

内部骨組のリング化による車体側面強度向上効果

沖野 友洋* 宇治田 寧*

Improved Effect of Carbody Side Strength by Ring Structure Composed of Inner Sub-Frames

Tomohiro OKINO Yasushi UJITA

When a railway vehicle overturns in accidents, the shape of cross section of the carbody is likely to be transformed to the parallelogram by the side impact. In the case, the survival space for passengers and crews will be reducible by the deformation. To secure the survival space, the “ring structure” is as composed by uniting sub-frames attached inside the carbody as non-structural members together. The authors performed empirical tests and FE analyses to verify the possibility of improving the carbody strength against the load from the body side.

キーワード：車体強度，内部骨組，側面荷重，強度試験，数値解析

1. はじめに

鉄道の安全策として、事故を発生させないようにすることを旨とした取り組みが行われているが、万一の事故時に乗客・乗員の被害を軽減する方策は安全性向上のために重要である。強風等による自然災害や脱線事故等によって車体が横転すること、また、踏切における自動車との衝突事故によって、車体の側面から衝撃が加わり、車体の断面形状が平行四辺形状に変形し、乗客・乗員の生存空間が減少する可能性が考えられる。

一方、瀧上らは従来強度部材として考慮されていなかった内部骨組などの非構造部材を活用し、構体の構造を現状から大きく変更することなく、車体剛性の向上をめざした検討を行い、天井・戸袋・床部の内部骨組に補強材を取り付けてリング化する（以下、インナーリングと呼ぶ）ことで相当曲げ剛性が向上することを確認した¹⁾。本手法は車体側面からの荷重負荷によって車体の断面形状が平行四辺形状に変形する変形モードに対して、強度向上の効果が期待できる。

そこで、本報告では、「インナーリング」を採用することによる、車体側面からの荷重負荷に対する車体の強度向上の効果について検証する。

2. 強度試験

鉄道車両の側面からの衝撃に対する安全性基準は国内、欧州にはなく、米国において、静的な荷重条件での車体構造基準があるのみである²⁾。この基準は、1車体を対象としたものであるため、大規模な試験となるこ

と、また、大変形を想定した試験条件ではないことから、本報告では、比較的小規模な実験設備での検証試験を想定し、実物大部分試験体による強度試験方法をFEM解析で検討した後に、強度試験を実施した。

2.1 FEM解析による検討

1980年代以降に量産された標準的なステンレス鋼製拡幅車両（以下、ステンレス鋼製拡幅車両と呼ぶ）の戸袋部近傍を対象として、図1に示すような数値解析モデルを作成した。

本モデルは、インナーリングを採用した構造となっており、外部構体は従来の構体構造と同一で、天井・戸袋の内部骨組を強化し、これらの部材を補強材によってリング化している（詳細は後述する）。

使用した解析モデルは要素ピッチ25mmを基本とし、主にシェル要素で構成した。節点数は約12万点、要素数は約10万である。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。

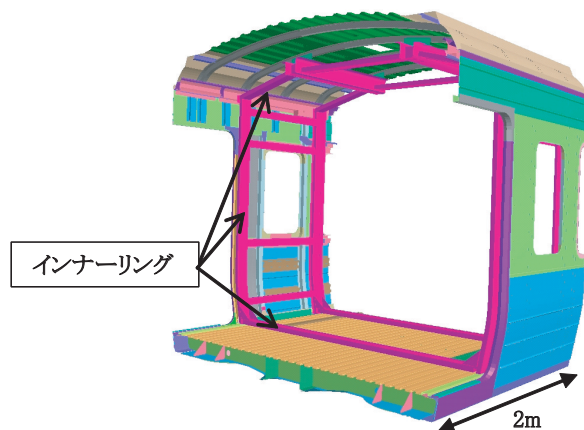


図1 数値解析モデル

* 車両構造技術研究部（車両強度）

特集：車両技術

FEM解析による検討の結果、強度試験方法としては、図2に示すように、試験体の側ばり下部を拘束し、試験体の断面が平行四辺形状に変形するように、車体側面の幕板部近傍に幅200mmのはりを準静的に平行移動させて押し当てることにした。

本荷重条件により数値解析を実施した結果、図3に示すように、戸袋内柱下部の床根太および床波板に座屈が発生した。これにより、戸袋内柱は曲げモーメントに対して反力が得られず、戸袋内柱の強度向上の効果が十分反映されないことが分かった。そこで、さらなる車体全体の強度向上のために、インナーリングに加えて、図4

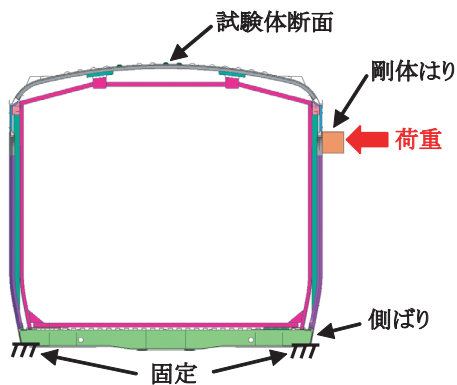


図2 試験条件

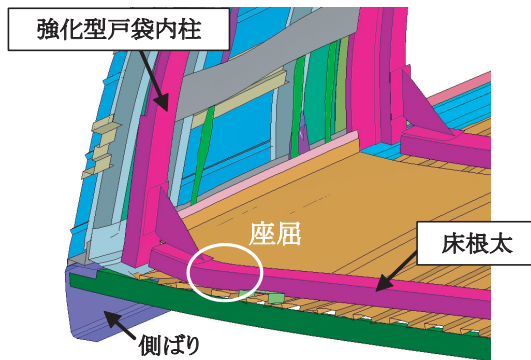


図3 FEM解析結果

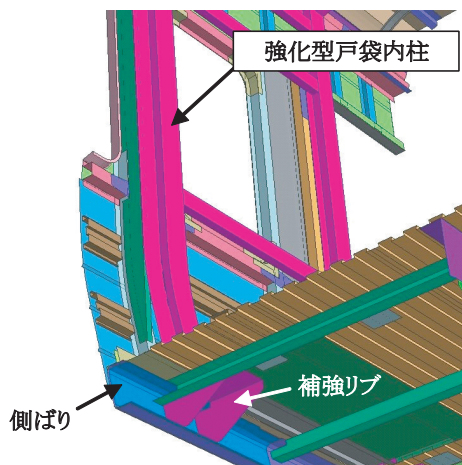


図4 補強リブ

に示すように、側ばり内部に補強リブを追加することにした。これにより、戸袋内柱は曲げ変形に対して反力が得られることになった。

2.2 試験体

ステンレス鋼製拡幅車両の戸袋部近傍を対象として、図5に示すように、従来の内部骨組を含む実物大部分試験体（以下、従来構造試験体と呼ぶ）、および図6に示すように、従来構造試験体に対し、外部構体は同一で、強化型蛍光灯受・強化型幕板受・強化型戸袋内柱に取り替え、これらの部材を天井骨組補強・床根太・つなぎ金によってリング状に結合したインナーリングとし、戸袋内柱下部の側ばりに補強リブを追加した実物大部分試験体（以下、インナーリング試験体と呼ぶ）の2種類の試験体を製作した。インナーリング試験体について、従来構造試験体に対し、強化もしくは追加した各部材の内容を表1に示す。試験体の外形は長さ約2000mm×幅約3000mm×高さ約3000mmである。なお、試験体端部に設けられ



図5 従来構造試験体

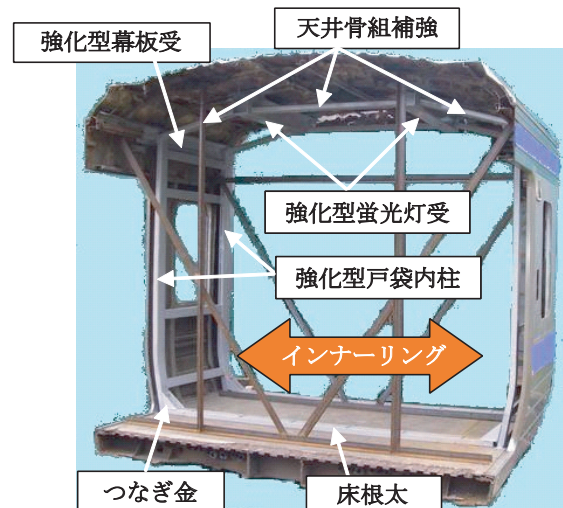


図6 インナーリング試験体

表1 インナーリング試験体の各部材

項目	内容 (従来構造試験体と比較)
蛍光灯受	・軽量穴廃止 ・板厚増 3.2mm → 4.5mm
幕板受	・板厚増 2.3mm → 4.5mm
戸袋内柱	・戸先側内柱板厚増 2mm → 4.5mm ・戸尻側内柱追加 (板厚 4.5mm)
天井骨組補強	・蛍光灯受間および蛍光灯受-幕板受間に角断面部材追加 (板厚 4.2mm)
床根太	・床波板上に角断面部材追加
つなぎ金	・床根太-戸袋内柱間に追加 (板厚 4.5mm)
補強リブ	・側ばりにリブを追加 (板厚 4.5mm)



図8 最大押込み時の変形状 (インナーリング試験体)

た筋交いは試験体移動時等における試験体保護を目的としたもので、試験装置に試験体を設置した後、撤去した。

2.3 試験方法

強度試験の状況を図7に示す。試験体を側ばり下部で拘束し、試験体の断面が平行四辺形状に変形するように、車体側面の幕板部近傍に押し当てた幅 200mm の剛体はりを油圧ジャッキにて準静的に平行移動させた。油圧ジャッキの移動速度は5mm/minであり、ジャッキに取付けたロードセルにより荷重を、剛体はりに取付けた巻込式変位計で剛体はりの移動量を計測した。以後、変位計で計測された剛体はりの移動量を試験体の変形量と定義する。

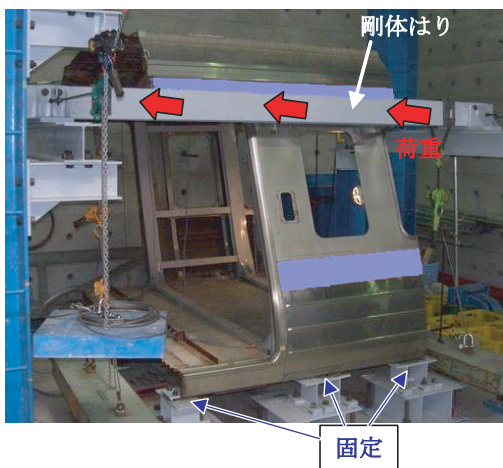


図7 準静的強度試験

2.4 試験結果

インナーリング試験体の最大押込み時 (約800mm) における試験体の変形状況を図8に、各試験体における荷重-変形量関係をFEM解析結果とあわせて図9に示す。いずれの試験体も、図8のように車体断面が平行四辺形状に変形した。

荷重-変形量の関係について、いずれの試験体もはじ

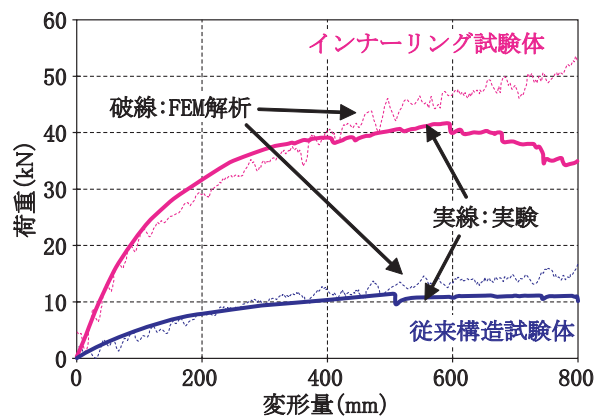


図9 荷重-変形量特性

めは荷重の増加率が徐々に低下し、変形量 400mm 程度で従来構造試験体は約 10kN、インナーリング試験体は約 40kN で荷重がほぼ一定となり、インナーリング試験体については、約 700mm から荷重が徐々に低下した。

3. 考察

図9に示した、実験結果における荷重-変形量の関係から、吸収エネルギー-変形量の関係およびエネルギー比 = E_i (インナーリング試験体の吸収エネルギー) / E_n (従来構造試験体の吸収エネルギー) を求めた結果を図10に示す。ここで、弾性エネルギーは十分小さいため、吸収エネルギーは荷重-変形量関係の積分値とした。

鉄道車体の衝突安全性を検討するとき、車体の変形量または吸収エネルギーを基準とすることが考えられる。前者は許容できる車体変形量 (クラッシュアブルゾーン) を設定し、設定した変形量までに吸収できるエネルギー量を評価する方法であり、後者は衝突条件を設定し、設定した衝突条件での運動エネルギーを吸収するために必要な車体変形量を評価する方法である。

図10より、前者の観点で評価すると、変形量に対するエネルギー比 (E_i/E_n) に着目すれば良く、インナーリング

特集：車両技術

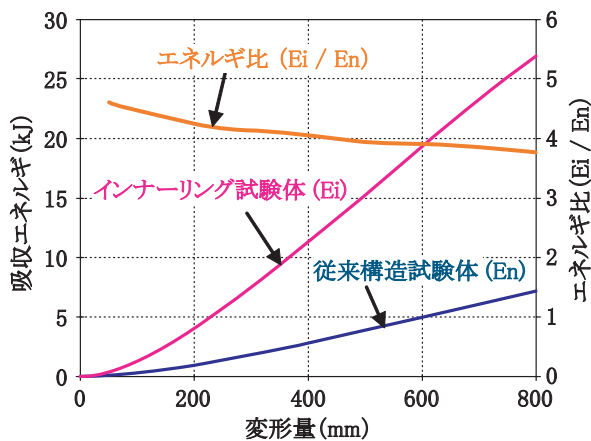


図10 変形量に対する吸収エネルギーおよびエネルギー比の関係 (実験結果)

を採用することにより、4倍程度エネルギー吸収量が増加することが分かる。また、後者の観点では、例えば5kJの運動エネルギーを吸収する場合、従来構造試験体では車体の変形量は約600mmとなるのに対し、インナーリング試験体では約230mmとなり、変形量が約38%に減少することが分かる。

以上のことから、車両の横転事故等において、車体の断面形状が平行四辺形状に変形する変形モードが発生した場合、インナーリングを採用することにより、従来構造と比較して車体変形を低減する効果が期待できる。しかしながら、吸収できるエネルギー量は図10のように数十kJ程度であり、事故状況によっては、吸収すべきエネルギー量が不十分となる場合もある。

図9より、FEM解析結果については、計算時間短縮の都合上、剛体はりの移動速度を250mm/sとして計算したために、荷重-変形量曲線が振動していること、インナーリングの溶接部破断やボルト破断を考慮していないために荷重の低下が見られないことを除いて、ほぼ実験結果を再現できている。よって、本報告で実施したFEM解析手法は車体の強度評価に有効であり、インナーリング各部材の影響度の検討や部材の仕様を変更した際の強度評価に利用できるものと考えられる。

4. まとめ

本報告では、鉄道における万一の横転事故や踏切事故等において、車体の側面から衝撃が加わり、車体の断面形状が平行四辺形状に変形した場合の乗客・乗員の被害

を軽減する方策として、車体構造を現状から大きく変更することなく、従来は強度部材として考慮されていない内部骨組などの非構造部材を活用してインナーリングを構成することを検討した。

標準的なステンレス鋼製広幅車両の戸袋部近傍を対象とした実物大部分試験体を用いた準静的強度試験および強度試験と同様の条件でFEM解析を実施した。解析結果は強度試験結果とよく一致し、インナーリングを採用することにより、従来構造と比較して、車体側面からの荷重負荷に対する車体強度が向上すること、同一の運動エネルギーを吸収する場合、車体の変形量が低減することを確認した。

以上のことから、車両の横転事故等において、車体の断面形状が平行四辺形状に変形する変形モードが発生した場合、インナーリングを採用することにより、従来構造と比較して車体変形を低減する効果が期待できる。

今後は、数値解析モデルを1車体に拡張することにより、1車体におけるインナーリングの有効性の検証や戸袋部以外の部位に局所的な荷重がかかった時など様々な荷重条件での検証を行う必要がある。また、今回は準静的な荷重条件であったが、動的な荷重条件での検証を行う必要がある。さらに、インナーリングについては、剛性向上に着目した軽量化と実用性向上の検討が行われているが^{3)~5)}、本報告で検証した強度向上とのバランスについて、具体的な要求を設定した検討が必要になると考えられる。

文献

- 1) 瀧上唯夫, 富岡隆弘, 相田健一郎: 非構造部材を活用した車体剛性向上手法, 鉄道総研報告, 第22巻 第4号, pp11-16, 2008
- 2) APTA SS-C&S-034-99, Rev.1
- 3) 瀧上唯夫, 富岡隆弘, 相田健一郎: 天井内部骨組による車体剛性向上手法の検討, J-Rail2008講演論文集, pp81-84, 2008
- 4) 谷口宏次, 市川聡, 富岡隆弘, 瀧上唯夫, 相田健一郎: 吊手棒を活用した車体剛性向上手法, J-Rail2008講演論文集, pp77-80, 2008
- 5) 瀧上唯夫, 富岡隆弘, 相田健一郎: 内部骨組を活用した鉄道車両の車体剛性向上手法の検討 (補強部材の軽量化による実用性の向上), D&D2009講演論文集 (CD-ROM) 講演番号 565, 2009