

事故時の編成挙動を想定した車体端部強度評価

宇治田 寧*

Evaluation of Strength of End Structures of Intermediate Rolling Stocks of a Train during Train Crash Accidents

Yasushi UJITA

The structural design standard for rolling stock body structures was evaluated from the viewpoint of the crashworthiness. Current Japanese Industrial Standard, JIS E 7106 Code, which defines the least static loading conditions in order to provide structural integrity of car-body structures for their normal operation, does not obviously take the crashworthiness into account. Here, one of detailed FE models for the end structures of EMU stock, designed in accordance with the JIS E 7106 standard, was taken as an example, and numerical analysis was carried out under such the several irregular loading conditions as the collision of end structures of intermediate rolling stock of a rake, caused by the overriding or train-set buckling occurring during events of train crash accidents. The numerical analyses results have shown some points to be solved in terms of the strength of upper structures as well as draw gears around coupling devices.

キーワード：車体強度，衝突安全性，数値解析，車両設計

1. はじめに

編成車両が脱線事故時に軌道から大きく逸脱する場合、連結装置の状況が編成全体の挙動に影響を与え、条件によっては編成中間車車端部に大きな損傷が発生する可能性がある。そのため車体端部強度を検討・評価することは、乗客の生存空間確保の観点からも重要である。ここでは軽量ステンレス鋼製車体を対象に、数値解析により編成中間車連結妻部の車体端部強度を評価した。この結果を元に、現行のJIS規格の旅客車車体の設計標準に示される車端圧縮強度に関する規定と事故時の車体端部の破壊強度の関係を再評価し、その課題について考察した。

2. 現行車両の強度標準

日本国内向け車両の車体設計時に考慮すべき荷重条件および基準値は、JIS E 7106（鉄道車両—旅客車用構体—設計通則）¹⁾に規定される。荷重条件を以下に示す。

- (1) 上下荷重（垂直荷重）
- (2) 前後荷重（車端荷重）
- (3) ねじり荷重
- (4) 三点支持
- (5) 気密荷重

ここでは、編成車両の事故時の乗客の安全性を確保する観点から、最も関連が深い荷重条件と考えられる、前後荷重（車端荷重）を中心に検討を行った。

2.1 前後荷重に関する車体強度標準

前後荷重に対する強度は、車両連結時の衝撃や、走行中、編成内の連結車両からの衝動に対する耐久性等の観点から決められており、前後の車両から荷重が伝達される連結器部分に、所定の引張・圧縮荷重を負荷した際の応答を評価することとされている。JIS E 7106に規定される荷重値を表1に示す。これらの値は、主に連結器を介して伝えられる圧縮・引張荷重を想定しており、実際の編成車両における測定値や経験値から定められたものである^{2) 3)}。

表1 連結器部に作用させる前後荷重値

荷重方向	客車，新幹線電車 [kN]	電車，気動車 [kN]
圧縮	980	345～490
引張	490	345

* 車両構造技術研究部 車両強度研究室

特集：車両技術

2.2 現行の国内標準における課題

JIS E 7106 では、車端部の強度について、連結器部分に対する荷重負荷のみが規定されている。

この車端荷重について、連結器を介して伝えられる前後荷重は、引張、圧縮に関わらず、緩衝器、伴板、伴板守、車体台枠の中ばりへと伝達される。伴板守と車体台枠中ばりとの結合には、一般にリベット締結が用いられている（図1）。

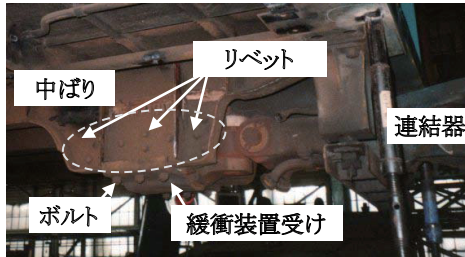


図1 車端部台枠の構造外観

JIS E 7106 における車端荷重値は、車体に当該荷重を負荷した際、有害な永久変形が生じないことを規定しており、いわゆるメカニカルヒューズや衝撃吸収構造のように、当該構造部位がその荷重値で必ず破断するという数値ではない。

過去の文献によると、伴板守の設計許容荷重値⁴⁾や、事故時の編成内車両同士の乗り上がりによる被害拡大を防止するため、積極的にリベットを破断させる設計思想について考察がなされた経緯⁵⁾が見られるが、これらの考え方について、現在、規定等では必ずしも定量的に明確になっていない。

また乗客・乗務員の生存空間確保に関連が深いと考えられる、車体上部に対する荷重負荷の条件について、定量的には明示されていない。

3. 数値解析による車体端部の強度評価

上述の通り、JIS E 7106 に規定される車端圧縮の荷重条件が、連結器による荷重負荷のみであり、特に衝突事

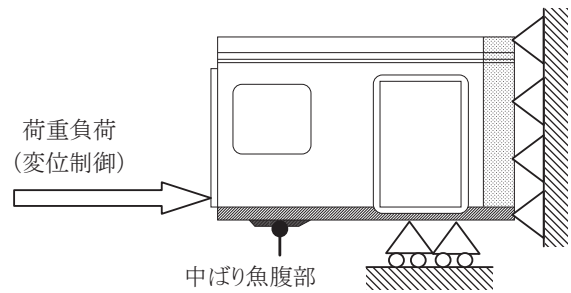


図2 解析モデルおよび拘束条件

故時の乗客・乗務員の生存空間確保に関連が深い、車体上部部位に圧縮荷重が負荷された時の車体変形挙動について、これまで評価事例は多くない。ここでは車端部への荷重負荷位置を変化させた場合の車体変形特性について、数値解析を用いて予測・評価を行った。

3.1 解析モデル

解析は、1980年代から製作されている、軽量ステンレス車体中間連結部の車端部（車端から概ね台枠まくらばりまで）を有限要素分割した詳細数値モデルを対象とし、汎用の陽解法有限要素プログラム PAMCRASH を用いて、その変形挙動を評価した。解析モデルの要素数は約43万で、溶接部の破断挙動を考慮している。解析の妥当性について、実車の車端部を用いた静的圧縮破壊試験結果との比較・検証により、解析精度を確認した解析モデル⁶⁾を使用した。

拘束条件について、車体中央寄りの切断面変位を完全拘束するとともに、車体台枠まくらばりの台車まくらばね支持位置について上下変位を拘束した（図2）。

荷重負荷形態は、JIS E 7106 に規定される構体荷重試験に準じ、準静的荷重条件を模擬、荷重負荷位置を図3および表2に示す車体各部位とした。

台枠伴板守と台枠中ばり間のリベット締結部について、破断挙動のモデル化は行っておらず、連結器位置への荷重負荷は、端台枠中ばりの魚腹部に対し直接圧縮および引張の荷重を負荷するものとした。

表2 数値解析における荷重条件

ケース	荷重条件	荷重負荷部材	荷重負荷高さ位置
1	連結器位置（圧縮）	中ばり魚腹部	連結器高さ
2	連結器位置（引張）	中ばり魚腹部	連結器高さ
3	台枠 端ばり中央部	端ばり	台枠高さ
4	台枠直上貫通路位置	貫通路柱、幌座	台枠上面高さ
5	台枠 端ばり・側ばり結合部	端ばり、側ばり	台枠高さ
6	台枠直上 側・妻結合位置	隅柱	台枠上面高さ
7	屋根・側・妻結合位置	隅柱、軒桁	軒桁高さ

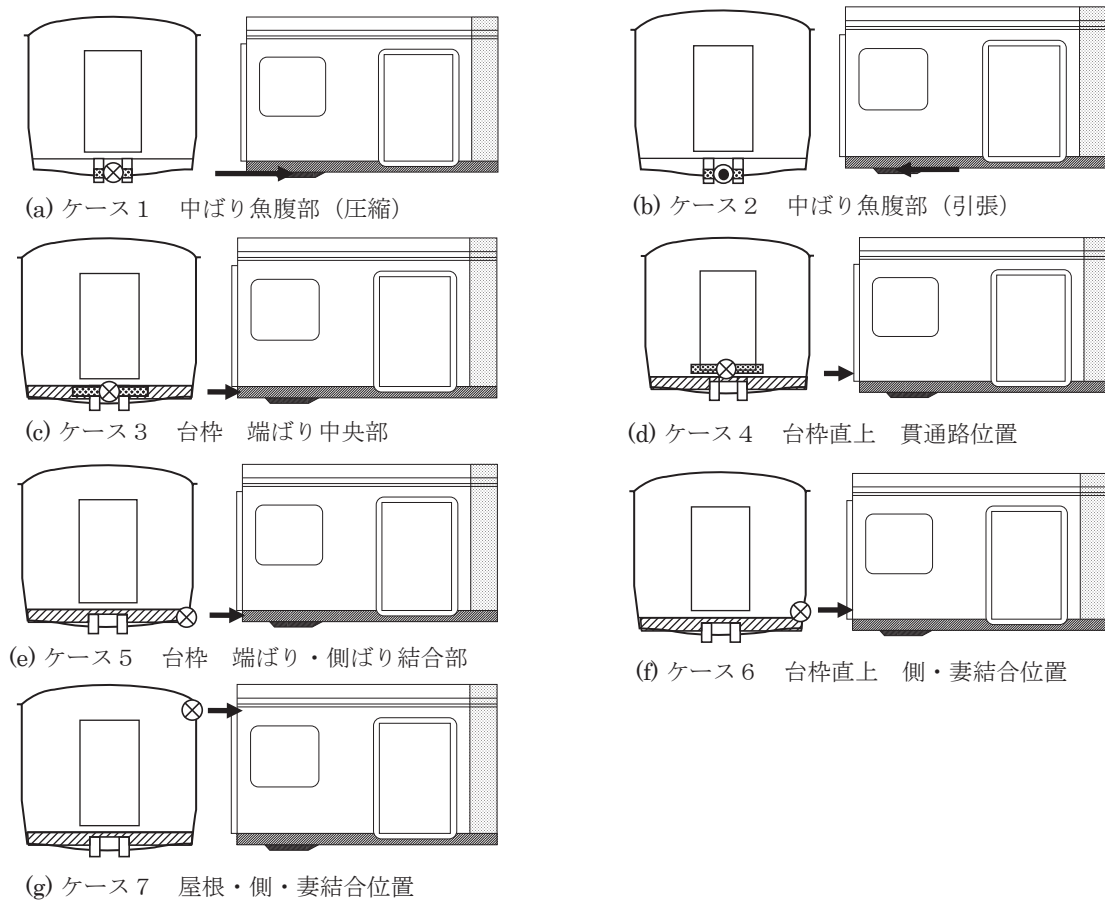


図3 各解析ケースの荷重負荷位置

3.2 解析結果

車体変形特性として、車体反力と変形量（負荷点における荷重負荷方向の変位量）関係、車体の変形モードを評価した。各ケースに対する荷重－変形量特性および主な変形モードの解析結果を図4に示す。

図4に示される巨視的な荷重－変形量関係において、変形初期の線形性を示す領域から塑性変形による非線形性を示す領域に遷移した点での荷重値を降伏荷重とした。各解析ケースにおける降伏荷重および最大荷重の解析結果を一覧として表3に示す。

3.3 数値解析のまとめ

当該車両が JIS E 7106 の規定に従うとすると、連結器位置への荷重負荷に関する設計荷重は、圧縮 490kN、引張 345kN であるが（表1）、数値解析による評価では、引張、圧縮いずれも降伏荷重は約 1000kN となり、規定値に対して圧縮負荷で約 2 倍、引張負荷で約 3 倍の強度があると評価される。

台枠端ばりへの荷重負荷では、中央部への荷重負荷の場合（ケース3）、まず幌座に荷重が負荷されるため、降伏荷重は 300kN 程度と低下するものの、端ばり側ばり結合部への荷重負荷のケース5を含め、変形進行時に

は概ね 400～600kN の荷重で推移した。

一方、車体台枠より上方、車体上回りに荷重が負荷された場合（ケース6、7）、台枠に対する荷重負荷時と比較して、低い荷重で変形が推移した。特に側構、妻構の結合部に相当する隅柱部分に対し、台枠直上および屋根構との結合部に荷重を負荷した際、相対的に低い荷重で変形が進行した。

4. 事故時の車体挙動の検討

万一の事故時の編成挙動について、編成内車両間で上下座屈が発生した場合、連結された隣接車両同士で、相対的に強度の高い台枠が、連結された車両の車体の上方に衝撃する、いわゆる「乗り上がり」と呼ばれるような、乗客空間に重大な影響を与える現象が発生する可能性が高くなる（図5）。乗り上がり防止のためには、事故時に連結器を介し著大な力が作用した場合に、連結装置もしくは車端部台枠の変形を制御することにより、連結器を積極的に脱落させ、上下座屈を抑制し、隣接車両の台枠端ハリ同士を接触させて、確実に荷重を伝達させることが考えられる。また万一乗り上がりが発生した際、乗客空間の変形抑制のために、車体上部の強度向上が方策

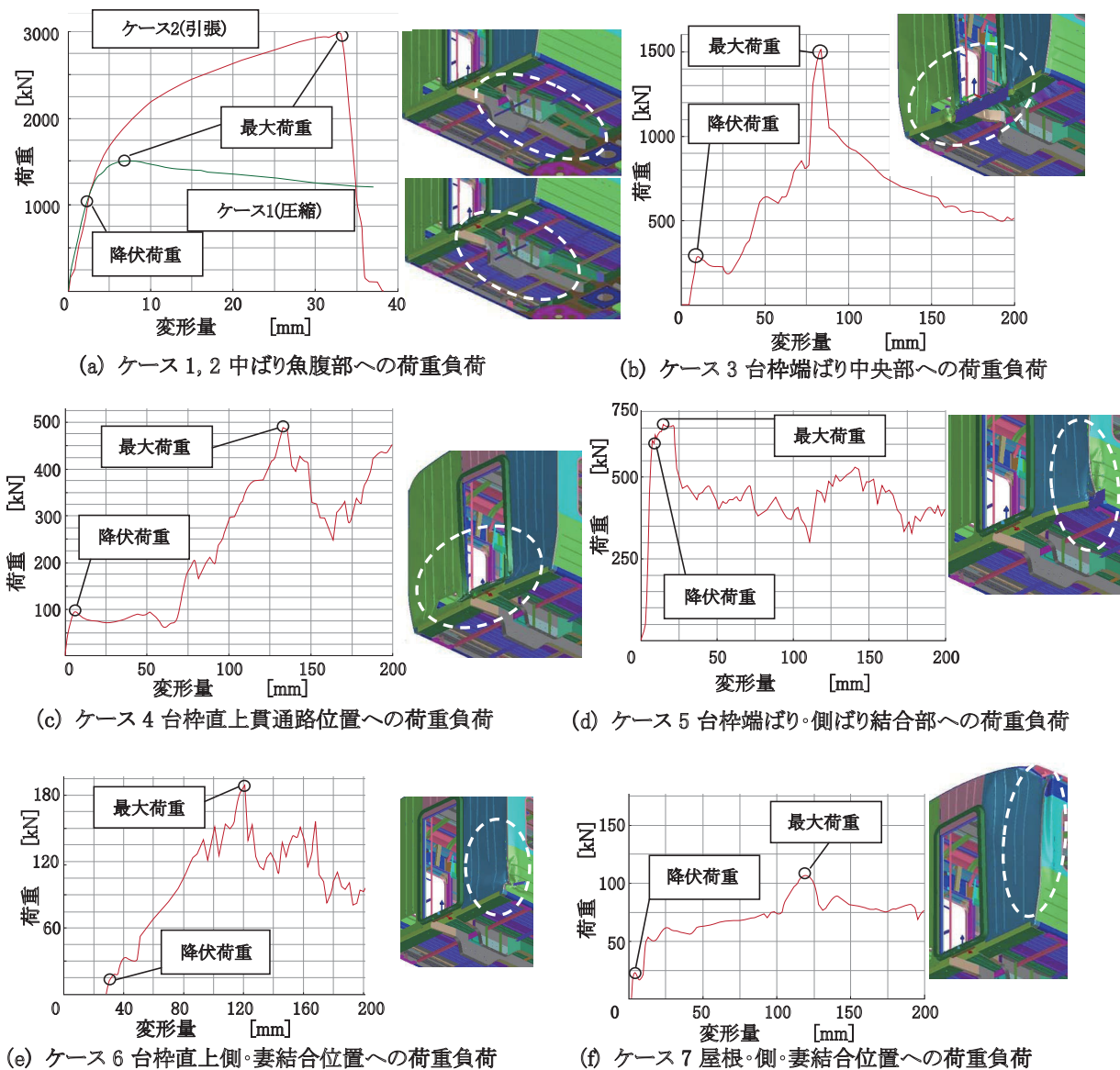


図4 解析結果（荷重 - 変形量関係、主要変形図）

表3 数値解析結果による荷重値一覧

ケース	荷重条件	荷重値	
		降伏荷重 [kN]	最大荷重 [kN]
1	連結器位置（圧縮）	約 1000	約 1500
2	連結器位置（引張）	約 1000	約 3000
3	台枠 端ばり中央部	約 300	約 1500
4	台枠直上貫通路位置	約 80	約 490
5	台枠 端ばり・側ばり結合部	約 600	約 650
6	台枠直上 側・妻結合位置	約 15	約 190
7	屋根・側・妻結合位置	約 20	約 110

として考えられる。

また隣接線走行中の対向列車が何らかの理由により脱線、大きく逸脱した場合、車両の側面同士が擦れ合い、車端部の妻構同士が衝撃することが想定される。この際、車両の脱線により、衝突する車体同士の高さに違いが発

生し、一方の車両の端台枠が他方の車両の妻構の台枠上面以上の位置に衝撃する可能性がある（図6）。対策として、隅柱部を中心に、車体端台枠、妻構、側構の結合部の強度向上が考えられる。

また編成車両が脱線した際、万一大きく線路から逸脱

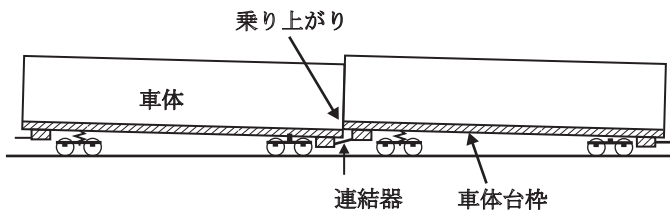


図5 乗り上がり発生時の編成車両の状況

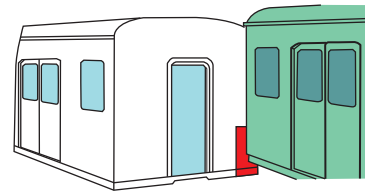


図6 対向列車との妻構同士の衝突状況



図7 編成車両の脱線逸脱時の状況例

した場合には、連結された編成内の隣接車両が、連結装置を介して引張力を受け、逸脱方向に誘導されることが考えられる。この際、車両間の相対角度が大きい場合、当該連結器の引張力と同程度の力が連結部の車端部分の隅柱を中心とした部分に作用することが予測され(図7)、これにより車端部の乗客生存空間を脅かすことがないよう、強度バランス等を考慮する必要があると考えられる。

5. 車体強度上の検討課題

5.1 車体設計の方向性

本数値解析による評価から、JIS E 7106 の車端荷重の規定に従い設計された車両の例で、台枠中ばりに直接荷重が負荷される場合、荷重の規定値に対し、破壊荷重は2～3倍になる可能性が示された。

一方、連結装置を構成する各 부품の破壊荷重や、リベット結合部の破断荷重について規定が明確でなく、隅柱、貫通路柱等、車体台枠より上方の強度規定とあわせて、今後、設計の方向性として明確化することが考えられる。

隅柱を中心とした側構と妻構および屋根との結合部位に着目し、構体を強化することは、隣接線走行車両の側面同士が衝撃する際にも、車端部の生存空間確保に有効と考えられる。

乗り上がり・列車座屈の抑制や、乗客・乗務員が乗車する可能性が低い領域における積極的な衝突エネルギーの吸収を念頭に、構造が必ず破断、破損するようなメカニカルヒューズに相当する設計荷重値の導入・明確化を図る必要があると考えられる。

このような、編成車両の事故時の挙動と車体強度の関係は、鋼製車両の導入以来、事故損傷状況調査時等^{7) 8)}で検討がされてきた経緯があるものの、現在、必ずしも広く認識されているものではない。

5.2 海外規格の動向

欧州、米国では、連結装置部分に対する圧縮強度だけでなく、(例えば欧州 EN12663, EN15227, 米国 FRA 49CFR238 等で) 日本では現在定量的な規定がない車体上部の強度についても規定される。欧州基準では、衝突安全を実現するための車体構造について、特に連結器強度、エネルギー吸収構造の破壊強度、乗客・乗務員のための生存空間の強度についての関係・考え方が示されている。信頼性の高い信号システム等、事故を起こさない対策が重視される日本国内とは事情が異なるため、必ずしも直接比較する必要はないが、万一の事故時を想定した際、必要な車体強度の設計項目の参考事例として参照することができる。

6. まとめ

編成車両の衝突や脱線後の挙動を想定し、現行の JIS 規格の旅客車車体の設計標準に示される車端圧縮強度に関する規定と車体端部の破壊強度の関係を数値シミュレーションにより評価した。その結果、JIS E 7106 の規定に従い設計された車両の例で、台枠中ばりに直接荷重が負荷される場合、荷重の規定値に対し、破壊荷重は2～3倍である一方、車体台枠より上方、車体上回りに荷重が負荷された場合、台枠への荷重負荷時と比較して、低い荷重で変形が推移した。

今後、鉄道車両のさらなる安全性向上のため、隅柱、貫通路柱等、車体台枠より上方の部位について一定以上の強度とするとともに、連結装置・車端部台枠・車体上部の部位について、強度バランスを考慮した設計の必要性を明確化することが考えられる。

文 献

- 1) JIS E 7106 “鉄道車両－旅客車用構体－設計通則”，日本規格協会，2006
- 2) 小坂狷二，客貨車工学(上巻)，社団法人日本機械学会，p.82，1948
- 3) 高速鉄道の研究，鉄道技術研究所，財団法人研友社，p.306，1967
- 4) 河邑厚男，客貨車の構造及び理論，交友社，p.231，1952
- 5) 小坂狷二，客貨車工学(下巻)，社団法人日本機械学会，p.630，1950
- 6) Okino, T. and Ujita, Y., “Light Weight Stainless Steel Car-body Structure and Crash Behavior of Train Collision Accidents,” presented at the “6th International Symposium Passive Safety of Rail Vehicles” , Berlin, Germany, December 4-5, 2006, pp.115-133 ,IFV-Bahntechnik.
- 7) 鈴木貞，“大事故と鋼製客車”，鉄道業務研究資料，Vol.17, No.10, 1929
- 8) 三木忠直，他2名，“事故から見た客車・電車構造の設計資料(1)”，鉄道業務研究資料，Vol.7, No.4, pp.4-10, 1950