

1709 湾曲型吊手棒による車体剛性向上効果

正 [機] ○谷口 宏次 (東急車輛)

正 [機] 瀧上 唯夫 (鉄道総研)

正 [機] 富岡 隆弘 (鉄道総研)

正 [機] 相田 健一郎 (鉄道総研)

正 [機] 牧野 一成 (鉄道総研)

市川 聡 (東急車輛)

Effects on Rigidity of Railway Vehicle Carbody by Curved Rails for hand strap

Koji TANIGUCHI, Tokyu Car Corp. 3-1, Ohkawa, Kanazawa-ku, Yokohama

Tadao TAKIGAMI, Takahiro TOMIOKA, Ken-ichiro AIDA, Kazunari MAKINO, Railway Technical Research Institute
Satoshi ICHIKAWA, Tokyu Car Corp.

It was studied how non-structural members in the carbody influence 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 reinforcement by non-structural members improved the rigidity of carbody. Especially, the rail for hand strap, which is connected directly to the door pillars in both sides of carbody, largely contributed to the improvement. In this paper, we introduce the improvement of carbody rigidity by curved rails for hand strap including verification result of stress applied to the curved rails. It shows that the rigidity of carbody is improved with a few amount of mass increase.

Keywords:: Rigidity of carbody, Bending Vibration, Natural mode of vibration, Light-Weight Vehicle

1. はじめに

鉄道車両に向けた快適性向上に対する要求は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、騒音などへの関心が高まっている。一方で、高速化、省エネルギー化のために車両の軽量化が進み、それに伴う車体構造の変化による車体の曲げ振動が注目されるようになってきた。

筆者らは、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してきた。その結果、在来線通勤車両の主流であるステンレス鋼製軽量車両は、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、“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、ステンレス鋼製軽量車両の車体を“一本のはり”状態に近づけるために車体剛性を向上する検討を行うこととした。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ために、非構造部材である内部骨組、内装部材に着目し、それらを補強として活用することが可能な“剛性試験車体”を製作した。その試験車体を活用し、様々な補強条件で加振試験を行った結果、内部骨組や内装部材を工夫することで車体剛性が向上することを確認した^{3),5)}。

ここでは、内装部材である吊手棒を活用した取り組みについて、特に、軽量で実現性の高い湾曲型吊手棒による剛性向上効果を中心に加振試験の結果を紹介する。また、補強として加えた湾曲型吊手棒の強度確認も行ったのでその結果についても報告する。

2. 湾曲型吊手棒の設置状況

一般的な在来線通勤車両では、側引戸部の戸袋内柱が

存在する断面付近に、まくらぎ方向の吊手棒が取り付けられている。試験した吊手棒は、このまくらぎ方向の吊手棒を戸袋内柱の断面まで移動し、左右の内柱と結合するように全幅に延長したものとなっている。

これまでの取り組み⁴⁾では、この吊手棒を直線状に延長していたため荷物棚とのクリアランスが狭くなり、出入口脇に立った乗客が荷物を置くときに障害となる可能性があった。そこで、今回は荷物棚へのアクセス性を考慮し、湾曲させながら延長した吊手棒を採用して車体剛性向上への寄与を確認した。図1に、これまでの直線型吊手棒の延長部および今回提案する湾曲型吊手棒の延長部と、荷物棚との位置関係を示す。

図1に示すとおり、荷物棚とのクリアランスは、直線型吊手棒の250mm弱に対し、湾曲型吊手棒は400mm強と大幅にアクセス性を改善できた。

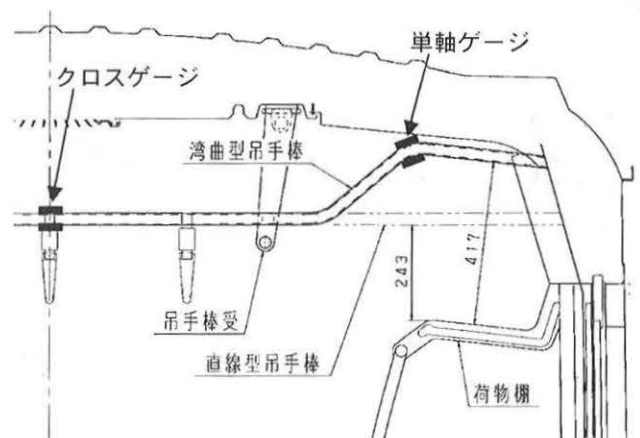


図1 吊手棒延長部と荷物棚との位置関係

3. 試験概要

3.1 剛性試験車体

剛性試験車体は、営業車両として活躍している一般的なステンレス鋼製軽量車両の構体構造を、基本的にそのまま利用した。一方で、内部骨組、内装部品などの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に設計・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、コストなどの観点から、標準化されている。そのため、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くなっている。そこで、剛性試験車体では、上記のコンセプトをもとに取り付けた内部骨組や内装部品を活用して、さまざまな剛性向上策を適用し、加振試験を行った。

ここでは、溶接取付の蛍光灯受および幕板受と、ボルト取付の戸袋内柱パネルを設置した状態「【N】通常」を基準とした。そして、戸袋内柱のある8断面に補強部材として吊手棒を取り付け、試験した結果を紹介する。

表1に試験した補強条件とその記号を示す。

表1 補強条件および記号

記号	戸袋内柱パネル	吊手棒	吊手棒受
【N】	あり	なし	なし
【H1】	あり	直線吊手棒	なし
【H2】	あり	湾曲吊手棒	なし
【H3】	あり	湾曲吊手棒	あり

3.2 試験条件

試験は、補強条件による車体振動特性の変化を調査するため、鉄道総研の車両試験台による軌条輪加振を用いた。車両試験台は、走行状態を模擬する装置で、供試車両の車輪を軌条輪と呼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。

加振方法は、左右それぞれの車輪に3~30Hzでほぼ平坦な周波数特性を持つ無相関のランダム波を同時に入力するバンドランダム加振とした。この加振条件の下で、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車体の振動を計測した。図2に車体の測定点を示す。

図2に示すとおり、測定点数は、床、屋根がそれぞれ17点、側が6点となっており、その他台車などの加速度も測定した。また、図2には、戸袋内柱パネルと補強部材とした吊手棒、吊手棒受の取付位置も記載した。

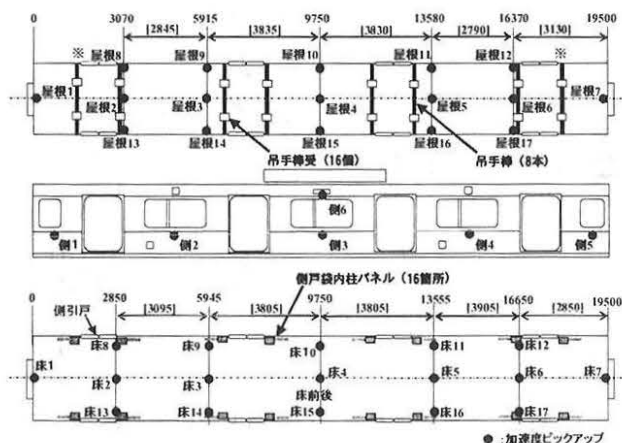


図2 補強部材取付位置と車体振動測定点

4. 試験結果

4.1 固有振動モード解析

各補強条件に対して固有振動モード解析を実施し、同定された代表的なモードの固有振動数を表2に示す。Z-10などの記号は振動形状の特徴を示したもので、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が逆位相、Zが判別困難なものを示し、その後の二桁の数字は、1桁目が屋根、2桁目が床の腹の数を表している。また、Jは車体断面にせん断変形を生じさせるモードであり、J-1は車体中央付近がひし形に変形するモード、J-2はねじり変形するモードである。代表して、図3に【H3】のモード特性を示す。各モード記号に続く数値は、各モードにおける固有振動数、モード減衰比である。

表2 補強条件における各モードの固有振動数[Hz]

モード	補強条件			
	【N】	【H1】	【H2】	【H3】
Z-10	8.53	10.01	8.73	10.30
Z-20/(Z-21)	10.70	12.90	11.00	(14.63)
Z-30/(A-31)	11.96	13.55	12.13	(13.82)
A-11/(A-31)	13.73	—	13.78	(13.69)
J-1	8.46	8.45	8.43	8.48
J-2	14.80	14.70	14.72	14.46

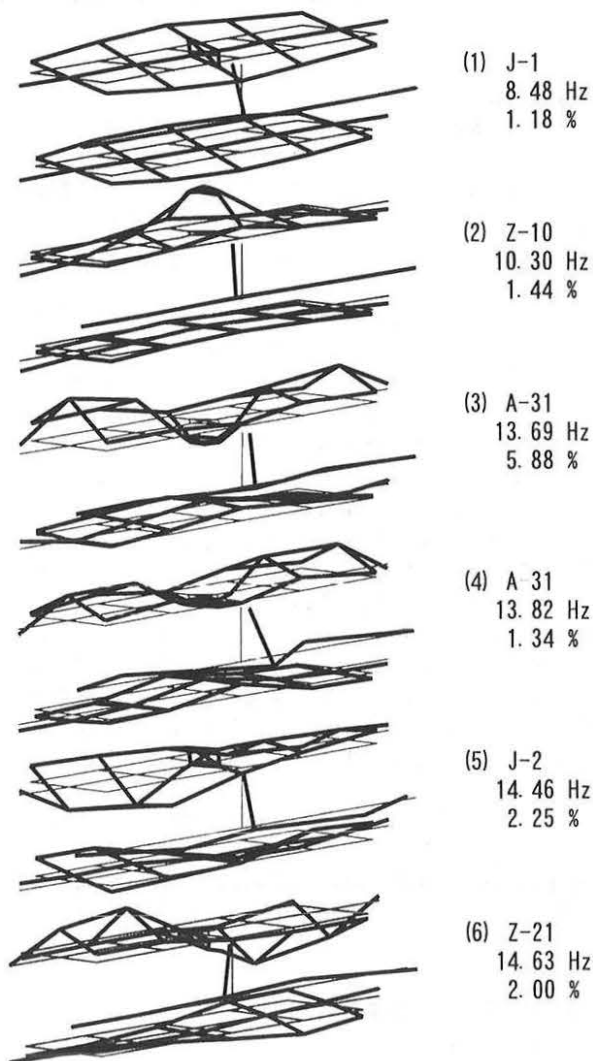


図3 【H3】の固有振動モード

固有振動数となっており、吊手棒受のない湾曲型吊手棒のみでは補強の効果がほとんどないことがわかる。それに対し、【H1】や【H3】は、Z-10、Z-20、Z-30 モード（【H3】は Z-20 が Z-21 に、Z-30 が A-31 に変化）で大幅に固有振動数が上昇し、車体剛性の向上が見られる。

特に、Z-10 モードで比較すると、補強なしの【N】に対し、【H1】が約 18%、【H3】が約 21%もの固有振動数の向上が見られる。これだけ大幅に固有振動数が増加しているにもかかわらず、質量増加は、それぞれ約 50kg、約 90kg にすぎない。さらに、現状の実車相当の吊手棒、吊手棒受を取り付けた場合を基準とすると、それぞれ約 30kg、約 40kg の質量増である。

図 4 に 13.7Hz 付近にある【N】と【H2】の A-11 モードを示す。この A-11 は、側構体と屋根構体の間の角度を保ったまま変形し、屋根・床間および左右側間の相対変形が大きいモードである。しかし、図 3 (3)に示すとおり、【H3】ではこのモードが A-31 モードに変化している。これは湾曲型吊手棒と吊手棒受が結合し、角度の変形とともに屋根の変形を抑えたためと考えられる。一方、【H1】では直線型吊手棒の軸力により左右の側の相対変形が拘束され⁴⁾、これに対応するモードが同定されなかったと考えられる。同じ周波数帯域には、図 5 に示す【H1】Z-30 モードが同定されたが、このモードは、図 3 (3)や図 4 を見比べると、側の変位が極端に小さいことがわかる。

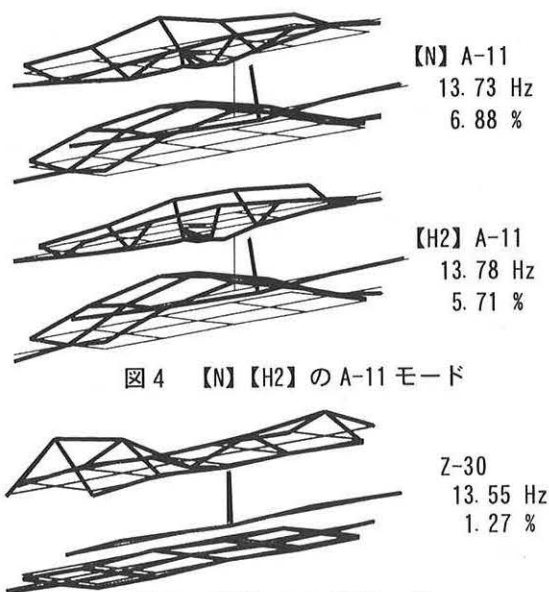


図 4 【N】【H2】の A-11 モード

図 5 【H1】の Z-30 モード

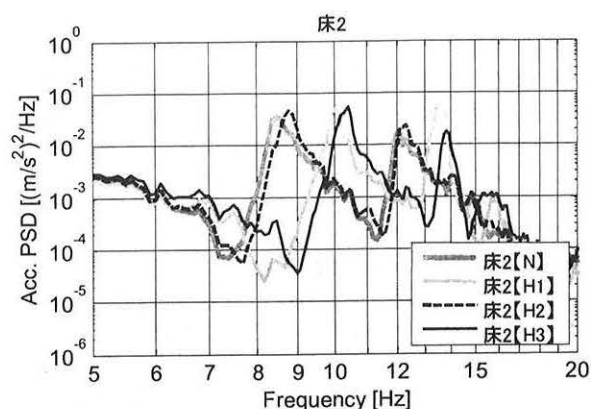
4.2 各測定点の応答解析

床の測定点を代表し、台車直上を 1 点、車体中央部を 2 点選定し、図 6 に【N】、【H1】、【H2】、【H3】の各補強条件で測定した床上面の振動加速度パワースペクトル密度 (PSD) を示す。

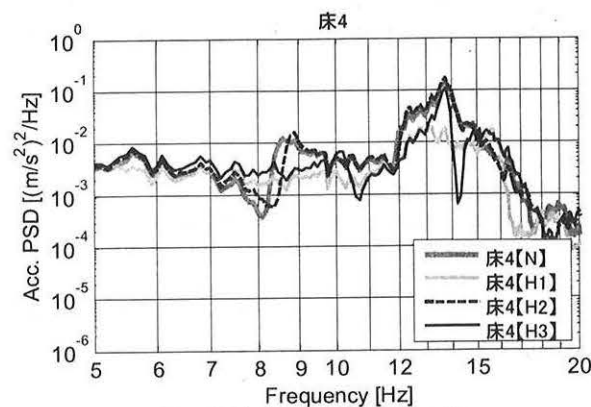
全般的に見ると、表 2 の固有振動数の結果と同様に、【N】と【H2】はピークの数、大きさ、周波数の全てが類似している。これは、前述のとおり湾曲型吊手棒のみでは剛性向上効果が小さいことを示している。

次に、【H1】と【H3】に着目すると、先の 2 条件に対し固有振動数が高い方にシフトしている様子がわかる。これは、それぞれ、左右側構体の相対変形を拘束、側と屋根の角度変形および屋根変形を拘束したことにより、車体全体の剛性が向上したと考えられる。

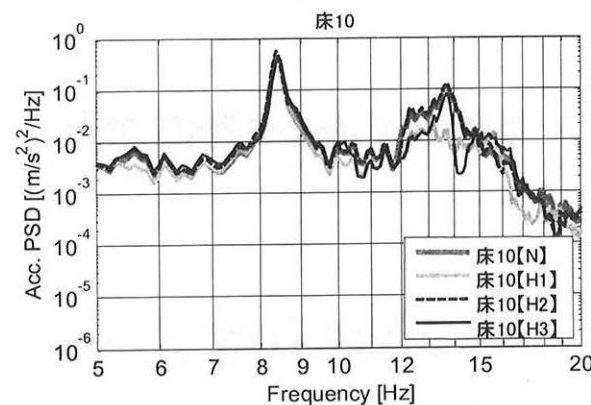
図 6 (1)台車直上の床 PSD に着目すると、補強条件に



(1) 車体中心、台車直上 床



(2) 車体中心、車体中央 床



(3) 1-3 位側寄り、車体中央 床

図 6 各補強条件における床上面加速度 PSD 比較

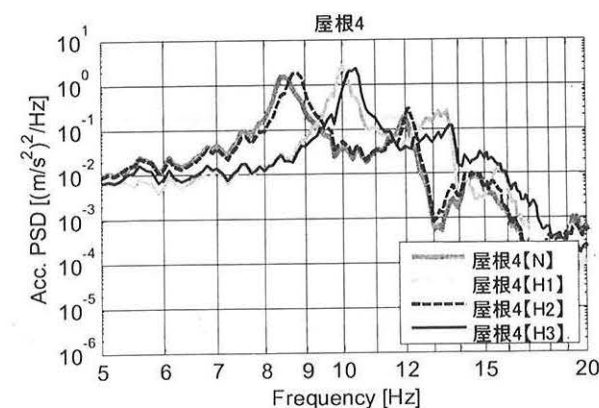


図 7 各補強条件における屋根上面加速度 PSD 比較
(車体中心、車体中央 屋根)

よらず屋根の1次モード(Z-10)、3次モード(Z-30/A-31)の固有振動数がピークとして現れているのがわかる。

図6(2)車体中心、中央部の床 PSDに着目すると、【H1】を除き13.7Hz付近にピークが現れているのがわかる。これは、【N】、【H2】、【H3】のA-11/A-31モードの固有振動数と一致している。この13.7Hz付近で【H1】に突出したピークとして現れていないのは、前述した側構体同士との相対変形拘束効果と考えられる。

図6(3)側寄り、車体中央の床 PSDに着目すると、全ての補強条件に共通して8.5Hz付近にはほぼ同じ大きさ、鋭さで突出したピークが見られる。これはJ-1のひし形変形モードであり、今回の検討範囲ではどの補強条件においても剛性向上効果が見られないモードとなっている。

図7に屋根の測定点を代表し、車体中心、中央部の1点を選定し、各補強条件で測定した屋根上面のPSDを示す。補強のない【N】や補強効果の薄い【H2】は8.5Hz付近に、【H1】と【H3】は10Hz付近に、屋根1次モードの固有振動数が非常に大きなピークとして現れているのが確認できる。

5. 吊手棒強度確認

次に、剛性向上に寄与した湾曲型吊手棒の強度を確認するため、固有振動モードを同定した加振条件でひずみ測定を実施した。その際、吊手棒受の有無(【H3】と【H2】)で剛性向上効果に大きな差が見られたことから、双方の補強条件で測定を行い、結果を比較した。ひずみ測定的位置は図1に示す。

図8に【H3】吊手棒受有の、図9に【H2】吊手棒受無の車両試験台による加振試験時に発生した応力の時間波

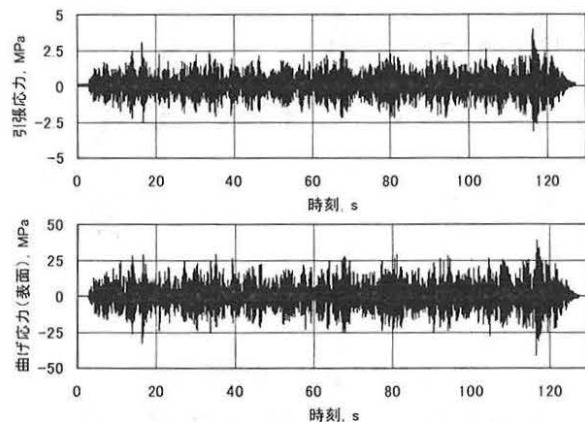


図8 【H3】吊手棒受有状態での吊手棒の応力

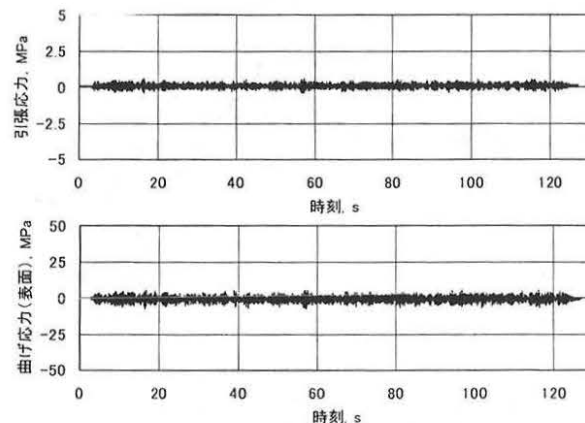


図9 【H2】吊手棒受無状態での吊手棒の応力

表3 加振試験時の最大応力値[MPa]

固定条件	引張応力	曲げ応力
【H3】吊手棒受有	3.9	38.6
【H2】吊手棒受無	0.6	5.3

形を示す。また、表3に加振試験時に発生した最大応力値を整理する。

図8と図9を比較すると、湾曲型吊手棒の引張(圧縮)応力および曲げ応力は、【H3】吊手棒受有が【H2】吊手棒受無に比べ大きな振幅で振動していることがわかる。また、表3の最大応力値を比較すると、【H3】吊手棒受有は、【H2】吊手棒受無に対し、引張応力で6.5倍、曲げ応力で7.3倍となっている。

これは、湾曲型吊手棒を吊手棒受と結合することにより、車体の曲げ振動で発生する屋根、側の変形による力が吊手棒に伝わり、補強として機能していることを示している。また、発生応力は、最大で曲げ応力の40MPa弱であり、SUS304の疲労限度である220MPaに対して十分に余裕があることがわかる。

6. まとめ

車体左右の側出入口戸袋内柱間をまくらぎ方向に結合する吊手棒による車体剛性向上策について、補強条件を変更し調査した結果、以下の知見が得られた。

- 荷物棚へのアクセス性を改善した湾曲型吊手棒を戸袋内柱と結合し吊手棒受と固定することにより、振動特性は異なるが、直線型吊手棒を戸袋内柱と結合した条件と同様に車体剛性を向上することができた。
- 湾曲型吊手棒は、吊手棒受と結合することで、側と屋根の角度変形および屋根変形を拘束し、車体剛性の大幅な向上に寄与する。
- 湾曲型吊手棒の採用による質量増加は、現状相当に対し、わずか40kg程度である。
- 加振試験時に湾曲型吊手棒に発生する応力は最大で約40MPa程度であり、強度上十分に余裕がある。

今回、アクセス性を考慮した湾曲型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、完成車両状態での効果の確認などを実施し、実車への適用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) 谷口宏次、市川聡、瀧上唯夫、富岡隆弘、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