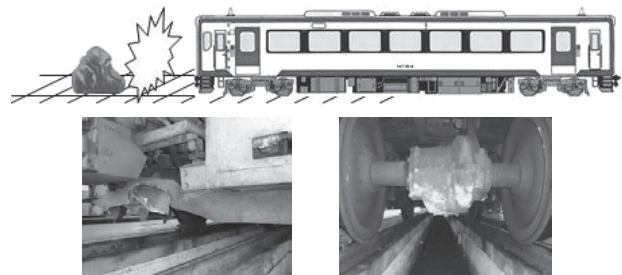


図1 落石衝撃後の車両状態例

2.2 落石などの衝撃挙動の推定と改良案の検討

2.2.1 現行品の静解析と改良案策定

現状のスノウプラウについて、落石の巻き込みにより脱線にまで至った徳沢駅構内の事象(表1★印)の落石(600mm×450mm×450mm)を目安としてFEM解析を行った。

その結果、スノウプラウのフラップ部の切欠き(後進時、氷雪を逃すため設けられた切欠き)がある場合は、極端な応力集中が生じ、スノウプラウ中央部が後ろ側に折れ曲がるような変形する結果が得られた(図2)。これは、実際の変形形状と一致している(写真1)。

このため、現行品との互換性を考慮し、スノウプラウのみの構造変更留めた次の改良案を検討した。

- ・フラップ部切欠のコーナー部へ補強板(t4.5)を取付(コーナー部へ応力集中回避)
- ・中央部の後ろ側へ梁を追加(折れ曲がり防止)

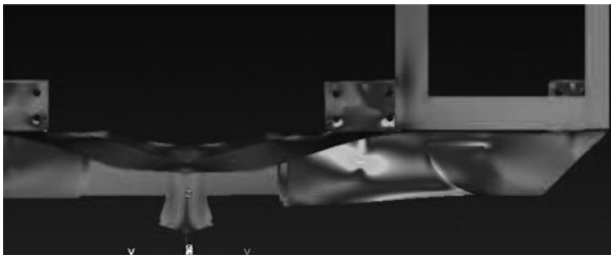


図2 シミュレーションでの変形形状



写真1 実際の変形形状

2.2.2 動解析による評価

車体モデル(図3)を製作し、次の条件で動解析を行い、改良案の有効性を検証した。

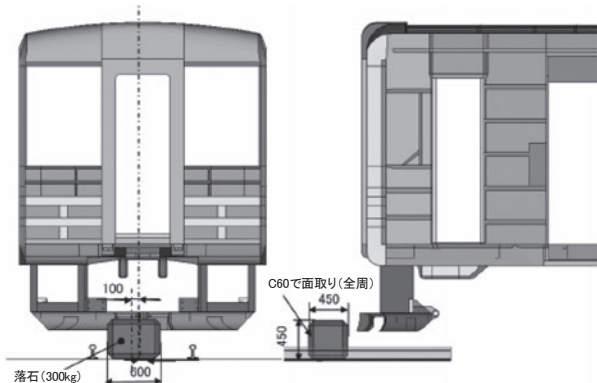


図3 車体モデル

【車体】

- ・モデル: スノウプラウ、排障装置、端台枠、構体
- ・車体重量: 38.6t (定員時: 32t+120人×55kg)
- ・衝突速度: 60km/h
- ・車両減速度: 3.0km/h/s (衝突と同時に非常ブレーキ)
- ・材料破断: 考慮しない

【落石】

- ・大きさ: 600×450×450mm (C60面取りあり)
- ・重量: 300kg
- ・比重: 2.47
- ・衝突位置: 軌道中心から100mmオフセット
- ・軌道との摩擦係数: 1.0 (静摩擦) 0.7 (動摩擦)
- ・石欠損、割れ: 考慮しない

2.2.3 解析結果

動解析により、以下の結果が得られた。

【メリット】

- ・衝撃初期の落石への接触荷重が増加(180kN→515kN)し、衝撃で落石を砕く効果は向上する。

【デメリット】

- ・落石の重心はスノウプラウより低いいため落石を弾き飛ばす効果はなく、ぎ装限界があるためスノウプラウの下限位置も変更できない(図4)。
- ・構造が強化されたことで、落石の巻き込みによる鉛直上方向への反力が増大(約200kN→800kN)し、輪重減少による脱線のリスクが増加する(図5)。
- ・スノウプラウと車体のボルト締結部の荷重が増大するため、車体側の強度設計を見直す必要がある。

以上の結果から、現行品との互換性維持のもとでは、実用可能な改良は不可能と判断した。

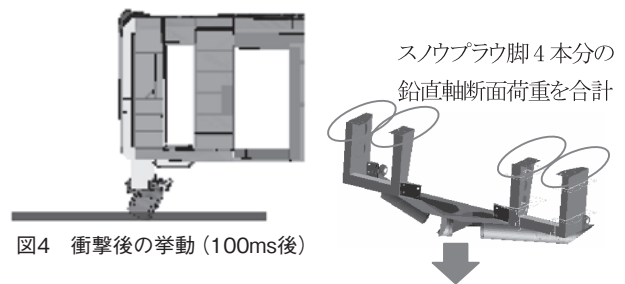


図4 衝撃後の挙動(100ms後)

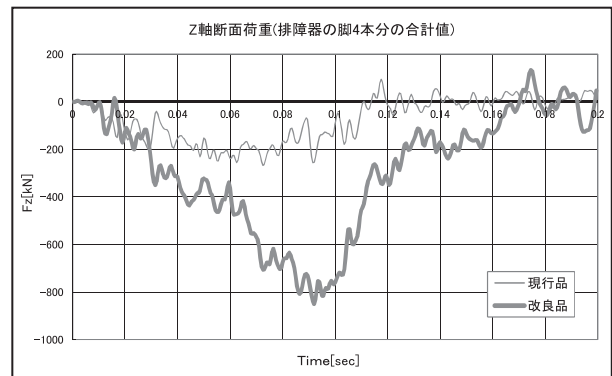


図5 スノウプラウに発生する鉛直方向反力

3. 落石に衝撃した際の客室内の人体被害低減

3.1 概要

軌道上の落石などの障害物に列車が衝撃した際、乗客や乗務員への深刻な人体被害を防止するため、衝撃時の速度などと傷害値の関連を求め、運行速度を低く抑えることによる人体への被害低減の可能性を検討した。

3.2 評価方法

車両が落石などに衝撃した際に、列車内の乗客などが車内設備に衝撃することによる人体被害を明らかにする。この

ため、実部材を用いた強度試験から、客室設備と人体頭部との衝撃を仮定した衝撃値の基礎データを取得し、マルチボディダイナミクス理論に基づく数値解析ソフトを用いてシミュレーションを実施した(図6)。なお、評価方法としては、自動車分野で実績のある衝突安全性評価指標(HIC値、RDC値)を採用した。

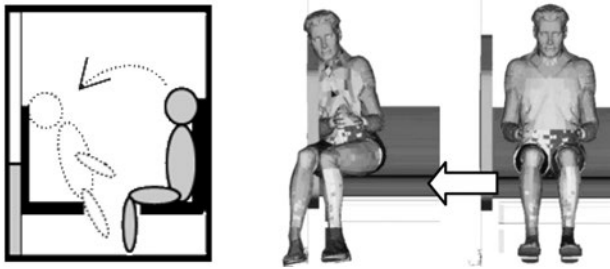


図6 人体被害シミュレーションモデル例

【検討条件】

車両：キハ110形 1両

乗車率：10~50%

解析条件：

- ・軌道上の静止する落石に車両が正面から衝撃
- ・ブレーキによる減速、落石と軌道の摩擦は考慮しない
- ・評価は、頭部傷害値(HIC)、胸部傷害値(RDC)による

3.3 評価結果

座席の着座位置・人数、衝撃する内装材などをパラメータとした衝撃を検討した事例の中で、以下の2点が最も厳しい結果となった。

- ・ロングシート3人着座の端から2番目の胸部への衝撃
- ・袖仕切り及び便所仕切りに頭部が衝撃

この評価は、HIC値を用いた起こりうる障害の確率によるものであり、大きな人体被害に至らないのは、車両走行速度45km/hの場合、落石の質量は9.5t以下となった。

4. 損傷防止型の燃料タンクの開発

4.1 概要

気動車が線路上の落石に衝撃した際に燃料タンクを損傷し、沿線に漏油する事象が発生している。このため、燃料漏れによる沿線への汚染被害を防止するため、損傷防止効果を持つ燃料タンクを開発した。

4.2 基礎試験(静荷重試験)

4.2.1 概要

既製品の大幅な変更をせず、障害物と衝撃する可能性が高い部分を覆う構造を検討した。防護材として、防弾鋼板、ポリカーボネイト、中空ポリカ成型シート(ツインカーボタフネス)、

アクリルフォームテープ、発砲ウレタン、保護塗料(防災・防護塗料:Line-X)を選定し、基礎試験を実施した。

4.2.2 試験方法

燃料タンクと同素材の1.6mm厚の鋼板に、各防護材を取付け、あるいは塗布し、サンプルを製作した。各サンプルに亀裂が発生するまで直径20mm頭の荷重体を下側から押し当て、荷重をロードセル、荷重負荷点の変位をワイヤー変位計で測定した。

4.2.3 試験結果

以下に、基礎試験の結果を示す(図7)。

- (1) 現行の燃料タンク(電気亜鉛めっき鋼板(SECC))
荷重17.3kNでせん断破断し穴が開いた。
- (2) 防弾鋼板
SECCの3倍の荷重(50kN)をかけても破断しないが、曲げ加工はできない。
- (3) ポリカ、中空ポリカ成型シートの樹脂系素材
SECCよりも小さい力で破断した。
- (4) アクリルフォーム、発砲ウレタン
SECCの約2倍の荷重で破断したが、2枚鋼板によるサンドイッチ構造のためタンクとしての構成は困難。
- (5) 保護塗料(防災・防護塗料:Line-X)
膜厚4mm及び膜厚6mmでは、SECCのそれぞれ約1.8倍、2.3倍の荷重に耐えた。

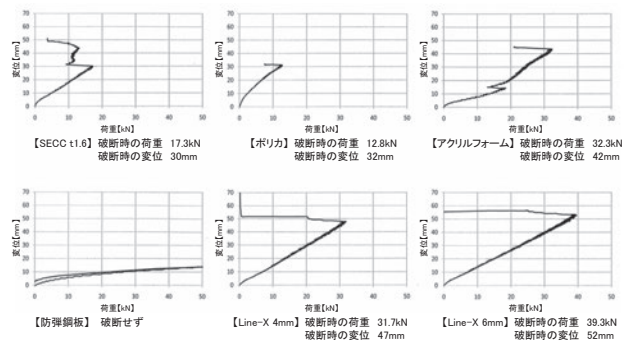


図7 基礎試験結果

4.3 衝撃試験

基礎試験の結果から、Line-Xを塗布した鋼板の衝撃荷重に対する強度を確認することとし、燃料タンク正面に落石などが衝突する場合を想定した衝撃試験を実施した。

4.3.1 試験方法

燃料タンクを模擬した1.6mm厚の鋼製ドラム缶の上面にLine-Xを塗布し、直径20mm頭・重さ27.6kgの重錘を自由落下させ、衝突面の亀裂の有無や変形状態を確認した。

4.3.2 試験結果

Line-X膜厚4mmまたは膜厚6mm塗布すると、塗布しないものに比べて、2倍前後の衝撃に耐えることができた。

また、一部条件においては、内部のドラム缶は損傷し穴が開いたものの、その上から塗布したLine-Xには穴あきが発生しなかった。この結果からも、Line-Xが漏油防止に有効であることが分かる。

表2 試験鋼板への衝撃試験結果

塗膜の有無	落下高さ (m)	力積の比*	穴開かず○、穴開き×	
			Line-X表面	ドラム缶上面
Line-X 無し	1.0	1.00		○
	1.25	1.12		×
Line-X 膜厚4mm 塗布	3.0	1.73	○	○
	3.5	1.87	○	×
	4.0	2.00	×	×
Line-X 膜厚6mm 塗布	5.0	2.24	○	○
	6.0	2.45	○	×
	7.0	2.65	○	×
	8.0	2.74	×	×

※力積は塗膜無を基準とし落下高さの平方根により比を導出

4.4 箱鋼体での静荷重試験

4.4.1 概要

実際の衝撃時には、燃料タンクは連続して落石の上を乗り越えるため、落石が燃料タンクに食い込みながら前方から後方へ通過することが予想される。このため、実際の燃料タンクの搭載状態を模擬した静荷重試験を実施し、Line-Xの損傷防止効果を確認した。

4.4.2 試験方法

試験用燃料タンクを製作(図8)後、Line-Xを塗布して台車に搭載し、ロードセルで引張荷重を測定しながら落石に見立てた障害物に食い込ませ通過させた。尚、比較のために実際の燃料タンク(車両発生品:キハ110用)でも同様の試験を実施した(図9)。

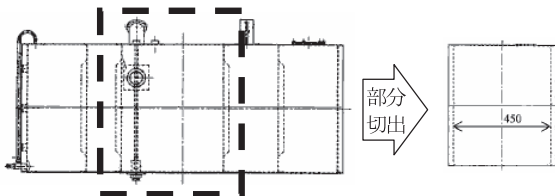


図8 実際の燃料タンクと部分的に切り出し製作した試験用タンク

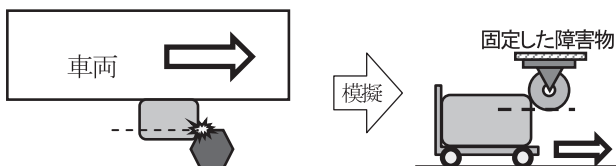


図9 食い込み確認の模擬試験方法

4.3.3 試験結果

実際の燃料タンクに比べて試験用タンクは剛性が不足していたため、破断せずに過大に変形する結果となった(図10)。なお、比較のために実施した実際の燃料タンクは破断した。

試験用タンクの過大な変形に対してもLine-Xが破断・剥離せず追従していることから、実際の燃料タンクにおいても、落石など障害物のくい込みに対する強度を向上できるものと推測する。

このため、実際の車両搭載の燃料タンクへの適用を検討した結果、重量増やコストなど、総合的に判断し、燃料タンクの下半分に膜厚4mm塗装を採用することとした。

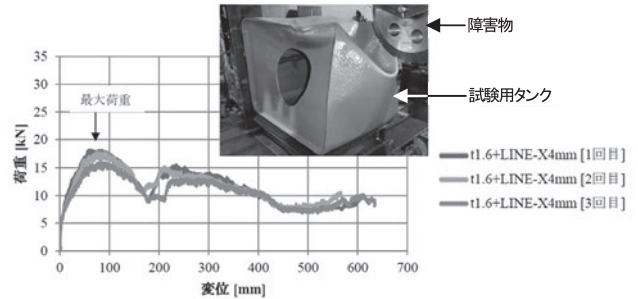


図10 過大変形した試験用タンクとその変位-荷重の関係図 (Line-X: 膜厚4mm)

5. おわりに

本稿では、軌道上の落石など障害物との衝撃に関する一連の研究について紹介した。既存の設計条件でのスノウプラウの改良にはつなげることができなかったものの、人体被害を抑えられる可能性の高い走行条件を明らかにし、さらに損傷防止効果のある燃料タンクを開発し、導入が決定した。

今後、床下機器の損傷防止という観点から、燃料タンク以外のさまざまな重要機器などへ本成果が展開されれば、更なる安全安定輸送につながると思われ、この可能性を検討したい。