

吊手棒を活用した車体剛性向上手法

○[機]谷口 宏次 市川 聡 (東急車輛製造株式会社)

[機] 富岡 隆弘 [機]瀧上 唯夫 [機]相田 健一郎 (鉄道総合技術研究所)

Improving Rigidity of Railway Vehicle Carbody by rails for hand strap

○Koji Taniguchi, Satoshi Ichikawa, (Tokyu Car Corporation)

Takahiro Tomioka, Tadao Takigami, Ken-ichiro Aida, (Railway Technical Research Institute)

It is studied how non-structural members in the carbody influence on the rigidity and the vibration characteristics of carbody in "Rigidity Test Car", which is based on the Stainless steel carbody for commuter railway vehicle. The result has shown that the "Ring profile" reinforcement improved the rigidity of carbody, especially, the reinforcement around the roof structure largely effected to the improvement. From this result, the rail for hand strap, which is located around passenger door in existing commuter railway vehicle, could be considered as an alternative of the reinforcement. The door pillars in both sides of carbody were connected directly by extending the rail to lateral direction and its influences were studied. The result has shown that the rigidity was improved with a few amount of mass increase.

キーワード：車体剛性，曲げ振動，内部骨組，固有振動モード，軽量車両

Key Words：Rigidity of carbody, Bending Vibration, Inner frame, Natural mode of vibration, Light-Weight Vehicle

1. はじめに

鉄道では，乗客の快適性向上に対する要求が年々強くなっており，新幹線といった優等列車だけでなく，在来線通勤車両に対しても振動乗り心地，騒音など快適性への関心が高まっている．また，高速化，省エネルギー化のための車両軽量化やそれに伴う車体構造の変化により，車体の上下曲げ振動が注目されるようになってきた．

このような要望を受け鉄道総研では，車体の曲げ振動低減に向けた取り組みを実施しており，現状の浮上式鉄道車両や新幹線車両，在来線通勤車両などについて，固有振動モードなど振動特性を測定（一部，東急車輛でも実施）してきた．その結果，在来線通勤車両の主流のひとつであるステンレス鋼製の軽量車両は，車体を構成する床，屋根，側の各面が独立して振動する傾向にあり，これまでのように“一本のはり”として表現できないことが分かった¹⁾²⁾．

そこで，鉄道総研と東急車輛は，非構造部材である内部骨組を活用し，現状の構体構造を大きく変更することなく車体の剛性向上を図る方法について検討することとした．ここでは，その一環として製作した“剛性試験車体”を紹介し，その試験車体による加振試験で得られた結果について，特に吊手棒を活用した剛性向上策を中心に述べる．

2. 剛性試験車体の成果

2.1 剛性試験車体の概要

剛性試験車体の外部構体は，営業車両として活躍してい

るステンレス鋼製軽量車両（以下，ベース車両と呼ぶ）の設計を基本的にそのまま利用した．一方で，主に内装品を設置するため車内に取り付ける，内部骨組など非構造部材を積極的に利用して，剛性向上をはかることをコンセプトとして設計・製作した．

現在，ステンレス鋼製軽量車両の仕様は，強度，製造設備，納期，コストなどから，標準化されつつある．したがって，主として強度を担う外部構体は，多大な労力やコストを掛けなければ構造を変更することができない．

そこで，剛性試験車体では，上記のコンセプトをもとに車内に取り付けられる内部骨組に関して，天井骨組補強の追加，戸袋内柱の強化，床根太の追加，後述するリング化構造の追加など，さまざまな剛性向上策を適用した．

2.2 これまで剛性試験車体から得られた知見

剛性試験車体で試験を実施した車体条件のうち，代表的な条件を図1に整理する．

剛性試験車体では，車内に取り付けられる内部骨組に関連して溶接組みの「蛍光灯受」及び「幕板受」について，軽量穴の廃止，後述するリング化構造部の板厚増加などの方策で，主に長手方向の剛性を向上させた．さらに，リング化構造と称して，車体周方向の補強（強化型戸袋内柱，天井骨組補強，床根太）を，設定替え可能となるようにボルト固定し，戸袋部に合わせて車体長手方向の同一断面に取り付けた．そして，構体のみの状態から補強を全て取り付けたリング化構造の状態までのさまざまな条件で，構

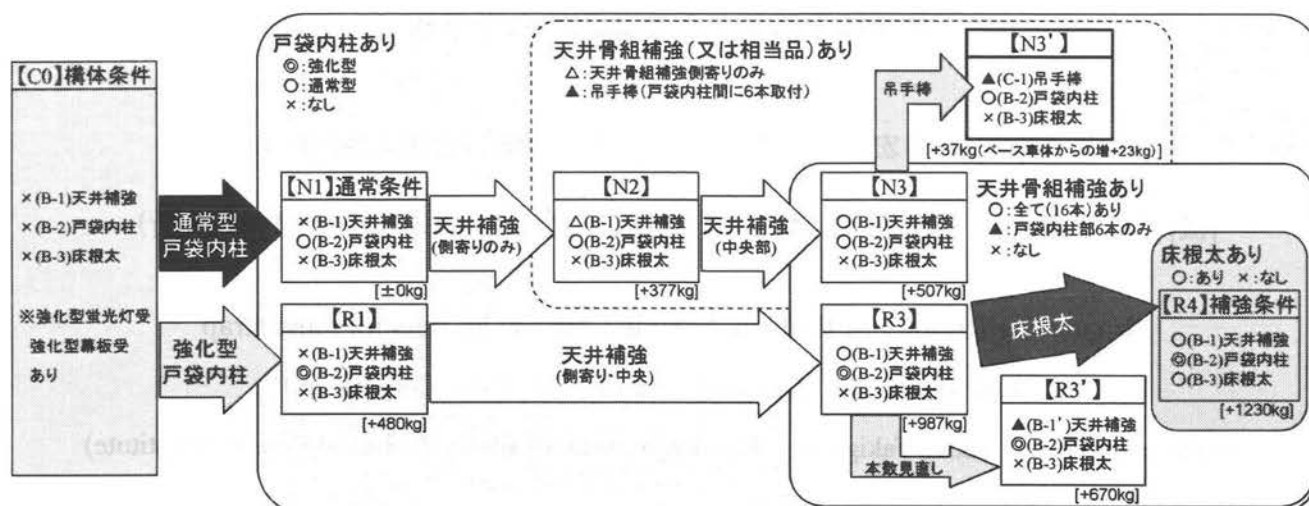


図1 試験時の車体条件整理

体荷重試験、車両試験台加振試験を実施し、車体剛性の評価を行った。その結果、同一断面上において、内部骨組を補強、追加することで車体の剛性や振動特性が大きく変化することが確認できた³⁾。以下に得られた知見をまとめる。

- 戸袋部のリング化構造により、車体各面が独立して変形する振動が抑制され、20Hz以下の周波数帯域で車体全体が「はり」として振動する傾向に近づく。
- 実軌道模擬加振試験では、内部骨組補強により、PSDのピーク数が減少し、乗り心地が向上する傾向が見られた。
- 戸袋内柱の強化、天井骨組補強の追加、床根太の追加のそれぞれの効果を比べると、比較的天井骨組補強の追加の効果が大きい。
- 天井骨組補強は、側寄りのみでは振動特性の変化が小さく、まくらぎ方向全幅に渡すことで効果を発揮する。
- 今回適用した補強部材は質量増加が比較的大きく、剛性向上効果を維持しながら軽量化、低重心化をはかるなど、より実用性を考慮した検討が必要である。

3. 吊手棒への着目

これまでの剛性試験車体での試験により得られた知見により、天井骨組を補強することで、効果的に車体剛性が向上することが分かった。また、さらに戸袋部にリング化構

造を構成すると、車体剛性も向上するが、質量もベース車両に対し、約1.2ton増加することが確認されている。

高速化、省エネルギー化のため質量軽減がはかられている現状を考慮すると、乗り心地向上のため大幅に質量を増やすことは考えにくい。そこで、天井骨組補強(天井近辺の補強)の効果が大きいこと、ベース車両を始め多くの在来線通勤車両でまくらぎ方向の吊手棒が戸袋内柱付近に存在すること、に着目し、吊手棒をまくらぎ方向全幅に延長して戸袋内柱と結合する車体剛性向上手法を提案した。

図2に吊手棒の取付状況を示す。図2にあるように、吊手棒は、側出入口の左右の戸袋内柱を渡すようにして、両車端を除く6箇所に設置(図3参照)した。

この吊手棒の追加による質量増加は37kg程度である。さらに、ベース車両の内装品としてすでに存在する吊手棒の質量を引き、実質的な質量増加分を換算すると23kgとわずかである。

4. 車両試験台加振試験

4.1 試験条件

試験は、車両試験台による台車加振とした。車両試験台は、走行を模擬する装置で、供試車両の車輪を軌条輪と呼



図2 吊手棒取付状況

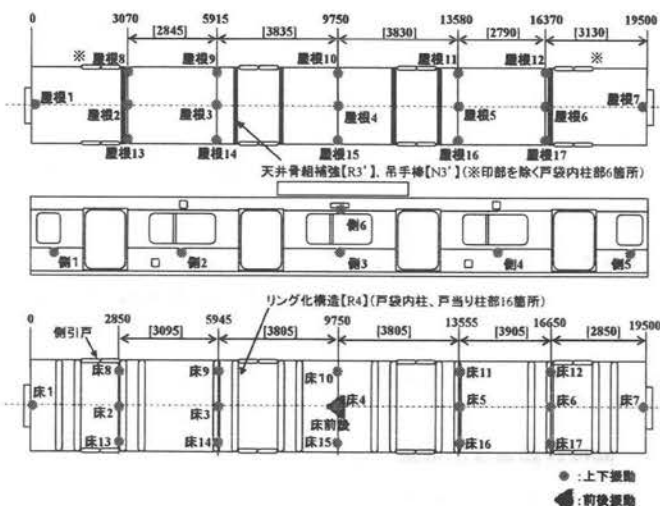


図3 天井骨組補強、吊手棒の配置と車体振動測定点

ばれる装置の上に設置し、軌条輪が上下・左右に変位することにより、車両を加振する装置である。

加振条件は、左右それぞれの車輪に3~30Hzのほぼ平坦な周波数特性を持つ無相関のランダム波として上下に加振するバンドランダム加振とした。車体の振動は、図3に示す床、側、屋根の測定点に貼付した加速度ピックアップにより計測した。

4.2 車体条件

剛性試験車体では、図1に示すように、それぞれの補強部材の影響を把握するためさまざまな車体条件で試験を実施している。ここでは、吊手棒による車体剛性向上効果に着目し、【N1】、【N3'】、【R3'】を取り上げる。

また、図1の○は各補強部材が取付状態であることを、また×は非取付状態であることを示す。ただし、戸袋内柱パネルは○が通常型、◎が強化型を表し、天井骨組補強は○が全数、△は側寄り（蛍光灯受・幕板間）のみ、▲は本数を減らして（図3参照）取付けた状態である。

【C0】構体条件は通常実施される構体荷重試験における条件となる。【N1】通常条件はベース車両相当（ベース車両と同等な内部骨組の状態）であり、【N3'】吊手棒条件は【N1】に対して吊手棒6本で左右の戸袋内柱を結合した状態である。また、【R3'】部分補強条件は【C0】に対して強化型戸袋内柱を取付け、さらに天井骨組補強を6箇所設置した状態である。

4.3 振動モード解析

前述したように【N1】、【N3'】、【R3'】の各車体条件に対して、振動モード解析を実施し、車体のモード特性を同定した結果を図4に示す。紙面の都合上、図4では、【N3'】吊手棒条件のみを掲載した。また、【C0】構体条件を含めて固有振動数の変化をまとめた結果を表1に示す。

Z-10などの記号は振動形状の特徴を表したもので、最初の文字はSが屋根と床が車体中央部で同位相(方向)、Aは逆位相、Zは判別が難しいことを示し、その後の2桁の数字は、10の位が屋根、1の位が床の腹の数を表す。また、Jは車体断面にせん断変形を生じるモードであり、J-1は車体中央断面がひし形に変形するモード、J-2はねじりモードである。これらのモードは、屋根と床の腹の数が常に同一であったため、数字は一桁とした。なお、図4では記号の後に各モードの固有振動数を記載し、表1では【R3'】のZ-21モードと【N1】、【N3'】のZ-20モードなど記号が異なっ

表1 各車体条件の固有振動数比較 (単位: Hz)

記号	車体条件			
	【C0】	【N1】	【R3'】	【N3'】
Z-10/(S-11)	6.96	8.49	10.75	10.01
Z-20/(Z-21)	9.02	10.66	(14.90)	12.90
Z-30/(S-31)	10.63	11.89	(14.94)	13.55
A-31/(A-33)	(14.19)	15.60	16.07	15.83
J-1	8.28	8.43	8.70	8.45
J-2	14.89	14.07	14.39	14.70

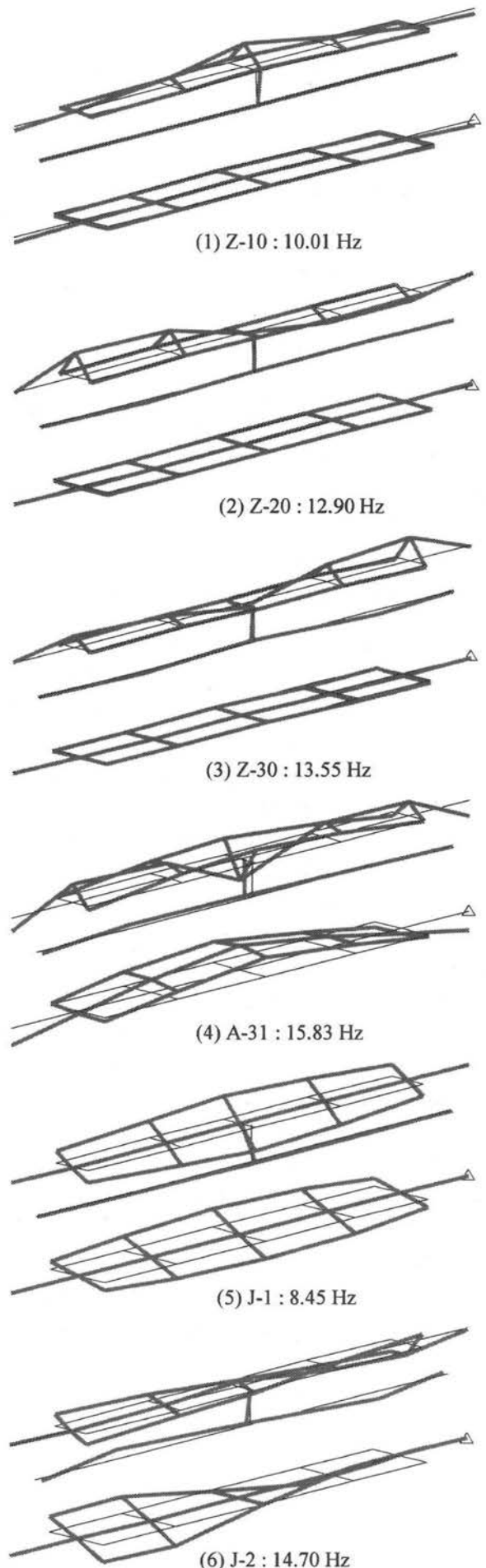


図4 【N3'】吊手棒条件の固有振動モード

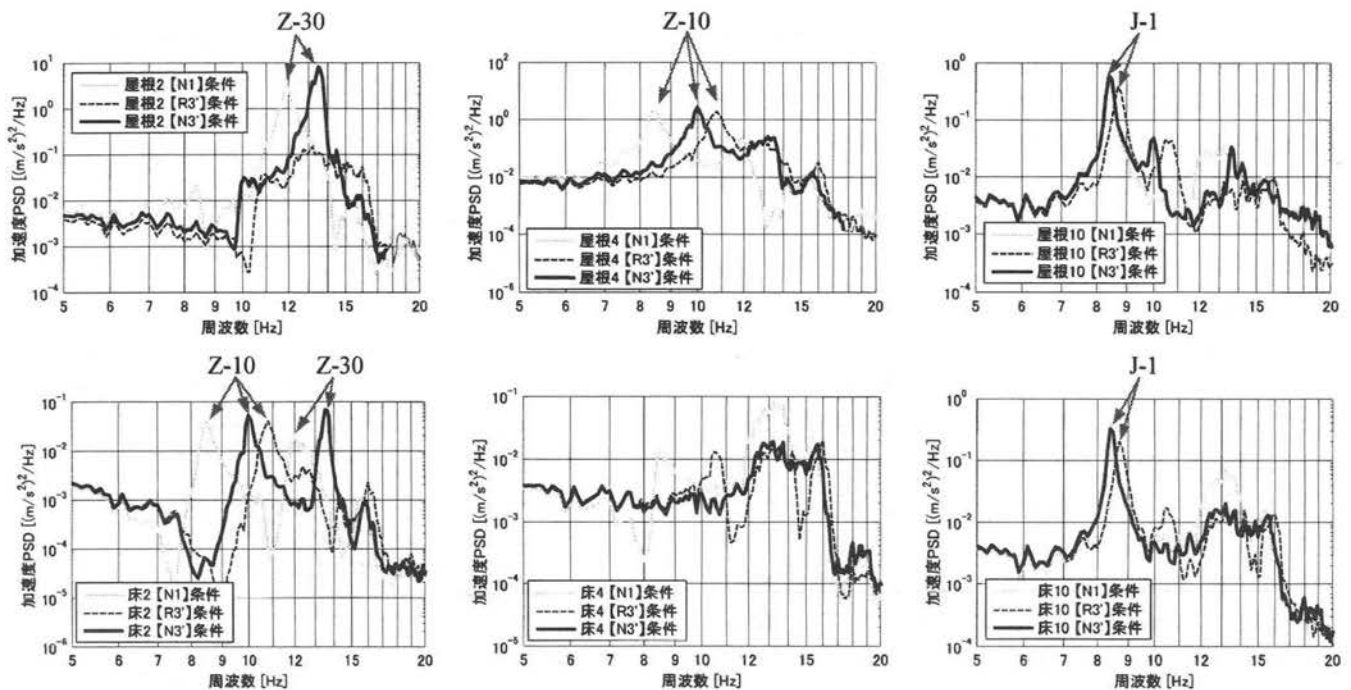


図5 【N1】通常条件, 【N3'】吊手棒条件, 【R3'】部分補強条件における床及び屋根の加速度 PSD 比較

いても形状が類似したモードは同じ欄に示した。

モード解析結果から S, Z モードの固有振動数は、ベース車両の【N1】通常条件に対し、【N3'】吊手棒条件、【R3'】部分補強条件ともに大幅に上昇することが分かる。Z-10 モードに着目すると、【N3'】が【N1】とほぼ同じ質量であり、固有振動数の自乗が車体剛性に比例することから、【N3'】吊手棒条件は、【N1】通常条件に対し 4 割近く剛性が向上したと同等な効果が得られた。これは、左右の側の相対変形を吊手棒の軸力で拘束することが、車体の上下曲げ振動の剛性向上に効果的であることを示している。また、【N3'】と【R3'】を比較すると、【R3'】部分補強条件の固有振動数が高く、さらに車体剛性が向上したと考えられる。

J-1, J-2 モードの固有振動数は、どの条件も構体のみの状態とほとんど変化がなかった。

4.4 加振に対する応答

測定点のうち床 3 点、屋根 3 点を選定し、図 5 に【N1】、【N3'】、【R3'】の各車体条件で測定した振動加速度のパワースペクトル密度 (PSD) の計算結果を示す。図の細線が【N1】通常条件、太線が【N3'】吊手棒条件、破線が【R3'】部分補強条件の PSD の結果を示す。

計算結果から全体的に【N1】<【N3'】<【R3'】と剛性が高くなるにつれて、振動加速度のピーク周波数が高い方にシフトする、ピーク値が小さくなるなどの傾向にあることが分かる。また、床 2、屋根 4 の測定点に着目すると、Z-10 モードの固有振動数がピークとして現れ、【N1】<【N3'】<【R3'】と周波数が高くなっていることが確認できる。同様に、屋根 2 では Z-30 モードの、床 10、屋根 10 では J-1 モードの固有振動数が確認できる。さらに、床と屋根を比較すると、屋根の PSD 値が大きい傾向にあり、屋根の拘束をさらに強くすることで振動が励起されにくくなると考えられる。

5. まとめ

内装部材である吊手棒を活用して側出入口の戸袋内柱間をまくらぎ方向に結合することにより、車体の曲げ振動特性が大きく変化することが確認された。以下得られた知見を整理する。

- 左右の側の相対変形を吊手棒の軸力で拘束すること (吊手棒の延長) で、ベース車両に対して大幅に固有振動数が上昇した。
- 吊手棒の延長により、車体の上下方向の曲げ振動に対する剛性向上効果が得られることを確認した。
- 吊手棒 6 本の延長による質量増加は、23kg 程度である。
- 天井骨組補強及び強化型戸袋内柱は、車体剛性向上への寄与が高いが、質量増加は吊手棒の延長より大きい。

今回実施した試験により、吊手棒を活用した車体剛性向上手法の有効性を確認した。今後は FEM 解析による現象の解明や拘束条件の変更、減衰装置の追加などを検討し、乗り心地向上を目指した検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 瀧上唯夫, 富岡隆弘: 最近の軽量車両の固有振動モード特性, 鉄道総研報告, Vol.16, No.5, pp22-28, 2002.
- 2) 相田健一郎, 富岡隆弘, 瀧上唯夫: 車体構造の違いによる在来線車両の車体固有振動モード特性の比較, J-Rail2007 講演論文集, pp143-146, 2007.
- 3) 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, Vol.22, No.9, pp11-16, 2008.
- 4) 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 (予定)